

TOP5

DES ARTICLES

LES PLUS TÉLÉCHARGÉS

DOCUMENTATION DÉCOUVERTE

► OFFERT GRATUITEMENT
PAR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



Techniques
de l'Ingénieur

www.techniques-ingenieur.fr



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

➔ Échangeurs de chaleur (réf. be9515)

➔ Propriétés des thermoplastiques (réf. am3306)

➔ Modélisation et calcul des assemblages vissés. Généralités (réf. bm5560)

➔ Anodisation de l'aluminium et de ses alliages (réf. m1630)

➔ Capteurs de déplacement (réf. r1800)

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

be9515

Échangeurs de chaleur - Définitions et principes généraux

Date de publication : 10/01/2014

Par :

André BONTEMPS

Professeur émérite, Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (LEGI), Université Joseph Fourier, Grenoble, France,

Cet article fait partie de la base documentaire :

Échangeurs de chaleur

Dans le pack : Thermique industrielle

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 : 02/06/2015

Pour le compte : 7200034092 - // nc COMPTE INTERNE TI // 195.25.183.153

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

Échangeurs de chaleur

Définitions et principes généraux

par **André BONTEMPS**

Professeur émérite

Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (LEGI)

Université Joseph Fourier, Grenoble, France

Actualisation de l'article [B 2 340] écrit par BONTEMPS (A.), GARRIGUE (A.) GOUBIER (Ch.), HUETZ (J.), MARVILLET (Ch.), MERCIER (P.), VIDIL (R.) en 1994 et mis à jour par BONTEMPS (A.) en 2013

1. Définitions générales	BE 9 515 - 3
2. Échangeur élémentaire	— 3
2.1 Aspect externe : échangeur comme quadripôle	— 3
2.2 Aspect interne : échange élémentaire.....	— 5
3. Architecture générale de l'échangeur	— 9
3.1 Trois principales configurations d'écoulement	— 9
3.2 Conséquences	— 9
3.3 Échangeur industriel : combinaison des trois configurations élémentaires	— 11
4. Relations entre les mesures aux entrées-sorties et le fonctionnement interne	— 14
4.1 Hypothèse du coefficient d'échange global K constant.....	— 14
4.2 Grandeurs classiques définissant l'échangeur	— 15
5. Analyse énergétique globale	— 19
6. Conclusions et perspectives	— 20
Pour en savoir plus	Doc. BE 9 515

L'échangeur de chaleur, instrument clé du thermicien ou de l'énergéticien permet de contrôler la température d'un système ou d'un produit en échangeant de la chaleur entre deux milieux. Il est indispensable dans de nombreuses applications courantes, chauffage, climatisation, réfrigération, refroidissement électronique, en génie des procédés, pour le stockage d'énergie ou la production d'énergie mécanique (ou électrique) à partir d'énergie thermique. Dans l'échangeur classique, un fluide chaud transfère une partie de son enthalpie à un fluide froid. Ce type d'échangeur sert de base pour donner les définitions et les paramètres nécessaires à son dimensionnement ainsi qu'à la compréhension des phénomènes. D'autres types d'échangeurs existent qui sont également évoqués.

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Définition
A_ℓ	m^2	Surface d'échange entre deux fluides : si indiquée 1 ou 2, surface d'échange en contact avec les fluides 1 ou 2 respectivement
A_t	m^2	Section droite de passage d'un fluide (pouvant avoir l'indice 1 et 2)
c_p	$J/(kg \cdot K)$	Capacité thermique massique à pression constante (si indiquée 1 ou 2 concerne le fluide 1 ou le fluide 2 respectivement)
\dot{C}	W/K	Débit de capacité thermique d'un fluide $\dot{m}c_p = A_t \rho V_q c_p$ (anciennement débit calorifique)
\dot{C}_1	W/K	Débit de capacité thermique du fluide 1
\dot{C}_2	W/K	Débit de capacité thermique du fluide 2
CEPE	nombre	Coefficient d'Évaluation de Performance Énergétique
D_h	m	Diamètre hydraulique
DTML	K (ou $^\circ C$)	Différence des Températures de mélange Moyenne Logarithmique : $DTML = \overline{\Delta T}_{ML} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln \frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}}$
e	m	Épaisseur
F	nombre	Facteur de correction du DTML
g	m/s^2	Accélération gravitationnelle
h	$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficient d'échange convectif fluide/paroi
H	J/kg	Enthalpie massique
K	$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficient d'échange global
L	m	Longueur de l'échangeur
\dot{m}	kg/s	Débit-masse
Nu	nombre	Nombre de Nusselt
NUT	nombre	Nombre d'unités de transfert : $NUT = \frac{K A_\ell}{\dot{C}_{min}}$
p	Pa	Pression
Pr	nombre	Nombre de Prandtl
P_m	m	Périmètre mouillé
Q	J	Énergie thermique
Q_v	m^3/s	Débit-volume
\mathcal{R}	$m^2 \cdot K/W$	Résistance thermique globale (= $1/K$)
R	nombre	Rapport des débits de capacité thermique $R = \min(R_1, R_2)$
R_1	nombre	Rapport des débits de capacité thermique $R_1 = \dot{C}_1/\dot{C}_2$
R_2	nombre	Rapport des débits de capacité thermique $R_2 = \dot{C}_2/\dot{C}_1$
Re	nombre	Nombre de Reynolds $Re = \rho V_q D_h/\mu$
s	m	Coordonnée curviligne
t	s	Temps

Notations et symboles (suite)		
Symbole	Unité	Définition
T	K (ou $^\circ C$)	Température locale ; par extension, température de mélange dans une section donnée
u, v, w	m/s	Composantes du vecteur-vitesse en coordonnées orthonormées
V_q	m/s	Vitesse débitante de l'écoulement dans une section donnée (= Q_v/A_t)
x	nombre	Titre de vapeur (rapport entre débit-masse de vapeur et débit-masse total)
x, y, z	m	Coordonnées en repère orthonormé
β	K^{-1}	Coefficient de dilatation volumique du fluide
ΔT	K (ou $^\circ C$)	Écart de température
ε	nombre	Efficacité de l'échangeur $\varepsilon = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \max(\Delta T_1, \Delta T_2)/\Delta T_{max}$
ε_1	nombre	Efficacité calculée côté chaud $\dot{C}_1 \leq \dot{C}_2, \varepsilon_1 = \Delta T_1/\Delta T_{max}$
ε_2	nombre	Efficacité calculée côté froid $\dot{C}_1 \geq \dot{C}_2, \varepsilon_2 = \Delta T_2/\Delta T_{max}$
θ	rad	Angle
λ	$W/(m \cdot K)$	Conductivité thermique
Λ	nombre	Coefficient de frottement ou coefficient de Darcy
μ	$Pa \cdot s$	Viscosité dynamique
ν	m^2/s	Viscosité cinématique ($\nu = \mu/\rho$)
ξ	nombre	Facteur de perte de pression
ρ	kg/m^3	Masse volumique
τ	m^3	Volume ($d\tau$ volume élémentaire)
$\vec{\varphi}$	W/m^2	Densité de flux thermique, puissance thermique surfacique
Φ	W	Flux thermique, puissance
Indices		
e		entrée
ext		extérieur
f		fluide
i		intérieur
ℓ		linéique
L		en $x = L$
m		mouillé
meca		mécanique
M		maximum
s		sortie
t		thermique
0		en $x = 0$
1		concernant le fluide 1 (fluide chaud)
2		concernant le fluide 2 (fluide froid)

1. Définitions générales

La définition la plus générale que nous puissions donner d'un **échangeur thermique** est celle d'un appareil permettant de transférer la chaleur d'une source à un puits. La source et le puits peuvent être constitués d'un écoulement fluide (cas le plus fréquent) ou d'un fluide et d'un solide (cas fréquent en refroidissement électronique). Dans chacun des cas, le ou les fluides échangent de la chaleur avec une paroi d'échange qui peut être la paroi séparant les fluides ou la surface du solide en contact avec le fluide. Il existe aussi des échangeurs à contact direct entre les fluides.

Deux grandes classes peuvent être distinguées [1] [2] [3] :

- les **récupérateurs**. Par ce terme, nous désignons les échangeurs dans lesquels la chaleur est instantanément transmise d'un fluide chaud à un fluide froid. On néglige donc l'inertie thermique des parois d'échanges ;

- les **régénérateurs**. Ce sont les échangeurs dans lesquels on utilise l'inertie thermique pour stocker la chaleur avant qu'elle soit transférée au milieu froid. Ce stockage peut être réalisé en utilisant la chaleur sensible d'un milieu, sa chaleur latente ou encore une réaction thermochimique réversible.

Les **échangeurs à contact direct** n'entrent dans aucune des catégories ci-dessus. Ce sont des échangeurs qui n'utilisent pas de paroi d'échange pour séparer deux fluides. Les fluides sont donc non miscibles.

Une nouvelle classe d'échangeurs est devenue un sujet d'étude important : il s'agit des **échangeurs-réacteurs** qui combinent à la fois les avantages d'un échangeur de chaleur classique et celles d'un réacteur chimique [4]. Ils seront évoqués dans les articles *Échangeurs de chaleur*. Description [BE 9 516] et *Intensification des échanges thermiques* [BE 9 518].

La question qui se pose pour tous les appareils signalés ci-dessus est leur **régime de fonctionnement**. Le régime de fonctionnement d'un récupérateur est essentiellement **stationnaire** bien qu'il puisse fonctionner en **instationnaire** en particulier lors des démarrages-arrêts. Les deux aspects sont étudiés bien que leur dimensionnement soit effectué généralement en régime stationnaire. Le régime instationnaire sera traité dans l'article *Fonctionnement en régime transitoire* [BE 9 520]. Quant aux régénérateurs, si leur fonctionnement relève quelquefois du régime stationnaire, la plupart, par leur principe de fonctionnement, ont un régime instationnaire.

Dans ce qui suit, nous étudions d'abord, dans le détail, l'**échangeur-récupérateur en régime stationnaire**, ce qui nous permet de définir les grandeurs caractéristiques et de donner les éléments nécessaires au dimensionnement thermique et hydraulique. Pour simplifier, nous parlons d'**échangeur**.

Pour tirer pleinement profit de ce qui suit, le lecteur devra avoir connaissance des principales notions de transfert de chaleur que l'on peut trouver, entre autres, dans les références [5] [6] [7] [8] ainsi que dans les articles *Transferts thermiques* [BE 8 200], [BE 8 205], [BE 8 206], [BE 8 207], [BE 8 210].

2. Échangeur élémentaire

2.1 Aspect externe : échangeur comme quadripôle

Vu de l'extérieur, un échangeur se présente comme une boîte noire pourvue, comme un **quadripôle électrique**, de **deux entrées** et de **deux sorties de fluides** en écoulement.

Il est bien commode de mesurer les caractéristiques essentielles du fonctionnement de l'échangeur à l'un de ces quatre pôles, plutôt que de faire des mesures, forcément plus délicates, à l'intérieur.

C'est ainsi que nous établissons pour chacun des fluides 1 ou 2 des paramètres mesurables et mesurés à l'entrée et à la sortie de chacun des deux :

- l'état : liquide, gazeux ;
- le débit-masse \dot{m} , constant de l'entrée à la sortie ;
- la température T , variable dans l'échangeur ;
- la pression p , peu variable.

Il est entendu que l'on connaît par ailleurs les caractéristiques thermophysiques de chacun des deux fluides et notamment :

- la capacité thermique massique (chaleur massique) c_p ;
- la masse volumique ρ ;
- la conductivité thermique λ ;
- la viscosité dynamique μ ;

ainsi que les lois de variation avec la pression, et surtout avec la température, de ces différents paramètres.

Pour les fluides c_p , ρ et λ varient peu avec la pression p (pas de tout pour un gaz parfait). En revanche, les variations avec la température T sont souvent d'une grande amplitude.

Par ailleurs, et comme les différents paramètres qui gouvernent le fonctionnement de l'échangeur ont aux entrées-sorties des valeurs privilégiées parce que aisément mesurables, une théorie du fonctionnement interne vise donc à calculer pour chacun des fluides les paramètres essentiels de l'évolution en fonction précisément des valeurs aux entrées-sorties.

Le **schéma de principe** (figure 1) serait cependant incomplet s'il n'y était adjoint, extérieurement au quadripôle, **deux pompes** (ou **ventilateurs**) destinées à mettre en mouvement les fluides 1 et 2 à l'intérieur de l'échangeur, en générant pour chacun des fluides entre l'entrée et la sortie une différence de pression égale à la perte de pression visqueuse à l'intérieur de l'échangeur.

Cette perte de pression (perte de charge) dépend pour chacun des fluides :

- de la nature du fluide ;
- de sa température : le coefficient de viscosité qui gouverne cette perte de pression γ est très sensible ;
- de son débit et de la géométrie interne de l'échangeur.

Pour un échange de flux thermique donné apparaît comme une qualité le fait que l'échangeur requiert l'énergie mécanique minimale pour son fonctionnement.

Cette optimisation des pertes de pression à des valeurs minimales devient déterminante si on décide, pour des échangeurs simples et économiques, de recourir au mécanisme moteur qu'est la convection naturelle (article *Convection thermique et massique. Principes généraux* [BE 8 205]) ou au phénomène du « *gas lift* » pour assurer l'ascension d'un fluide diphasique. Ces processus, peu puissants, ne sont compatibles qu'avec de faibles pertes de pression et imposent bien entendu un écoulement ascendant du fluide que l'on entend déplacer ainsi.

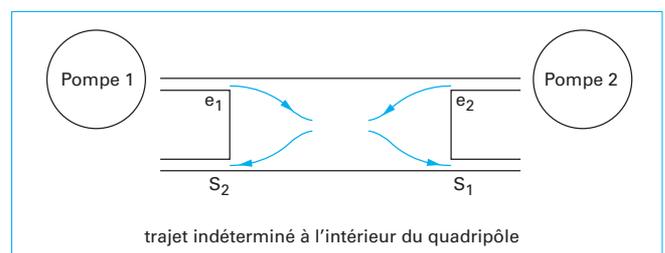


Figure 1 – Schéma du quadripôle

2.1.1 Hypothèses restrictives

On se limite toujours à ce que l'on peut connaître ou traduire de l'échangeur par la seule considération aux entrées-sorties.

1) Conformément aux considérations préliminaires, les calculs et les notions classiques sur les échangeurs portent sur un **régime de fonctionnement stationnaire**, ce qui se traduit dans les équations par le fait simplificateur que l'application à n'importe quel paramètre de l'opérateur $\partial/\partial t$ donne zéro (mais non pas d/dt). Sont donc exclus des calculs exposant les principes de base les mises en route ou arrêts des échangeurs qui sont traités de façon spécifique. Cependant, si l'inertie thermique est faible, ce que traduit souvent la condition (3 b) ci-après (pas de stockage), on peut, si le démarrage ou l'arrêt ne sont pas trop rapides, considérer ces transitions comme une suite d'états quasi stationnaires. Bien que la stationnarité soit contenue implicitement dans la condition (3), il semble préférable d'insister sur ce point explicitement. Par ailleurs, la densité de flux thermique perpendiculaire à la paroi est, dans les appareils courants, tellement plus élevée que la densité de flux thermique parallèle à cette paroi que l'on néglige le plus souvent cette dernière composante.

2) On admet dans ce qui suit que les deux fluides sont physiquement séparés l'un de l'autre par une **paroi étanche au transfert de masse** (paroi d'échange) mais aussi **perméable que possible au transfert d'énergie thermique**.

En conséquence, le débit-masse de chacun des fluides est constant tout au long de son écoulement et en particulier :

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= (A_t \rho V_q)_{1e} = (A_t \rho V_q)_{1s} \\ \dot{m}_2 &= (A_t \rho V_q)_{2e} = (A_t \rho V_q)_{2s}\end{aligned}$$

avec A_t section droite du (ou des) canal (canaux) d'écoulement,
 ρ masse volumique du fluide,
 V_q vitesse débitante de l'écoulement.

3) On admet également que toute l'enthalpie perdue par le fluide chaud est instantanément gagnée par le fluide froid.

Cela implique en fait deux conditions et non une seule.

a) Aucune énergie n'est perdue vers l'extérieur, ce qui traduit un calorifugeage parfait. Aucune énergie thermique n'est non plus créée dans l'échangeur tel que nous l'avons en fin du paragraphe 1. Cependant, il n'est pas possible de constituer un échangeur sans prévoir les pertes d'énergie mécanique engendrées par la viscosité et qui se traduisent en pertes de pression. Mais on néglige (en général) l'apport thermique résultant de cette transformation inéluctable d'énergie mécanique en énergie thermique. On parle donc d'**adiabaticisme de l'échangeur**.

b) Comme on l'a déjà indiqué, on suppose que toute l'énergie perdue par le fluide chaud est instantanément gagnée par le fluide froid et on parle d'**échangeur-récupérateur**. On doit remarquer que le calcul classique de l'échangeur s'accommode bien d'un changement de phase total ou partiel de l'un des fluides.

C'est ainsi que le fluide chaud peut être une vapeur à l'entrée et un liquide à la sortie : on a affaire alors à un **condenseur**. À l'inverse, le fluide froid, liquide à l'entrée, peut à la sortie être vaporisé : on a affaire alors à un bouilleur ou **évaporateur**.

Les différences avec les échangeurs monophasiques n'apparaissent qu'au niveau du fonctionnement interne de l'échangeur où les caractéristiques mécanique et thermique de l'écoulement font appel à des notions nouvelles développées dans les articles consacrés à l'ébullition et à la condensation [BE 8 235] [BE 8 236] [BE 8 238] [BE 8 239].

Les caractéristiques d'un échangeur en fonction de ces hypothèses restrictives sont résumées dans l'encadré suivant.

Caractéristiques d'un échangeur en fonction de ses hypothèses restrictives

Le débit-masse de chacun des fluides est constant (**condition 1**) :

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= (A_t \rho V_q)_1 \\ \dot{m}_2 &= (A_t \rho V_q)_2\end{aligned}$$

Stationnarité (**condition 2**) :

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

L'enthalpie perdue par l'un est intégralement cédée à l'autre ; c'est donc l'adiabaticisme sans stockage (**condition 3**) :

$$\pm (H_e - H_s)_1 = (H_e - H_s)_2$$

ce qui, en monophasique et à c_p constante, conduit à :

$$\pm \dot{m}_1 [c_p (T_s - T_e)]_1 = \dot{m}_2 [c_p (T_s - T_e)]_2$$

que l'on écrit aussi :

$$\pm \dot{C}_1 (T_s - T_e)_1 = \dot{C}_2 (T_s - T_e)_2$$

où $\dot{C}_1 = \dot{m}_1 c_{p1}$ et $\dot{C}_2 = \dot{m}_2 c_{p2}$ sont appelés les débits de capacité thermique des fluides 1 et 2 respectivement.

En diphasique (évaporateur ou condenseur), les **titres de vapeur** :

$$x_{1e} \quad x_{1s} \quad x_{2e} \quad x_{2s}$$

doivent être connus aux bornes du quadripôle.

Dans certaines applications (chauffage central par exemple), on peut remplacer un titre de vapeur par un débit d'eau condensée, ce qui revient au même.

2.1.2 Aménagement des hypothèses restrictives

Si la validité de ces relations simples situe le domaine des échangeurs, précisons encore leur définition en les caractérisant aussi parce qu'ils ne sont pas. Entre ces deux extrêmes, il existe toute une gamme d'installations industrielles qui, ne relevant plus rigoureusement des hypothèses restrictives ci-avant, en sont encore assez proches pour que l'on applique l'ensemble des relations de l'encadré précédent.

Les **échangeurs « à entorse »** font partie de l'article *Échangeurs de chaleur ; Description* [BE 9 516] où sont regroupés :

- les **échangeurs « à entorse »** ;
- les **échangeurs sans paroi ou à contact direct** (cf. article *Échangeurs de chaleur à contact direct* [BE 9 565] où le transfert de masse d'un fluide à l'autre, bien que parasitaire en général, n'est pas nul ;
- l'**échangeur à lit fluidisé** où l'aspect diphasique n'est pas limité aux phases vapeur/liquide comme dans les bouilleurs ou les condenseurs. Des particules solides de petites dimensions peuvent être réinsérées au sein d'un gaz et emportées par lui. Ce type de « fluide » diphasique a en général un coefficient d'échange convectif plus élevé à même vitesse que celui du gaz seul. Les notions fondamentales sur lesquelles se fonde le traitement se trouvent dans l'article *Convection thermique et massive. Principes généraux* [BE 8 205] ;
- les **échangeurs dits « complexes »** dans lesquels les particules solides peuvent aussi se trouver en suspension dans un milieu liquide ; on les trouve abondamment dans les industries agroalimentaires, par exemple ;

– les échangeurs dits **régénérateurs**, où le stockage d'énergie n'est plus une entorse quantitativement faible à l'hypothèse de non-stockage mais est au contraire délibérément recherché. Ils ne rentrent pas dans la définition évoquée plus haut. On les considère cependant toujours comme des échangeurs en distinguant les régénérateurs fixes, type *cowper* de haut-fourneau et les régénérateurs rotatifs.

Dans les **régénérateurs fixes**, une même masse solide est chauffée par des gaz chauds, puis cède son énergie thermique à des gaz froids avant que ne recommence le cycle. Dans les **régénérateurs rotatifs**, la matière d'un disque passe successivement d'un courant permanent de fluide chaud à un écoulement également permanent de fluide froid.

L'essentiel du calcul relève alors de la conduction dans le solide en régime transitoire tandis que les conditions aux limites sont soit l'isolement, soit le transfert convectif par un fluide unique auquel s'ajoute très souvent (stockage dans les *cowpers*) un transfert radiatif entre le solide et les flammes ou les fumées, transfert qui n'a pas son pendant en déstockage où le fluide qui se charge d'énergie thermique est en général de l'air, inactif en infrarouge.

2.1.3 Terminologie

Précisons aussi qu'une terminologie s'est instaurée par la finalité et la fonction auxquelles était destiné l'échangeur.

C'est ainsi que le terme **recupérateur** a été utilisé pour l'échangeur classique entre les fumées chaudes de combustion et l'air comburant pris initialement à température ambiante (article *Échangeurs de chaleur. Description* [BE 9 516]).

On verra aussi utiliser le terme de **surchauffeur** ou **resurchauffeur**, simple échangeur fumées chaudes/vapeur, destiné à faire passer cette dernière de manière isobare de la température saturante à laquelle elle sort du bouilleur à une vapeur surchauffée dont les caractéristiques évoluent vers le gaz et ultérieurement vers le gaz quasi parfait.

Les **échangeurs à caloducs** peuvent être traités comme des échangeurs à ailettes où, par un mécanisme interne que l'on peut ignorer en première approximation, la substance de l'ailette aurait une conductivité thermique infinie. C'est la raison pour laquelle les échangeurs à caloducs sont traités dans l'article *Échangeurs de chaleur. Intensification des échanges thermiques* [BE 2 343], la théorie des calculs elle-même étant donnée dans l'article *Thermosiphons et caloducs* [BE 9 545].

En revanche, la production abondante d'énergie dans un des gaz sort l'appareil de la gamme des échangeurs pour passer dans celle des **chaudières** (articles *Chaudières* [BE 8 730] et [BE 8 731]).

2.2 Aspect interne : échange élémentaire

2.2.1 Coefficient d'échange global

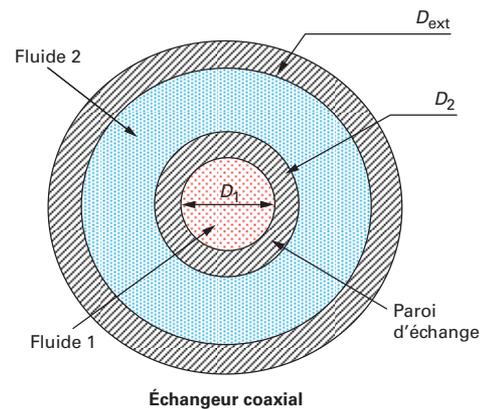
Que se passe-t-il à l'intérieur du quadripôle ? Il faut, pour le savoir, suivre l'évolution thermique d'un élément de volume $d\tau$ d'un des fluides qui circule dans les trois dimensions (x, y, z) . Souvent, grâce aux notions de température de mélange et de vitesse de débit [5], on peut repérer l'élément par sa seule abscisse curviligne s depuis l'entrée jusqu'à la sortie après un trajet de longueur L (figure 2). Dans cette figure, le fluide chaud est le fluide 1 et le froid le fluide 2. Pour une valeur donnée de l'abscisse x , on a représenté les profils transversaux de température et de vitesse. Pour chaque fluide, par une moyenne appropriée, on détermine donc une température de mélange $T_1(x)$ et $T_2(x)$.

L'évolution d'un fluide est évidemment couplée à celle du deuxième fluide et les deux calculs doivent donc être concomitants.

En général, la section droite de passage A_t d'un fluide est constante pour une abscisse x variant de 0 à L en exceptant les zones de distribution ou de collectage du fluide au voisinage de l'entrée ou de la sortie.

Cette section A_t , éventuellement somme des sections droites des canaux élémentaires si plusieurs de ceux-ci sont montés en parallèle, est limitée par un **périmètre mouillé** P_m du canal ou de l'ensemble des canaux.

La partie de ce périmètre qui se trouve sur la paroi d'échange qui sépare les deux fluides est appelée **périmètre thermique** P_t . Dans certains cas, le périmètre thermique est égal au périmètre mouillé. Ces deux notions sont illustrées dans l'exemple suivant.



Échangeur coaxial

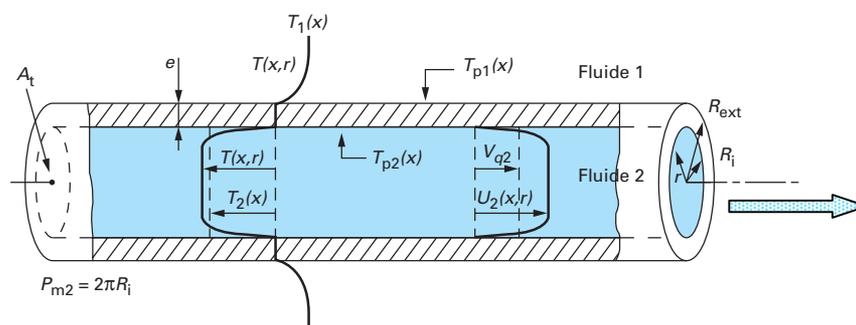


Figure 2 – Profils transversaux de température et de vitesse dans un tube d'échangeur

Exemple de l'échangeur coaxial ($P_m \neq P_1$)

Soit un échangeur coaxial constitué de deux tubes concentriques et supposons que le fluide 1 circule dans le tube intérieur de diamètre D_1 et que le fluide 2 circule dans l'espace annulaire de diamètres D_2 et D_{ext} . La paroi d'échange est alors constituée par le tube intérieur.

Le périmètre mouillé concernant le fluide 1 (limitant la section de passage A_{t1}) est donné par :

$$P_{m1} = \pi D_1$$

et le périmètre thermique, situé sur la paroi d'échange, est égal au périmètre mouillé, soit :

$$P_{t1} = P_{m1}$$

Le périmètre mouillé concernant le fluide 2 (limitant la section de passage A_{t2}) est donné par :

$$P_{m2} = \pi(D_2 + D_{ext})$$

et le périmètre thermique est la partie située sur la paroi d'échange, donc :

$$P_{t2} = \pi D_2$$

On parle aussi de **surface d'échange** A_e qui est la surface à travers laquelle la chaleur est transférée à la paroi, soit A_{e1} ou A_{e2} suivant le fluide. On choisit quelquefois une surface d'échange commune qui peut être la surface d'échange moyenne ou, par convention, la surface d'échange extérieure soit πD_2 .

Comme le transfert ne peut s'effectuer qu'au travers de la surface d'échange, on a défini la notion de périmètre thermique. Cependant, le calcul des coefficients d'échange par l'intermédiaire de corrélations (voir ci-après) fait plutôt appel à la notion de périmètre mouillé. Pour simplifier, nous utilisons dans la suite la seule notation P_m sans autre explication complémentaire.

Considérons une coupe longitudinale d'un échangeur idéalisé (figure 3) dans lequel on a défini une température de mélange des fluides chaud et froid T_1 et T_2 respectivement qui ne dépendent que de l'abscisse x . On a défini également des températures de surface T_{p1} et T_{p2} côté 1 et 2 de la paroi d'échange. On peut écrire le flux élémentaire perdu par le fluide 1 :

$$|d\Phi| = h_1 [T_1(x) - T_{p1}(x)] P_{m1} dx$$

en admettant une condition à la limite exclusivement convective définie par un coefficient d'échange h_1 , entre le fluide 1 et le côté 1 de la paroi.

De même pour le fluide 2 :

$$|d\Phi| = h_2 [T_2(x) - T_{p2}(x)] P_{m2} dx$$

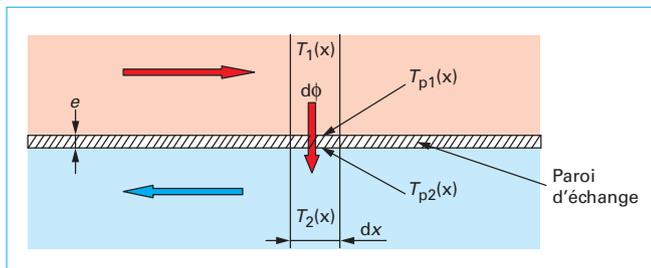


Figure 3 – Échange élémentaire entre deux fluides séparés par la paroi d'échange

S'agissant d'exposer des principes, plaçons-nous dans le cas, fréquent, où $P_{m1} = P_{m2} = P_m$ (séparation des deux fluides par des plaques ou des tubes peu épais). Notons aussi que le problème est unidimensionnel en x .

Du fait des hypothèses (§ 1.1.1), ces flux élémentaires sont égaux. Par ailleurs, ils sont transférés par conduction dans l'épaisseur e de la paroi d'échange. Assimilant cette paroi à une plaque plane, on a l'expression :

$$|d\Phi| = \frac{\lambda}{e} [T_{p1}(x) - T_{p2}(x)] P_m dx$$

Ce flux élémentaire étant conservatif, c'est le même dans les trois expressions. En tirant de chacune les différences de température partielles et en les additionnant pour obtenir la différence de température de mélange des deux fluides en une abscisse donnée x , $\Delta T = T_1(x) - T_2(x)$, on a :

$$\left. \begin{aligned} T_1 - T_{p1} &= \frac{d\Phi}{dx} \frac{1}{h_1 P_m} \\ T_{p1} - T_{p2} &= \frac{d\Phi}{dx} \frac{e}{\lambda P_m} \\ T_{p2} - T_2 &= \frac{d\Phi}{dx} \frac{1}{h_2 P_m} \end{aligned} \right\} \text{ si } P_{m1} = P_{m2} = P_m$$

Soit, à l'abscisse x choisie :

$$(T_1 - T_2)(x) = \Delta T(x) = \left(\frac{d\Phi}{dx} \right) (x) \frac{1}{P_m} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} \right)$$

ou :

$$(T_1 - T_2)(x) = \Delta T(x) = \varphi_\ell \frac{1}{P_m} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} \right)$$

φ_ℓ étant le flux linéique que l'on peut écrire $\varphi_\ell = P_m \varphi$, où φ est la densité surfacique du flux thermique.

D'où ce résultat suivant essentiel.

En chaque point de l'échangeur, la différence de température de mélange des deux fluides crée un flux surfacique d'échange proportionnel à cette différence $\Delta T(x)$ et proportionnel à l'inverse d'une **résistance thermique surfacique** égale à :

$$\mathcal{R} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} = \frac{1}{K}$$

On appelle K le **coefficient d'échange global** entre les deux fluides. Le flux élémentaire peut donc s'écrire :

$$\begin{aligned} d\Phi &= K(T_1 - T_2) P_m dx \\ d\Phi &= K \Delta T(x) P_m dx \\ d\Phi &= (\Delta T(x) / \mathcal{R}) P_m dx \end{aligned}$$

Les quantités h_1 , h_2 , λ en particulier, peuvent être fonction de x , y , z . Si c'est le cas, il convient de diviser l'échangeur en autant de tronçons où l'on peut admettre que ces quantités sont constantes. On trouve dans l'article spécialisé sur la convection [BE 8 206] des corrélations permettant de déterminer h entre un fluide et une paroi pour différentes géométries et différentes conditions thermiques, ce qui permet, en y ajoutant un calcul de conduction, de déterminer K . Le tableau 1 donne quelques ordres de grandeur de h et de λ/e . La résistance de paroi peut comporter des résistances additionnelles en série due à différentes couches solides spécifiques : suies, tartre, etc., déposées sur cette paroi au cours du fonctionnement (phénomène d'encrassement).

Tableau 1 – Ordres de grandeur des valeurs de h et λ/e
(en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

Coefficient h de différents fluides	
Gaz en convection forcée	$20 < h < 300$
Gaz en convection naturelle	$5 < h < 30$
Eau en convection forcée	$300 < h < 12\ 000$
Eau en convection naturelle	$100 < h < 2\ 000$
Condensation (sans gaz incondensable) (condenseur d'eau)	$4\ 000 < h < 110\ 000$
Ébullition (bouilleur d'eau) (dépend des sites de nucléation et du régime d'ébullition)	$3\ 000 < h < 50\ 000$
Métaux liquides en convection	$6\ 000 < h < 120\ 000$
Conductance λ/e de parois types (pour $1\ m^2$)	
Paroi d'acier de 2 mm	= 20 000
Paroi d'acier inoxydable de 2 mm	= 10 000
Paroi de PVC de 2 mm	≈ 250
Tartre calcaire déposé sur une paroi (épaisseur de tartre 2 mm)	≈ 500

D'où la conclusion évidente : l'influence thermique de la paroi *métallique mince* peut être considérée comme faible donc négligée chaque fois que les deux fluides n'appartiennent pas l'un et l'autre à l'une des trois catégories suivantes : fluide en ébullition, fluide en condensation, métal liquide ; la paroi est alors quasi isotherme dans son épaisseur.

2.2.2 Remarques

■ Le concept de résistance thermique est analogue à celui de la **résistance électrique** en courant continu (article *Transmission de l'énergie électrique, conduction* [BE 8 200]). Là aussi, il y a évolution d'un couple de variables, l'une extensive, l'autre intensive qui sont liées par une relation linéaire, le coefficient de proportionnalité étant la résistance.

■ S'agissant de concept, l'exposé ci-dessus a été limité à un exemple simple où $P_{m1} \approx P_{m2}$, ce qui est parfaitement réalisé dans les échangeurs à plaques, très admissible pour les tubes peu épais, discutable si l'**épaisseur croît**. Dans ce dernier cas, il n'y a plus de surface d'échange commune : le flux linéique φ_ℓ est conservatif, le flux surfacique ne l'est plus. On établit aisément une nouvelle définition de la résistance linéique \mathcal{R}_ℓ pour la relier à la différence de température de mélange ΔT et reprenant l'exemple du tube de la figure 2 :

$$\mathcal{R}_\ell = \frac{1}{2\pi R_{\text{ext}} h_1} + \frac{1}{2\pi R_i h_2} + \frac{1}{2\pi \lambda} + \ln \frac{R_{\text{ext}}}{R_i}$$

Il n'est plus indifférent que le fluide 1 ou 2 soit d'un côté ou de l'autre de la paroi. Si tant est qu'on le puisse, d'autres considérations éventuellement contradictoires pouvant être prioritaires, on place le fluide dont le coefficient convectif est le plus médiocre à l'extérieur du tube : l'augmentation de la surface de contact entre ce fluide et la surface externe du tube compense partiellement la faiblesse de son coefficient h . On remarque que la notion de coefficient d'échange global perd un peu de son intérêt puisque l'on ne sait plus à quelle surface d'échange le rapporter (§ 2.2.1). Quand les auteurs le font néanmoins, c'est généralement la surface extérieure qui est considérée comme surface d'échange.

■ Que l'on emploie la résistance linéique ou surfacique, le concept ne tient que si h_1 et h_2 ne dépendent que de x . Cela, entre autres, suppose, pour un tube par exemple d'avoir une **symétrie thermique de révolution**.

Cela exclut du traitement deux types de cas assez fréquents :

– ceux où la **convection naturelle** dissymétrise les variables thermiques par rapport à la symétrie géométrique. C'est le cas d'un tube ou d'un canal horizontal où l'écoulement à faible nombre de Reynolds ne réisothermise pas efficacement le fluide, donc la paroi, en température (figure 4). La convection forcée laminaire pratiquée parfois dans les transitoires lents (mise en route, arrêt progressif) laisse s'établir une telle stratification. Le calcul des coefficients h en convection mixte est difficile et les conséquences de la stratification sont en général fâcheuses ;

– on rompt également la symétrie dans les échangeurs à tubes à courants croisés. La figure 5 représente la section d'un tube de radiateur de véhicule où le courant d'air extérieur provoque des variations de h_{ext} avec l'angle θ . Si h_i est élevé, on prend en général une valeur moyennée en θ pour h_{ext} .

■ La linéarité entre variables extensive et intensive est détruite aussi s'il y a des **échanges radiatifs** entre au moins un des fluides et la paroi, ce qui se produit si ce fluide n'est ni transparent ni opaque et cela pour un domaine même restreint ou discontinu de longueurs d'onde, du moment qu'il y a émission ou absorption de chaleur rayonnée par le fluide et/ou la paroi dans les longueurs d'onde à la température où l'on se trouve. C'est souvent le cas bien connu des échangeurs récupérateurs sur des fumées chaudes, ce qui conforte le préjugé admis à tort que le rayonnement n'intervient qu'à niveau thermique élevé. On se méfie cependant des domaines de plus en plus nombreux (applications spatiales, isolement à très basse température par exemple) où le rayonnement, bien que faible, est prédominant puisque dans le vide il n'y a ni conduction, ni convection. Dans certains cas, un palliatif utile consiste à linéariser le rayonnement et à ajouter sa part à celle du coefficient d'échange convectif :

$$h = h_c + h_r$$

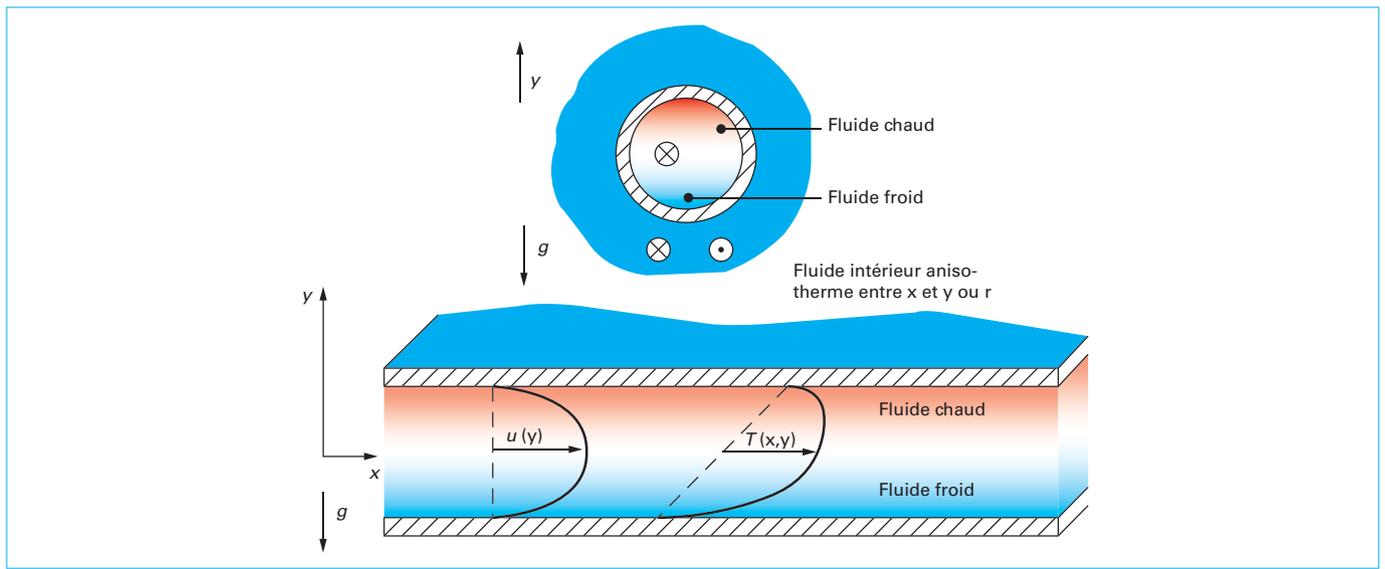


Figure 4 – Symétrie géométrique et dissymétrie thermique dans le champ de pesanteur due aux différences de masse volumique avec la température T

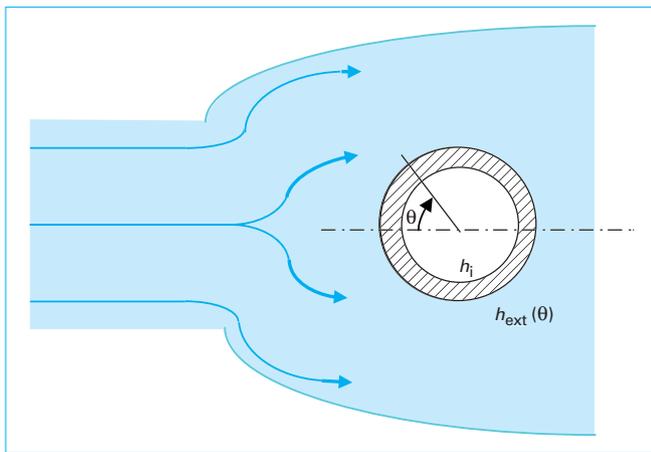


Figure 5 – Dissymétrie des températures due aux variations de h_{ext} en fonction de l'angle θ

Mais on fait rapidement de grossières erreurs si la condition $h_i \approx h_c$ n'est pas réalisée (cf. article *Transmission de l'énergie thermique. Conduction* [BE 8 200]).

2.2.3 Conséquences

Diminuer la résistance thermique est un des soucis majeurs et évidents du concepteur.

Un simple coup d'œil aux ordres de grandeur donnés dans le tableau 1 montre d'abord que, pour les parois métalliques tout au moins, la résistance conductive est beaucoup plus faible que les résistances convectives des fluides usuels dans les conditions où l'on peut les utiliser au point que l'on peut la négliger au moins en première approximation sauf dans les cas suivants :

- les deux fluides sont l'un et l'autre des métaux bons conducteurs donnant naissance à des coefficients h convectifs extrêmement élevés (par exemple, échangeurs secondaires sodium-sodium dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides) ;

- l'un des fluides est en ébullition et l'autre en condensation : même résultat que ci-dessus, les coefficients h sont extrêmement élevés.

Les relations précédentes donnant les résistances thermiques surfacique et linéique montrent d'emblée qu'il est peu rentable de s'acharner à augmenter le coefficient h_2 par exemple si $h_2 \gg h_1$. C'est du côté du fluide 1 qu'il faut porter les efforts.

L'expression générale du transfert fluide-paroi pour tout l'échangeur s'écrit :

$$\Phi = h A_\ell \overline{\Delta T}$$

$\overline{\Delta T}$ étant pour le moment une différence de température de mélange des deux fluides moyennée entre l'entrée et la sortie. Cette moyenne est précisée ultérieurement dans la notion de DTML (§ 4.2.2). Cette relation appelle les trois remarques suivantes.

- **Tolérer une valeur de h faible mais augmenter $\overline{\Delta T}$.** La contrepartie a une importance variable suivant le rôle dévolu à l'échangeur :

- si l'échangeur intervient dans un ensemble de conversion d'énergie, descendre le niveau thermique entre l'entrée du fluide chaud et la sortie du fluide froid pénalise le rendement de Carnot, d'autant plus que la température de la source chaude est plus basse (énergie solaire sans concentration, géothermie, énergie des océans, etc.) ;

- s'agissant du processus de fabrication d'un produit, ce dernier constitue le but principal : c'est lui qui dicte les niveaux de température par des considérations chimiques, et non l'énergie thermique transformable.

- **Augmenter h en augmentant la vitesse du fluide ou en choisissant un fluide très conducteur.** Mais comme la nature de ce dernier est souvent imposée, on doit augmenter la vitesse de circulation, ce qui se paie inéluctablement, toutes choses égales par ailleurs, par une augmentation encore plus rapide des pertes de pression.

- **Augmenter la surface d'échange A_ℓ .** On peut le faire différemment et préférentiellement du côté du seul fluide médiocre conducteur. On a déjà signalé que, pour des tubes épais, il est préférable de disposer ce fluide à l'extérieur. Si ce n'est pas possible ou insuffisant, on dispose sur la surface correspondante des ailettes, des corrugations bonnes conductrices de la chaleur (souvent

métalliques) qui augmentent la surface mouillée par ce fluide à coefficient h médiocre et la turbulence. Bien entendu, on peut placer des ailettes de part et d'autre de la paroi donc dans les deux fluides (cf. article *Échangeurs de chaleur. Intensification des échanges thermiques* [BE 2 343]). À la limite, tout se passe comme si le flux échangé pour une même valeur de h croissait dans la même proportion que la surface mouillée. En fait, la situation n'est pas si favorable pour deux raisons :

- la section de passage A_t est réduite par l'encombrement des sections droites des ailettes dans le canal. Par ailleurs, ces mêmes ailettes augmentent la surface mouillée, donc le frottement visqueux. La vitesse du fluide décroît pour une même pression motrice, donc h également ;

- même si, augmentant la puissance des pompes, on rétablit la valeur de h , la proportionnalité du flux à la surface d'échange ne peut s'entendre que pour des matériaux de parois et d'ailettes à conductivité infinie. Comme ce n'est pas le cas en général, il faut introduire une correction par le biais de l'efficacité de l'ailette (à ne pas confondre avec l'efficacité de l'échangeur). On verra ainsi que de telles ailettes à conductivité pratiquement infinie existent : ce sont les caloducs. La description et l'étude des caloducs se trouvent dans l'article *Thermosiphons et caloducs* [BE 9 545]. En ce qui nous concerne, ces caloducs ne sont, en première approximation, que des ailettes particulières où $\lambda \rightarrow \infty$: elles sont donc considérées comme étant isothermes.

2.2.4 Conclusion du paragraphe

On peut connaître l'échange élémentaire si on connaît K , conséquence de la mécanique de l'écoulement puisqu'il ne dépend que des nombres de Reynolds des écoulements, des propriétés physiques des fluides et de la paroi. Seules restent inconnues les températures. Mais, en remontant d'une tranche à l'autre, on arrive aux extrémités de l'échangeur (entrées-sorties) où les températures sont réputées connues. On peut alors tout connaître.

3. Architecture générale de l'échangeur

L'échangeur possède deux aspects complémentaires : l'**aspect global**, caractérisé par les grandeurs aux entrées-sorties et l'**aspect local** caractérisé par le flux échangé au niveau d'une surface élémentaire. Ce flux est déterminé à partir des températures de mélange de chaque fluide, de leurs vitesses et des propriétés physiques des fluides et des matériaux. Il est également fonction de la géométrie de l'échangeur et de la façon dont les fluides s'écoulent l'un par rapport à l'autre.

3.1 Trois principales configurations d'écoulement

À l'intérieur du quadripôle précédemment défini, les fluides peuvent suivre des trajectoires complexes. Néanmoins, on peut distinguer trois types de configurations d'écoulement.

■ Écoulements co-courants

Dans cette configuration, les écoulements sont parallèles et de même sens. Une telle configuration peut être trouvée dans un échangeur coaxial ou dans certains échangeurs à plaques (figure 6).

Sur cette même figure, on a représenté l'évolution de la température de mélange en fonction de la distance x le long de l'échangeur de longueur L . On qualifie ce type de courbes de profil longitudinal des températures.

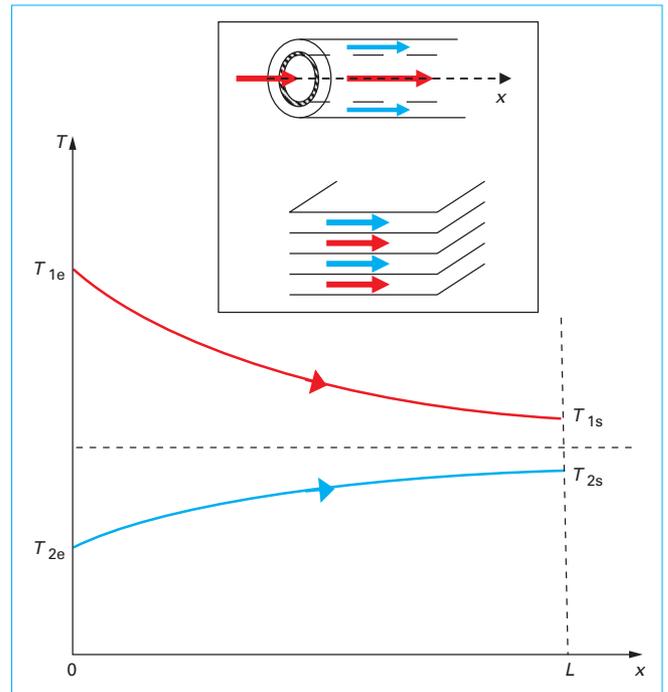


Figure 6 – Profil longitudinal de températures dans un échangeur co-courant

■ Écoulements à contre-courant

Dans cette configuration, les écoulements sont parallèles mais de sens opposés. C'est la configuration la plus efficace. Comme nous le démontrons plus loin les profils longitudinaux de températures dépendent des valeurs respectives des débits de capacité thermique \dot{C}_1 et \dot{C}_2 (figure 7).

■ Écoulements à courants croisés

Dans cette configuration, les écoulements sont perpendiculaires l'un à l'autre. Bien que moins efficace que la configuration à contre-courant, cette configuration est bien adaptée à certaines utilisations, dont l'exemple typique est le radiateur automobile représenté symboliquement figure 8. Dans ce radiateur, un écoulement d'air se propage perpendiculairement à un écoulement d'eau (ou eau glycolée) confiné dans de nombreux canaux.

On ne peut tracer un seul profil de températures puisque l'un des fluides s'écoule suivant z , l'autre suivant y . On identifie par n la position d'un plan perpendiculaire, n étant le nombre de plans perpendiculaires à l'écoulement d'air relativement aux tubes contenant le liquide ($1 \leq n \leq 4$ sur le croquis).

Sur les graphes d'évolution des températures, z varie de 0 (haut du radiateur) à H (bas du radiateur). Pour fixer les idées, on a indiqué le point M à mi-hauteur. On a admis que l'air arrivant sur la surface frontale du radiateur était isotherme quels que soient x et z .

3.2 Conséquences

Sur chaque profil représenté figures 6 et 7, on peut relever aisément la différence ΔT génératrice de l'échange local. Pour la configuration à courants croisés (figure 8), on a :

$$(\dot{C})_{\text{air}} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{air}} = (\dot{C})_{\text{eau}} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{eau}}$$

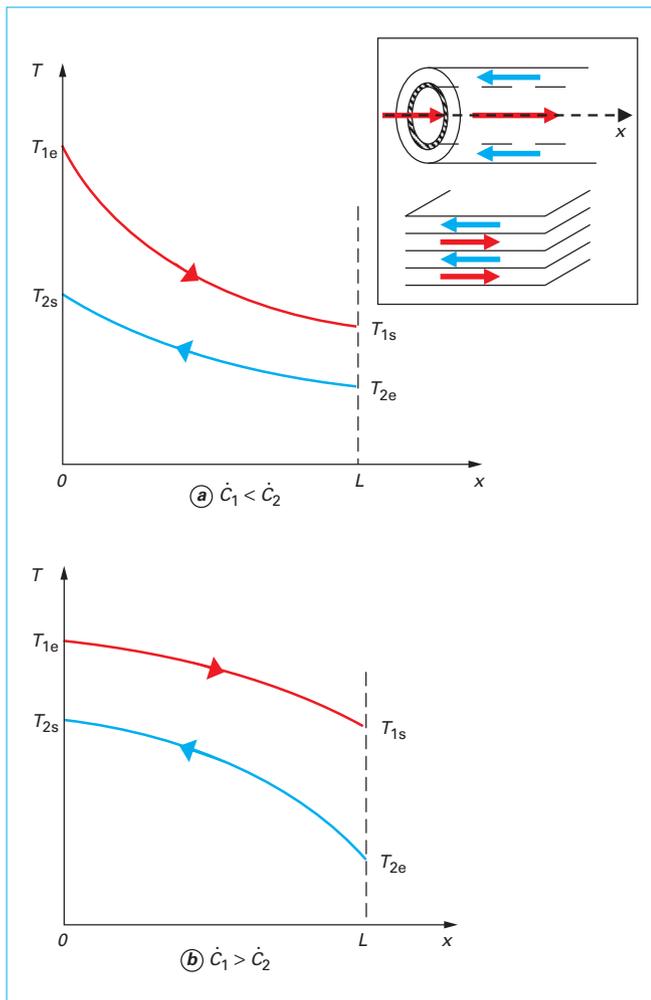


Figure 7 – Profil longitudinal de températures dans un échangeur contre-courant

On peut donc conclure, qu’avec les hypothèses habituelles et pour des fluides qui restent monophasiques, le rapport des pentes des courbes des températures des deux fluides en fonction de la distance parcourue par chacun des fluides (en z pour l’eau et y pour l’air) est une constante égale à l’inverse du rapport des débits de capacité thermique.

Cette remarque a des conséquences essentielles. Le concepteur d’un échangeur doit avoir, indépendamment des sujétions d’ordre technologique, trois soucis en tête :

- obtenir un bon coefficient d’échange global K ;
- obtenir des valeurs substantielles des débits de capacité thermique et si possible, voisines l’une de l’autre ;
- à défaut, le fluide à faible \dot{C} , surtout si le coefficient d’échange global est élevé, prend dès l’entrée une température voisine de l’autre fluide et l’échangeur n’échange plus rien (figure 9a). Il faut donc avoir des débits de capacité thermique voisins l’un de l’autre mais dont les valeurs restent cohérentes avec celles du coefficient d’échange ; à défaut, on a le cas de la figure 9b.

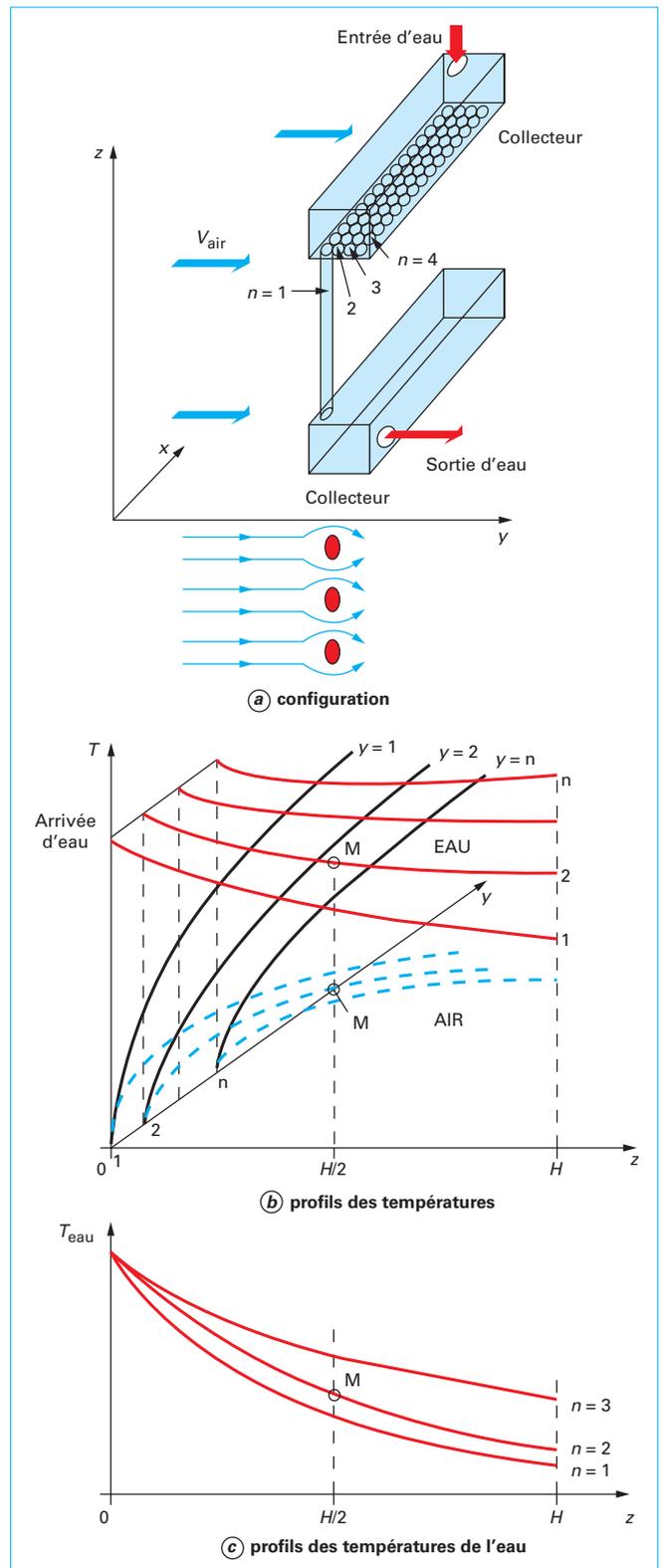


Figure 8 – Profils longitudinaux de températures dans un échangeur à courants croisés

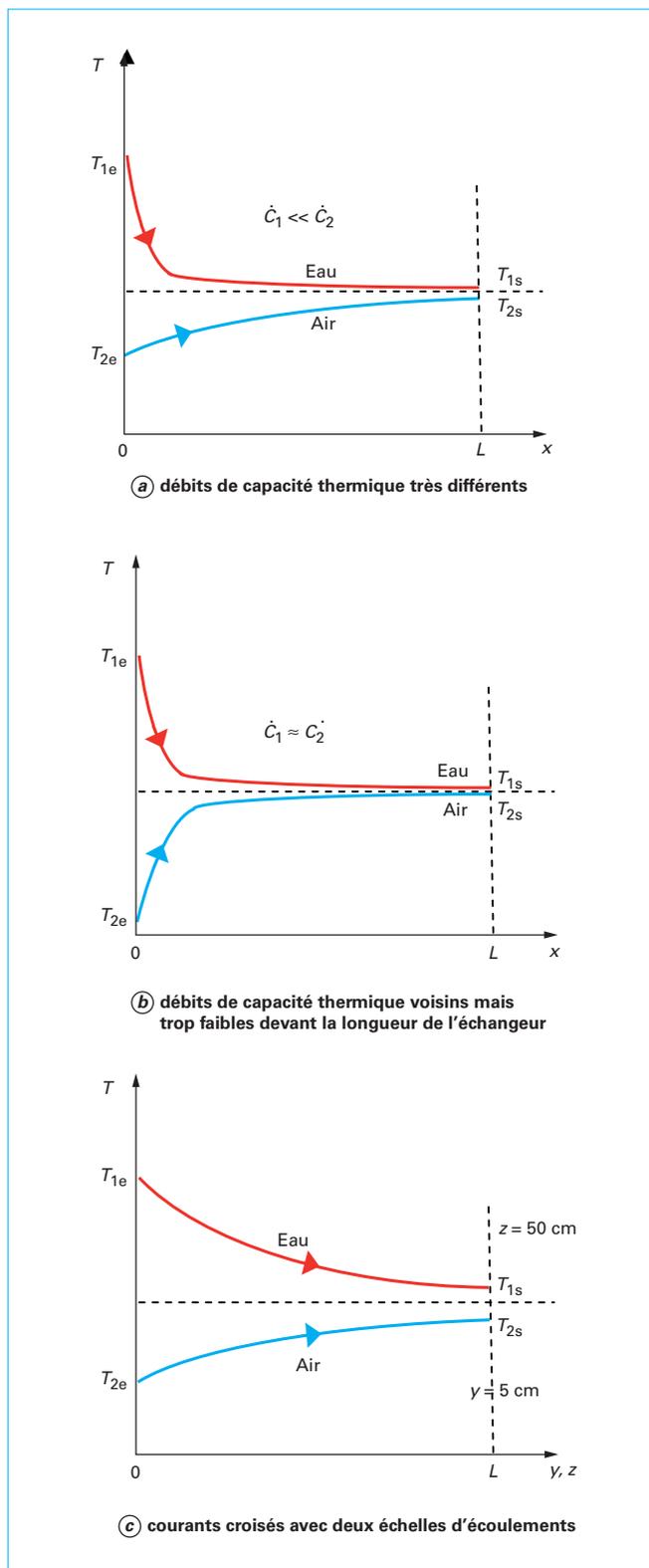


Figure 9 – Inconvénients des débits de capacité thermique non adaptés

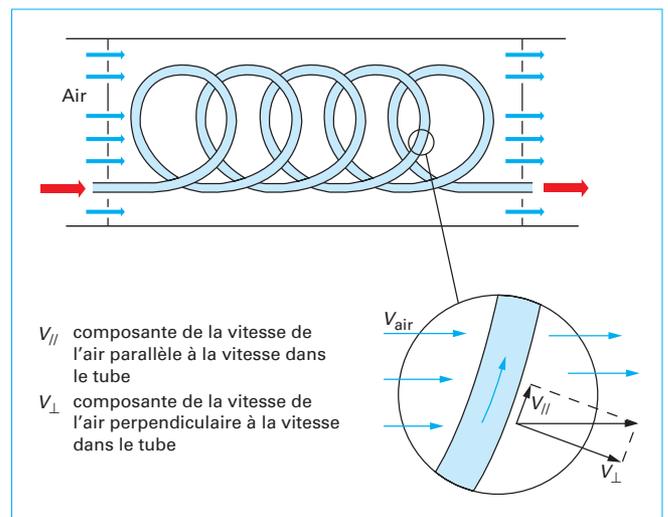


Figure 10 – Schéma d'un échangeur monotube en spirale

Si un des débits de capacité thermique ne peut être que très inférieur à l'autre, il est inutile d'augmenter le parcours correspondant. Des parcours très inégaux peuvent être obtenus pour des échangeurs à courants croisés. C'est la solution du radiateur (en fait, convecteur) d'automobile où le parcours de l'air est égal à l'épaisseur du radiateur, le parcours de l'eau étant quelque dix fois plus long (figure 9c) ; c'est aussi le cas d'un tube enroulé en spirale et placé à l'intérieur d'une calandre (figure 10).

3.3 Échangeur industriel : combinaison des trois configurations élémentaires

Les trois écoulements précédemment décrits (co-courant, contre-courant, courants croisés) sont rarement utilisés dans toute leur simplicité et l'on retrouve souvent une combinaison de ces écoulements élémentaires.

Par ailleurs, le concepteur a le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- les tubes, ce qui fixe l'espace dévolu à l'un des fluides. L'autre fluide peut être ou ne pas être confiné ;
- les plaques planes ou corruguées, les deux fluides s'écoulant au travers d'une même géométrie.

Le choix des combinaisons résulte souvent de contingences technologiques : par exemple des risques d'encrassement dans les tubes les font préférer rectilignes et parallèles, donc faciles à « ramoner » plutôt que spirales ou en U. Mais ce sont des propriétés plus fondamentales, intrinsèques, qui servent préférentiellement de référence aux considérations développées ci-après.

Un échangeur n'est que rarement constitué d'un tube unique ou de deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires est nécessaire, l'échangeur industriel étant en général constitué d'un grand nombre de tubes ou de plaques, créant ainsi des problèmes supplémentaires.

3.3.1 Tube ou canal unique

a – Dans certaines géométries, le compromis consiste à créer un écoulement extérieur au tube avec une composante parallèle à la direction d'écoulement du fluide dans le tube et une composante perpendiculaire (figure 10). Le tube en spirale réalise bien cette disposition où l'on est maître des deux composantes de la vitesse par le pas de l'hélice.

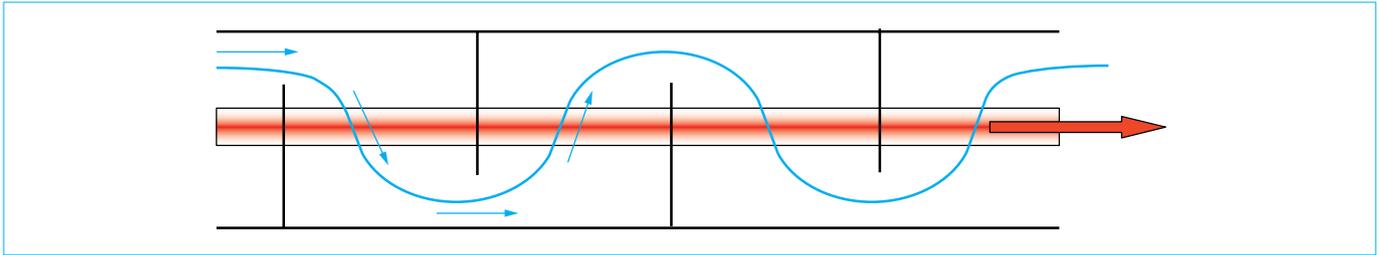


Figure 11 – Combinaison d'écoulements élémentaires : chicanes dans une virole (ou calandre)

b – De la même manière, c'est au fluide extérieur par rapport à un tube rectiligne que l'on peut imposer ces deux composantes de vitesse, l'emploi de chicanes dans l'espace intérieur de la virole autour d'un tube ou d'un faisceau de tubes rectilignes crée ces deux composantes (figure 11). Ces chicanes ont deux autres effets :

- augmenter la vitesse (au droit des sections réduites) ;
- maintenir mécaniquement les tubes de place en place, obligation technologique pour éviter les vibrations.

Déterminons ensuite quels sont les avantages et les inconvénients respectifs des **écoulements parallèles co-courant et contre-courant**. À égalité de vitesse et de caractéristiques du fluide, la valeur locale du coefficient d'échange global est inchangée puisque les deux coefficients d'échange h_1 et h_2 s'expriment uniquement à partir des propriétés thermophysiques et des caractéristiques de leur écoulement [5] [6] [7] [8] [9]. Il n'y a donc aucune différence sur le plan de ce que nous avons désigné échange élémentaire. Seules diffèrent les évolutions de T aux bornes du quadripôle. La simple vue des graphiques qualitatifs (figures 6 et 7) nous donne déjà quelques idées d'une comparaison qui ne peut être quantitative qu'après le développement des notions de Nombre d'unités de transfert (NUT) et d'efficacité.

Dans le cas d'un écoulement co-courant, la température maximale du fluide froid est toujours inférieure à celle minimale du fluide chaud. Dans le cas d'écoulement à contre-courant, il est fréquent que la température de sortie du fluide froid soit supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Sur le plan exergétique, on privilégie donc le contre-courant. On dit aussi que pour un même coefficient d'échange global, l'échangeur à contre-courant est plus efficace.

En revanche, l'évolution en fonction de x de la température de paroi est plus faible dans le cas de l'échangeur à co-courant que dans l'échangeur à contre-courant. C'est particulièrement évident dans le cas où $\dot{C}_1 = \dot{C}_2$ où l'isothermie de la paroi est même réalisée (figure 12).

Par ailleurs, les indications relatives à la comparaison co-courant et contre-courant sont identiques qu'il s'agisse de plaques ou de tubes, raison pour laquelle n'a pas été faite la distinction.

3.3.2 Faisceau de tubes ou de plaques

Le système de chicanes a, sur un faisceau de tubes, le même effet que sur un tube rectiligne unique provoquant pour le faisceau extérieur aux tubes une composante perpendiculaire ou une composante parallèle à l'écoulement intérieur.

L'augmentation de vitesse du fluide extérieur lors du passage dans les sections rétrécies provoquée par les chicanes n'est pas un avantage réel puisqu'en contrepartie on a une augmentation des pertes de pression. Consentir la même valeur pour ces pertes que pour une virole sans chicane permettrait d'augmenter la valeur globale de la vitesse, donc le transfert thermique (au travers du

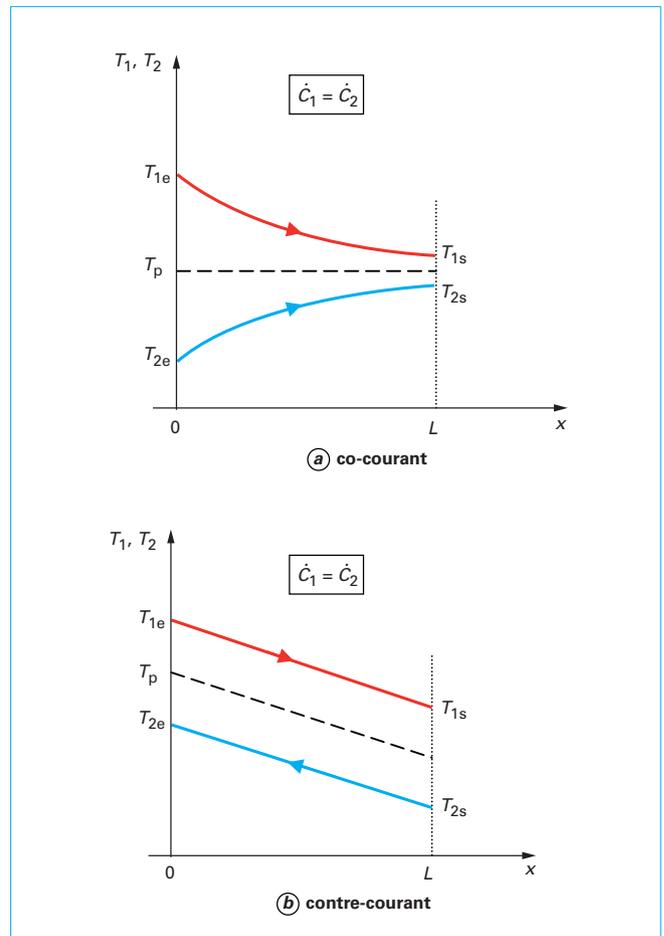


Figure 12 – Évolution de la température de paroi en fonction de x . Isothermie et anisothermie de la paroi quand $\dot{C}_1 = \dot{C}_2$

coefficient d'échange h) mais, sans doute, aux dépens de la compacité.

On peut néanmoins, à l'aide de tubes très serrés les uns contre les autres, créer une vitesse perpendiculaire à l'axe, en enroulant en hélice à l'extérieur de chaque tube un fil ou un ruban solidaire de ce tube. Le fluide est donc sollicité à parcourir également une hélice le long de la surface extérieure du tube. De plus, ces fils augmentent la turbulence et permettent la tenue mécanique de l'empilement du faisceau en évitant la courbure de l'axe d'un de ces tubes.

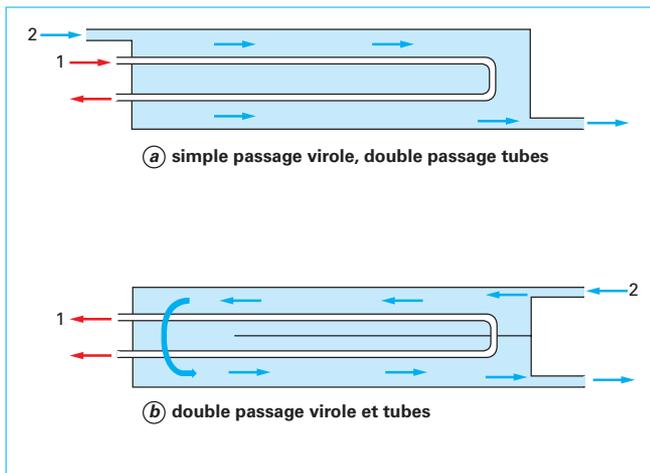


Figure 13 – Combinaison d'écoulements co-courant et contre-courant par des passages multiples d'un ou des fluides

On peut également envisager la combinaison d'écoulements parallèles au tube mais en réalisant l'écoulement côté virole tantôt dans le même sens que l'écoulement à l'intérieur des tubes, tantôt dans le sens contraire. On peut le faire soit par la réalisation de tubes en U (on parle alors d'un échangeur double passage tubes, figure 13a), soit par la division de l'écoulement dans la virole grâce à une cloison longitudinale laissant un passage à l'extrémité (double passage virole, figure 13b).

Bien entendu, de multiples combinaisons sont possibles et ces choix seront traités dans l'article *Échangeurs de chaleur Description* [BE 9 516].

3.3.3 Remarques

3.3.3.1 Instabilité locale de l'écoulement dans un faisceau de tubes ou de plaques en parallèle

L'alimentation se fait en général à l'aide de distributeurs ou collecteurs entre lesquels on établit une différence de pression motrice qui équilibre les pertes de pression. Dans une situation idéale, le débit est équiréparti entre les différents tubes ou paires de plaques (canaux) identiques.

Admettons qu'un incident quelconque rétrécisse le passage dans un tube ou entre deux plaques consécutives où circule le fluide 1 :

- exemple dans le cas d'échangeur à plaques d'une déformation accidentelle de deux plaques d'où un rétrécissement pour le fluide 1 (figure 14a) ;

- exemple dans le cas d'échangeur à tube à contre-courant d'un obstacle fortuit sur un des canaux du fluide 1 (figure 14b).

Admettons, pour fixer les idées, que dans les deux cas le fluide chaud se refroidisse de 0 à L . Comme la pression motrice $p_{1e} - p_{1s}$ ne change pas du fait de l'obstacle ou du rétrécissement d'un canal, le débit y diminue et le coefficient d'échange global décroît pour ce canal. Échangeant moins, le fluide y est en moyenne de 0 à L plus chaud.

Deux cas sont alors possibles :

- le fluide est un liquide ; la viscosité décroît avec la température, ce qui tend à augmenter le débit dans le canal perturbé, donc le coefficient d'échange h à $p_{1e} - p_{1s}$ constant : il y a compensation des effets entre la cause et la conséquence ;

- le fluide est un gaz ; la viscosité croît avec la température, le débit décroît donc h également. Le gaz reste plus chaud donc plus visqueux ? Bien que la conductivité thermique augmente avec T ,

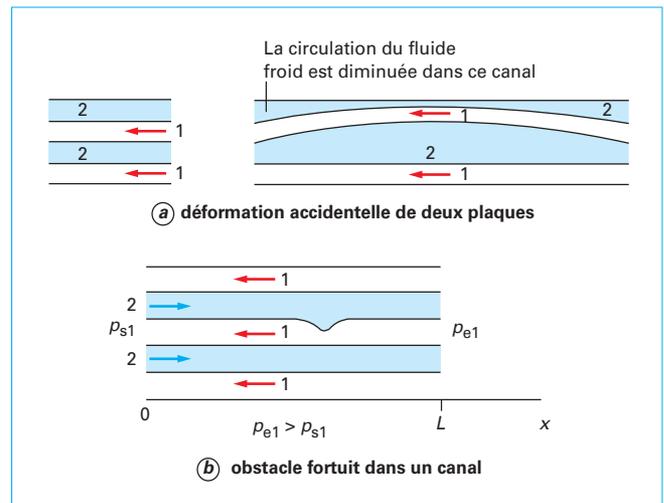


Figure 14 – Incidents entre deux plaques ou dans un tube

ceci ne compense pas cela et on risque une relaminarisation dans le tube en question, donc une diminution de l'échange thermique.

La répartition entre les canaux tend donc à conserver l'équirépartition des effets de chaque tube ou de chaque canal entre plaques pour un liquide chaud qui se refroidit ou un gaz froid qui se réchauffe. On doit examiner les conséquences du processus symétrique, surtout dans le cas où les canaux ou les tubes travaillent, du fait de la pression par exemple, dans des conditions proches des conditions limites.

3.3.3.2 Dissymétrie par convection naturelle

Cette remarque concerne principalement les échangeurs dont l'axe principal est horizontal. Elle présente plusieurs aspects :

1) À l'intérieur des tubes, dans des géométries présentant une symétrie (plaques parallèles ou symétrie de révolution), on a toujours supposé sans le dire explicitement, que profil de vitesse comme profil de température respectaient, eux aussi, la même symétrie.

Si le nombre de Reynolds est faible, la convection naturelle peut se superposer à la convection forcée. Les composantes verticales de vitesse portent le fluide le plus chaud vers les parois supérieures : les dilatations différentielles qui s'ensuivent peuvent déformer l'axe du tube ou l'axe médian du canal.

Des dispositifs de maintien (passage d'un tube dans un baffle) de la géométrie initiale doivent être prévus en conséquence, mais il est évident que ces contraintes contrarient celles des dilatations différentielles ne doivent nulle part dépasser la limite élastique des matériaux.

2) À l'extérieur des tubes, le même processus peut se produire dans l'espace dévolu à l'autre fluide. Si il n'y a rien de changé pour les appareils à plaques, pour les faisceaux de tubes, la hauteur sur laquelle le processus sévit est plus considérable (diamètre de la virole, en général) et la convection naturelle peut se développer. Comme par ailleurs les génératrices de cette virole n'ont aucun dispositif spécial pour les garder rectilignes, on risque des déformations d'ensemble très fâcheuses. On songe particulièrement à la convection naturelle lorsque la convection forcée n'est pas très intense, c'est-à-dire dans les périodes de démarrage et d'arrêt : quand on le peut, il est préférable de réaliser des écoulements hydrauliquement stationnaires ou voisins de l'être avant la mise en route thermique.

3) **Dissymétrie dans l'échangeur à tubes à courants croisés.** Le coefficient d'échange convectif local fluide 1/paroi varie beaucoup avec l'angle θ (figure 5) :

- si $h_1 < h_2$, il n'y a que demi-mal, le fluide 2 tend à homogénéiser la température de la paroi ;
- si $h_1 > h_2$, les dilatations différentielles risquent, là aussi, de déformer les tubes.

En revanche, la valeur de h moyennée sur θ de 0 à 360° est en générale meilleure que pour un écoulement parallèle au tube.

4. Relations entre les mesures aux entrées-sorties et le fonctionnement interne

Rappelons les grandeurs que l'on peut mesurer aux entrées – sorties, les caractéristiques physiques des deux fluides étant connues : ce sont les **quatre températures** et les **deux débits-masse**.

Les changements de phase éventuels sont déterminés par la variation du titre entre l'entrée et la sortie du (ou des) fluide(s) diphasiques(s). Le fonctionnement interne est caractérisé par le **coefficient d'échange global K** , dépendant lui-même des deux coefficients d'échange de chacun des fluides vis-à-vis de la paroi d'échange ainsi que de sa résistance conductive.

Nous allons définir les relations classiques entre les mesures aux bornes du quadripôle et son fonctionnement interne.

4.1 Hypothèse du coefficient d'échange global K constant

L'établissement des relations n'est simple qu'en passant par une hypothèse essentielle.

Le coefficient d'échange global K reste constant sur toute la longueur de l'échangeur.

4.1.1 Conditions nécessaires à l'hypothèse K constant

■ Échange radiatif faible

C'est le cas lorsque les écarts de températures ne sont pas trop élevés. Dans ce cas, cet échange peut être linéarisé et inclus dans le coefficient d'échange convectif. C'est le cas où l'échange convectif est dominant et s'y ajoute une correction toujours additive (et jamais soustractive).

Cette correction a déjà été signalée précédemment en écrivant $h = h_c + h_r$. Cependant, l'erreur commise n'est pas constante le long de l'échangeur. En effet, si le flux convectif varie en $(T_1 - T_p)(x)$, l'évolution du flux radiatif s'effectue suivant une puissance supérieure. Parfois, la linéarisation peut être admise sur une partie de l'échangeur seulement.

■ Section de passage de chaque fluide constante en x

Examinons sommairement les conséquences d'un exemple où ce n'est pas le cas. Pour un dièdre (plaques planes), le débit-masse, le nombre de Reynolds et le débit de capacité thermique restent constants. L'expression du nombre de Nusselt local est constante ; la valeur du coefficient d'échange convectif h est proportionnelle à l'inverse du diamètre hydraulique local. Comme le périmètre mouillé, la surface d'échange pour un même dx reste constante en x . L'échange avec la paroi décroît.

■ **Évolution des propriétés physiques en x ne changeant pas sensiblement les caractéristiques thermophysiques des fluides tout au long de l'écoulement.**

4.1.2 Cas où K risque de ne pas être constant

■ C'est par exemple le cas où les **propriétés physiques peuvent sensiblement varier** d'un point de l'échangeur à l'autre. Examinons les conséquences de ces variations.

Dans le cas général de l'écoulement turbulent, le coefficient d'échange est proportionnel à $\lambda^{0,67} \lambda^{-0,47}$. Deux cas peuvent se présenter :

- le fluide est un gaz. En admettant une croissance simultanée de λ et μ en $T^{0,6}$ le coefficient d'échange est alors proportionnel à $T^{0,12}$ (mesuré en K), ce qui est quasiment négligeable dans la plupart des cas ;
- le fluide est un liquide. Les lois habituelles peuvent se traduire par :

$$\mu = \exp\left(\frac{\text{Cte}}{T}\right)$$

Et si $\lambda \approx \text{Cte}$:

$$h = \exp\left(-\frac{\text{Cte}}{T}\right)^{-0,47}$$

Cela peut conduire à des variations substantielles avec la température pour peu que l'écart de températures entrée/sortie soit situé dans une zone où la viscosité varie beaucoup. Cela est particulièrement vrai lorsque la température est voisine de la température de changement d'état liquide-solide.

Cependant, le problème essentiel réside dans le cas, rare, où les variations de μ avec T peuvent conduire à un danger : la **relaminarisation de l'écoulement**. Turbulent à l'entrée, cet écoulement peut devenir laminaire vers la sortie si μ croît suffisamment : il s'ensuit une chute considérable du coefficient d'échange h et une augmentation concomitante de l'écart de température si l'échangeur fonctionne à flux surfacique constant. C'est ce qui risque de se produire dans un tube ou un canal pour un liquide qui se refroidit ou pour un gaz qui se réchauffe.

On remarque qu'il n'a pas été fait mention des variations des paramètres thermophysiques avec la pression. Pour un gaz, λ et μ sont indépendants (en première approximation). Pour un liquide, λ reste constant en première approximation ; seul μ augmente très lentement avec la pression p . Les cas où la pression intervient de manière notable sur h restent exceptionnels. L'énorme intérêt d'augmenter p pour un gaz est d'augmenter ρ , donc le débit de capacité thermique à débit-volume constant.

■ Le coefficient d'échange K peut ne pas être constant dans le **cas des échangeurs à écoulements diphasiques**. Cependant, dans les évaporateurs (bouilleurs) ou les condenseurs où l'un des deux fluides change d'état, la valeur du coefficient d'échange de ce fluide est si grande par rapport à celle du fluide qui ne change pas d'état qu'on peut considérer dans certaines conditions que le coefficient d'échange global est pratiquement égal au h du fluide qui ne change pas d'état.

■ Dans le cas particulier des **surchauffeurs de vapeur**, on peut s'attendre à de fortes variations, car la valeur de h est élevée quand la vapeur est voisine de la saturation à l'entrée et elle est médiocre quand la vapeur s'éloigne de la saturation et ne se distingue plus des gaz.

Quoi qu'il en soit, on peut toujours pour un calcul numérique, diviser l'échangeur en tronçons où on peut admettre que K est constant et raccorder les conditions de sortie d'un tronçon aux conditions d'entrée du suivant.

4.2 Grandeurs classiques définissant l'échangeur

4.2.1 Définitions des grandeurs d'entrée-sortie et notations utilisées

Les grandeurs afférentes au fluide chaud sont affectées de l'indice 1, celles afférentes au fluide froid de l'indice 2. Les grandeurs à l'entrée de l'échangeur sont affectées de l'indice e, à la sortie de l'indice s. Pour faciliter le travail, nous traitons de façon séparée les deux cas classiques d'écoulements co-courant et contre-courant.

Les débits-masse du fluide chaud et du fluide froid étant \dot{m}_1 et \dot{m}_2 respectivement, les débits de capacité thermique s'écrivent alors :

$$\dot{C}_1 = \dot{m}_1 c_{p1} = (A_t \rho V_q c_p)_1 \quad \text{et} \quad \dot{C}_2 = \dot{m}_2 c_{p2} = (A_t \rho V_q c_p)_2$$

On définit les rapports des débits de capacité thermique par :

$$R_1 = \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_2}$$

et :

$$R_2 = \frac{\dot{C}_2}{\dot{C}_1} = \frac{1}{R_1}$$

Les températures d'entrée et de sortie s'écrivent, pour le fluide chaud T_{1e} et T_{1s} et pour le fluide froid T_{2e} et T_{2s} . On appelle ΔT_1 et ΔT_2 les écarts de températures entrée/sortie des fluides chaud et froid respectivement, soit :

$$\Delta T_1 = T_{1e} - T_{1s} \quad \text{et} \quad \Delta T_2 = T_{2s} - T_{2e}$$

Les grandeurs utilisées sont résumées sur la figure 15.

Pour calculer les flux, il est nécessaire de définir un système thermodynamique pour lequel le flux entrant et le flux sortant sont positif ou négatif respectivement. Par exemple pour le fluide chaud, ce flux est négatif alors qu'il est positif pour le fluide froid. Nous utilisons, à titre de convention, les valeurs absolues des puissances quels que soit le fluide considéré et le sens du flux. Cela nous permet d'écrire le bilan thermique sous la forme :

$$\Phi = \dot{C}_1 \Delta T_1 = \dot{C}_2 \Delta T_2$$

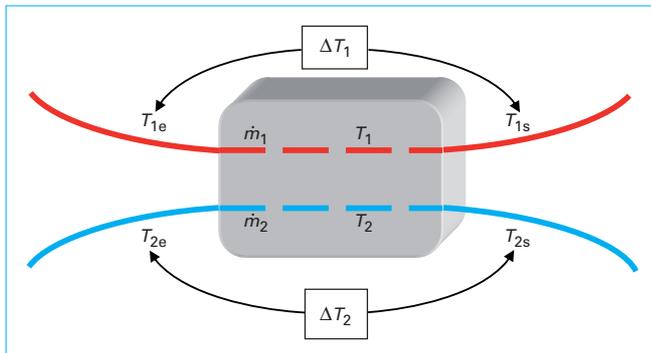


Figure 15 – Représentation schématique du quadripôle représentant un échangeur de chaleur. Notations utilisées

Rappelons que, pour une même position donnée des fluides à l'intérieur de l'échangeur, l'écart entre les températures de mélange T_1 et T_2 s'écrit :

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

4.2.2 Différence des températures de mélange moyenne logarithmique DTML

Si le coefficient d'échange global K est constant et que, par ailleurs, la surface d'échange croît linéairement en x (ou s) depuis l'entrée jusqu'à la sortie et en se limitant aux échangeurs à courants parallèles, pour fixer les idées, on peut écrire le flux total échangé sous la forme :

$$\Phi = K P_m \int_0^L \Delta T(x) dx$$

Pour alléger les calculs, il est intéressant d'utiliser une différence de températures moyennée sur toute la longueur L de l'échangeur et telle que :

$$\Phi = K P_m L \overline{\Delta T} = K A_\ell \overline{\Delta T}$$

avec A_ℓ surface d'échange.

Cela implique que le périmètre mouillé est indépendant de x et donc que le canal a une section constante. On peut calculer cette moyenne de façon exacte en écrivant de trois façons différentes le flux échangé au travers de la surface d'échange.

4.2.2.1 Échangeur co-courant

■ En se reportant à la figure 3, nous pouvons écrire le flux échangé au travers de la surface d'échange définie par l'élément dx :

$$d\Phi = -\dot{C}_1 dT_1$$

$$d\Phi = \dot{C}_2 dT_2$$

Et en soustrayant :

$$dT_1 - dT_2 = d[\Delta T(x)] = -d\Phi \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right)$$

Par ailleurs :

$$d\Phi = K P_m \Delta T(x) dx$$

D'où, en combinant ces deux dernières équations :

$$\frac{d\Delta T}{\Delta T} = - \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) K P_m dx$$

Et en intégrant de $x=0$ à $x=L$:

$$\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{(\Delta T)_{x=L}} = K A_\ell \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right)$$

avec $P_m L = A_\ell$.

Et comme par ailleurs :

$$\Phi = \dot{C}_1 (T_{1e} - T_{1s})$$

$$\Phi = \dot{C}_2 (T_{2s} - T_{2e})$$

on obtient :

$$(\Delta T)_{x=0} - (\Delta T)_{x=L} = \Phi \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right)$$

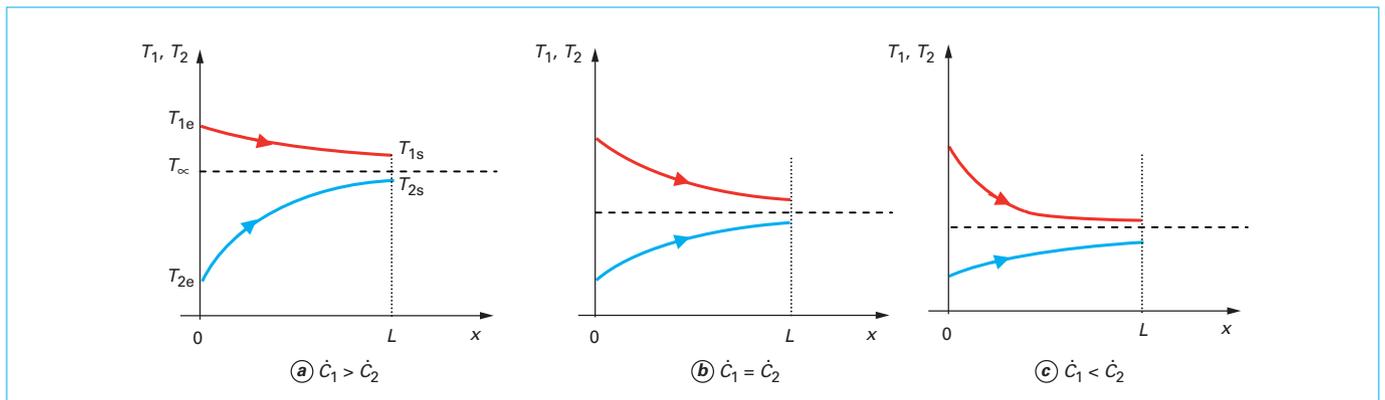


Figure 16 – Évolution qualitative des températures entre l'entrée et la sortie de l'échangeur à écoulements co-courant

Remplaçant $\left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2}\right)$ par son expression tirée de l'équation précédente, il vient :

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Phi}{K A_\ell} = \frac{(\Delta T)_{x=0} - (\Delta T)_{x=L}}{\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{(\Delta T)_{x=L}}} = \frac{(\Delta T)_0 - (\Delta T)_L}{\ln \frac{(\Delta T)_0}{(\Delta T)_L}} = \Delta T_{ML} = DTML$$

Un autre résultat important concerne l'évolution des températures. Intégrant de 0 à x , on obtient :

$$\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{\Delta T(x)} = K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x$$

Soit :

$$\Delta T(x) = (\Delta T)_{x=0} \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right]$$

L'écart des températures des deux fluides évolue de façon exponentielle. On peut en déduire l'évolution des températures de chaque fluide.

Pour le fluide chaud :

$$T_1(x) - T_{1e} = -\frac{T_{1e} - T_{2e}}{1 + R_1} \left[1 - \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right] \right]$$

et pour le fluide froid :

$$T_2(x) - T_{2e} = -\frac{T_{1e} - T_{2e}}{1 + R_2} \left[1 - \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right] \right]$$

On remarque que chaque courbe tend vers une asymptote commune lorsque $x \rightarrow +\infty$ (échangeur infini) :

$$T_{1\infty} = T_{2\infty} = T_\infty = \frac{T_{2e} + R_1 T_{1e}}{1 + R_1} = \frac{T_{1e} + R_2 T_{2e}}{1 + R_2}$$

Cette température n'est autre que la **température de mélange** des deux fluides que l'on obtiendrait en supprimant la paroi.

On voit que la forme des courbes d'évolution des températures ainsi que la position des asymptotes dépendent des rapports de débits de capacité thermique. Sur la figure 16, on montre qualitativement l'évolution des températures pour différentes valeurs

\dot{C}_1 et de \dot{C}_2 . On note la symétrie des courbes de part et d'autre de l'asymptote pour $\dot{C}_1 = \dot{C}_2$.

4.2.2.2 Échangeur contre-courant

Les raisonnements sont similaires à ceux effectués avec l'échangeur co-courant. Le flux échangé au travers de la surface d'échange définie par l'élément dx s'écrit :

$$d\Phi = -\dot{C}_1 dT_1$$

$$d\Phi = -\dot{C}_2 dT_2$$

Et en soustrayant :

$$dT_1 - dT_2 = d[\Delta T(x)] = -d\left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2}\right)$$

Utilisant la même méthode que précédemment, on obtient en intégrant de $x = 0$ à $x = L$:

$$\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{(\Delta T)_{x=L}} = K A_\ell \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right)$$

avec $P_m L = A_\ell$.

Et comme par ailleurs :

$$\Phi = \dot{C}_1 (T_{1e} - T_{1s}) = \dot{C}_1 \Delta T_1$$

$$\Phi = \dot{C}_2 (T_{2s} - T_{2e}) = \dot{C}_2 \Delta T_2$$

on obtient :

$$(\Delta T)_{x=0} = -(\Delta T)_{x=L} = \Phi \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right)$$

Remplaçant $\left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2}\right)$ par son expression tirée de l'équation précédente, il vient :

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Phi}{K A_\ell} = \frac{(\Delta T)_{x=0} - (\Delta T)_{x=L}}{\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{(\Delta T)_{x=L}}} = \frac{(\Delta T)_0 - (\Delta T)_L}{\ln \frac{(\Delta T)_0}{(\Delta T)_L}} = \Delta T_{ML} = DTML$$

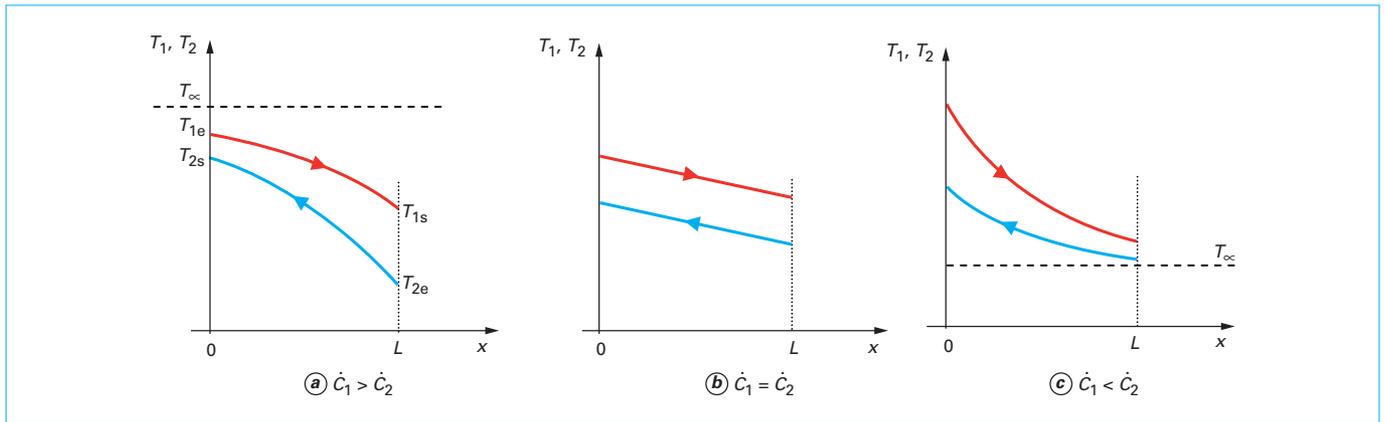


Figure 17 – Évolution qualitative des températures entre l'entrée et la sortie de l'échangeur à écoulements contre-courant

On obtient apparemment la même expression qu'avec des écoulements concourant mais avec une différence de taille concernant les ΔT :

– en co-courant :

$$(\Delta T)_{x=0} = (\Delta T)_0 = T_{1e} - T_{2e}$$

$$(\Delta T)_{x=L} = (\Delta T)_L = T_{1s} - T_{2s}$$

– en contre-courant

$$(\Delta T)_{x=0} = (\Delta T)_0 = T_{1e} - T_{2s}$$

$$(\Delta T)_{x=L} = (\Delta T)_L = T_{1s} - T_{2e}$$

En intégrant de 0 à x , l'évolution des températures s'écrit :

$$\ln \frac{(\Delta T)_{x=0}}{\Delta T(x)} = K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x$$

Soit :

$$\Delta T(x) = (\Delta T)_{x=0} \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right]$$

On voit que le signe de l'exposant de l'exponentielle dépend des valeurs respectives de \dot{C}_1 et de \dot{C}_2 . Il en est de même pour l'évolution des températures de chaque fluide :

$$T_1(x) = T_{1e} - \frac{T_{1e} - T_{2s}}{1 - R_1} \left[1 - \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right] \right]$$

$$T_2(x) = T_{2s} - \frac{T_{1e} - T_{2s}}{R_2 - 1} \left[1 - \exp \left[-K P_m \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right) x \right] \right]$$

Chaque courbe tend vers une asymptote commune dont l'expression est :

$$T_{1\infty} = T_{2\infty} = T_{\infty} = \frac{T_{2s} - R_1 T_{1e}}{1 - R_1}$$

Cette formule n'est valable que si $R_1 \neq 1$. Dans le cas contraire, l'évolution est linéaire et il n'y a pas d'asymptote.

On note que dans le cas contre-courant, les courbes d'évolution présentent des courbures opposées suivant les valeurs \dot{C}_1 et de \dot{C}_2 , (figure 17).

4.2.2.3 Autres types de configurations d'écoulements

Dans le cas où les écoulements ne sont pas parallèles (ni co-courant, ni contre-courant), on utilise encore cette notion de *DTML* pour calculer la puissance. On écrit alors :

$$\Phi = K A_{\ell} \overline{\Delta T}$$

Et l'on met la valeur moyenne de l'écart de température sous la forme :

$$\overline{\Delta T} = F \Delta T_{ML}$$

F est appelé facteur de correction du *DTML* et dépend de la configuration des écoulements. Il est soit calculé, soit déterminé à l'aide d'abaques (cf. article *Échangeurs de chaleur. Dimensionnement thermique* [BE 2 342]). Il est toujours compris entre 0 et 1.

Il est important de noter que dans tous les types d'écoulements autres que le co-courant, la différence de température moyenne logarithmique doit être calculée comme si l'échangeur était à contre-courant.

4.2.3 Efficacité et nombre d'unités de transfert *NUT*

La préoccupation du concepteur est, en général, d'obtenir la plus grande valeur possible du flux échangé. Considérant l'expression de ce flux :

$$\Phi = K A_{\ell} \overline{\Delta T}$$

à surface d'échange A_{ℓ} donnée, on dispose donc de deux possibilités.

■ Augmentation du coefficient d'échange global K

Ce coefficient d'échange dépend des coefficients d'échanges locaux h qui peuvent être calculés par :

$$h = \frac{Nu \lambda}{D_h}$$

Pour augmenter h , on voit que l'on peut :

– diminuer le diamètre hydraulique D_h . Mais cela conduit à une augmentation des pertes de charge et se fait donc au détriment des puissances nécessaires au pompage. Néanmoins, il conduit aussi à une diminution de la quantité de matériau nécessaire. C'est donc un choix technico-économique ;

– augmenter la conductivité thermique du fluide λ . Cependant, la conductivité thermique du fluide est souvent imposée (pour l'eau $\lambda \approx 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pour l'air à pression et température normale $\lambda \approx 0,024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Si le dispositif le permet, on peut choisir un métal liquide ou un nanofluide. Ce dernier est une suspension colloïdale de particules ayant une dimension de l'ordre du nanomètre. Il est toutefois nécessaire de vérifier que cette augmentation de la conductivité ne s'accompagne pas d'une augmentation trop importante de la viscosité.

■ Augmentation de la différence moyenne $\overline{\Delta T}$

Cet écart a une limite donnée par les asymptotes de la température dans l'échangeur ayant une longueur infinie. Cet échangeur permet d'obtenir la puissance maximale atteignable Φ_{\max} . Pour estimer les performances d'un échangeur de longueur finie, nous allons le faire par rapport à cette puissance Φ_{\max} .

4.2.3.1 Efficacité d'un échangeur

Si nous prenons comme imposés \dot{C}_1 et \dot{C}_2 , T_{1e} et T_{2e} , l'échangeur qui réduirait le plus possible l'écart de température entre l'entrée du fluide chaud et la sortie du fluide froid est l'échangeur de longueur infinie qui fonctionnerait avec les mêmes températures extrêmes T_{1e} et $T_{1s} = T_{2e}$.

En se reportant aux figures 16 et 17, on voit immédiatement que la puissance maximale atteignable s'écrit :

– si $\dot{C}_1 > \dot{C}_2$:

$$\Phi_{\max} = \dot{C}_2(T_{1e} - T_{2e}) = \dot{C}_2(\Delta T_{\max})$$

– si $\dot{C}_1 < \dot{C}_2$:

$$\Phi_{\max} = \dot{C}_1(T_{1e} - T_{2e}) = \dot{C}_1(\Delta T_{\max})$$

où $\Delta T_{\max} = T_{1e} - T_{2e}$ est l'écart de température qui correspond à l'échangeur de longueur infinie.

L'efficacité ε d'un échangeur est donc le rapport entre la puissance réelle Φ , échangée par l'échangeur de longueur L , et la puissance maximale Φ_{\max} pour un échangeur de longueur infinie.

Sachant que :

$$\Phi = \dot{C}_1 \Delta T_1 = \dot{C}_2 \Delta T_2$$

– si $\dot{C}_1 > \dot{C}_2$ ou $R_1 > 1$:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{\dot{C}_2(T_{2s} - T_{2e})}{\dot{C}_2(T_{1e} - T_{2e})} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}}$$

ou :

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}}$$

– si $\dot{C}_1 < \dot{C}_2$ ou $R_1 < 1$ et $R_2 > 1$:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{\dot{C}_1(T_{1e} - T_{1s})}{\dot{C}_1(T_{1e} - T_{2e})} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max}}$$

ou :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max}}$$

Pour déterminer la valeur de l'efficacité à l'aide d'une seule formule, on remarque que, si :

$$\dot{C}_1 > \dot{C}_2, \Delta T_1 < \Delta T_2 \text{ et si } \dot{C}_1 < \dot{C}_2, \Delta T_2 < \Delta T_1$$

On peut donc écrire :

$$\varepsilon = \frac{\max(\Delta T_1, \Delta T_2)}{\Delta T_{\max}}$$

ou :

$$\varepsilon = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$$

Le terme max signifiant que l'on prend la valeur maximale des deux grandeurs entre parenthèses.

Tenant compte des expressions des températures, déjà démontrées, on montre que :

– pour l'échangeur contre-courant :

$$\varepsilon \rightarrow 1 \text{ si } L \rightarrow \infty$$

– pour l'échangeur co-courant :

$$\varepsilon \rightarrow \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_1 + \dot{C}_2} \text{ si } L \rightarrow \infty$$

C'est donc l'échangeur contre-courant qui peut permettre d'obtenir l'efficacité la plus grande.

4.2.3.2 Nombre d'unités de transfert *NUT*

Reprenons l'expression de l'évolution des écarts de température.

■ Pour l'échangeur co-courant

$$\Delta T(x) = \Delta T_{x=0} \exp \left[-K A_\ell(x) \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) \right]$$

Cette équation peut être écrite sous la forme :

$$\Delta T(x) = \Delta T_{x=0} \exp \left[-\frac{K A_\ell(x)}{\dot{C}_1} \left(1 + \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_2} \right) \right] = \Delta T_{x=0} \exp \left[-\frac{K A_\ell(x)}{\dot{C}_1} (1 + R_1) \right]$$

On voit apparaître le terme :

$$\frac{K A_\ell(x)}{\dot{C}_1}$$

C'est un nombre sans dimension qui compare la puissance transférée à celle perdue par le fluide chaud pour un écart de un degré. On l'appelle le **nombre d'unités de transfert côté chaud**.

Soit pour tout l'échangeur de longueur L :

$$\Delta T(L) = \Delta T_{x=0} \exp [-NUT_1(1 + R_1)]$$

avec :

$$NUT_1 = \frac{K A_\ell}{\dot{C}_1}$$

On peut également écrire sous la forme :

$$\Delta T(x) = \Delta T_{x=0} \exp \left[- \frac{K A_\ell(x)}{\dot{C}_2} (1+R_2) \right]$$

Et l'on peut définir le **nombre d'unités de transfert côté froid**, soit pour la totalité de l'échangeur :

$$NUT_2 = \frac{K A_\ell}{\dot{C}_2}$$

■ **Pour l'échangeur contre-courant**, l'évolution de l'écart de températures s'écrit :

$$\Delta T(x) = \Delta T_{x=0} \exp \left[- K A_\ell(x) \left(\frac{1}{\dot{C}_1} - \frac{1}{\dot{C}_2} \right) \right]$$

Et l'on peut également introduire NUT_1 et NUT_2 :

$$\begin{aligned} \Delta T(L) &= \Delta T_{x=0} \exp [- NUT_1(1-R_1)] \\ \Delta T(L) &= \Delta T_{x=0} \exp [- NUT_2(R_2-1)] \end{aligned}$$

4.2.3.3 Relation entre efficacité et nombre d'unités de transfert

Les expressions des NUT peuvent être écrites en fonction des écarts de températures seuls. En effet, les bilans thermiques s'écrivent :

$$\Phi = \dot{C}_1 \Delta T_1 = \dot{C}_2 \Delta T_2 = K A_\ell \overline{\Delta T}$$

D'où :

$$NUT_1 = \frac{K A_\ell}{\dot{C}_1} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T}$$

Et, de la même façon :

$$NUT_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T}$$

Échangeur co-courant : tenant compte de l'expression des températures, il vient :

$$\begin{aligned} T_{1s} - T_{2s} &= \Delta T_{\max} \exp [- NUT_1(1+R_1)] \\ T_{1e} - T_{1s} &= \Delta T_1 = \frac{\Delta T_{\max}}{1+R_1} [1 - \exp (- NUT_1(1+R_1))] \end{aligned}$$

D'où :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max}} = \frac{1}{1+R_1} [1 - \exp (- NUT_1(1+R_1))]$$

À l'aide de calculs similaires, on voit que :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}} = \frac{1}{1+R_2} [1 - \exp (- NUT_2(1+R_2))]$$

Échangeur contre-courant : en suivant la même démarche, on trouve que :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max}} = \frac{1 - \exp [- NUT_1(1-R_1)]}{1 - R_1 \exp [- NUT_1(1-R_1)]} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}} = \frac{1 - \exp [- NUT_2(1-R_2)]}{1 - R_2 \exp [- NUT_2(1-R_2)]} \end{aligned}$$

avec $R_1, R_2 \neq 1$.

La valeur de l'efficacité en fonction du NUT peut être déterminée à l'aide d'une seule formulation qui tient compte des valeurs respectives de \dot{C}_1 et \dot{C}_2 .

Sachant que :

$$\varepsilon = \frac{\max(\Delta T_1, \Delta T_2)}{\Delta T_{\max}}$$

- Pour les écoulements co-courants :

$$\varepsilon = \frac{1}{1+R} [1 - \exp (- NUT (1+R))]$$

- Pour les écoulements contre-courant :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp (- NUT (1-R))}{1 - R \exp (- NUT (1-R))} \quad R \neq 1$$

ou, en prenant un développement limité au voisinage de $R = 1$:

$$\varepsilon = \frac{NUT}{NUT + 1} \quad R = 1$$

Dans ce cas, on a choisi :

$$R = \min(R_1, R_2) = \frac{\dot{C}_{\min}}{\dot{C}_{\max}}$$

et :

$$NUT = \max(NUT_1, NUT_2) = \frac{K A_\ell}{\dot{C}_{\min}}$$

Si l'on trace les courbes de l'efficacité en fonction du NUT (figure 18), on voit alors de façon évidente que pour un NUT donné, l'efficacité est meilleure dans le cas de l'échangeur contre-courant.

■ Cas particulier des évaporateurs (bouilleurs) et des condenseurs

Lorsqu'il se produit un changement de phase dans l'un des écoulements, le débit de capacité thermique maximal est, en théorie, infini. Le **rapport R est donc nul**. Dans ces conditions, on remarque que l'efficacité ne dépend plus de la configuration. Les formules déjà démontrées pour un échangeur co-courant et contre-courant conduisent à la même expression de l'efficacité, soit :

$$\varepsilon = 1 - \exp (- NUT)$$

Les évolutions des températures sont présentées sur la figure 19 et celle de l'efficacité en fonction du NUT sont celles pour $R = 0$ sur la figure 18.

5. Analyse énergétique globale

La comparaison d'un échangeur à un autre dépend du type de performances que l'on en attend (transfert de chaleur maximal, coût d'investissement minimal, coût de fonctionnement, poids, volume, puissance mécanique nécessaire, tenue à des conditions extrêmes, durée de vie...). De plus, on ne peut faire abstraction du procédé dans lequel l'échangeur est inclus et l'optimisation doit en tenir compte [10]. Nous nous limitons ici à la comparaison de la

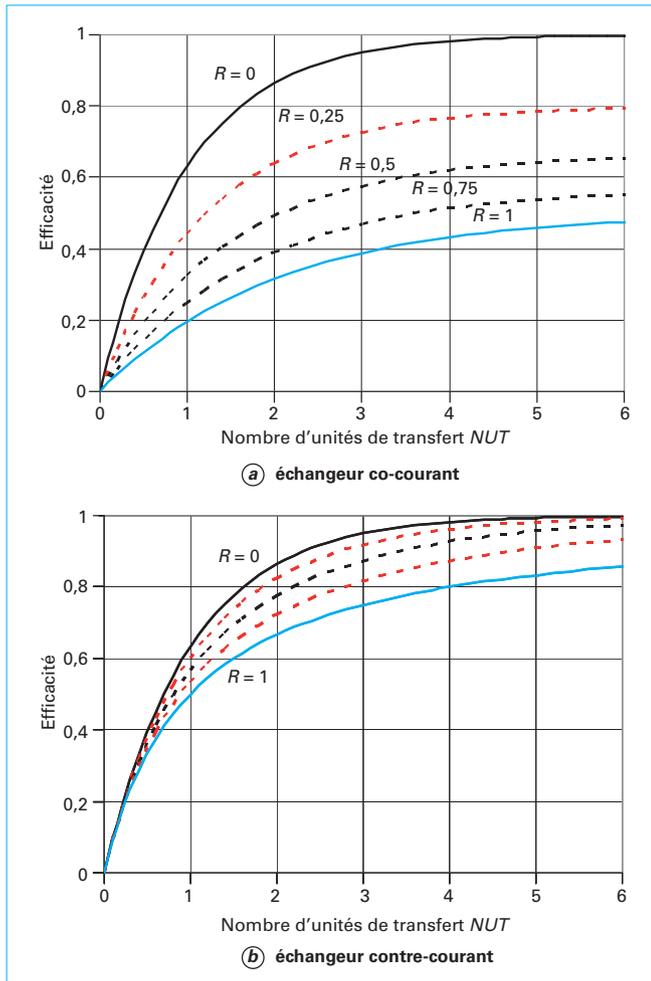


Figure 18 – Évolution de l'efficacité en fonction du nombre d'unité de transfert *NUT* pour différentes valeurs de *R*

puissance thermique transférée et de la puissance mécanique nécessaire à la circulation des fluides.

En effet, un échangeur dont le flux transféré (puissance thermique) est Φ , nécessite une puissance mécanique Φ_{meca} pour assurer le transfert de chaque fluide à travers l'échangeur. Cette puissance sert à vaincre les pertes de pression dans l'échangeur et peut être mise sous la forme :

$$\Phi_{meca} = \dot{Q}_v \Delta p$$

avec \dot{Q}_v débit-volume d'un des fluides,

Δp perte de pression par frottement de ce fluide dans l'échangeur.

Il convient de bien faire la distinction entre les pertes de pression irréversibles et les variations de pression dues, par exemple, aux variations de température. Ne considérant que la perte de pression par frottement, généralement prépondérante, celle-ci peut être mise sous la forme :

$$\Delta p = \sum_i \xi_i \frac{\rho_i V_i^2}{2}$$

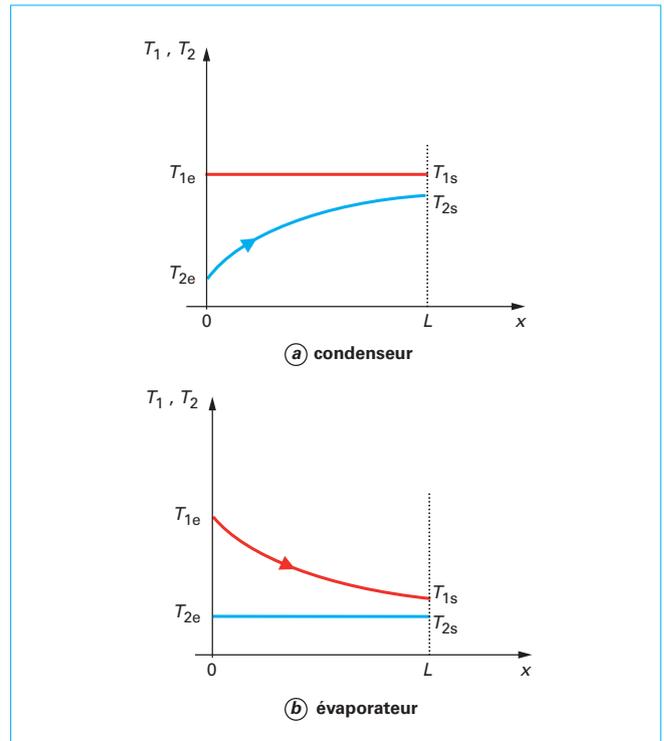


Figure 19 – Évolution des températures pour un condenseur et un évaporateur

L'échangeur étant partagé en plusieurs éléments *i* dans lesquels on peut définir un seul coefficient de frottement ξ_i et une vitesse débitante V_i . De nombreux exemples sont donnés dans l'ouvrage de Idel'ik [11] :

Nous définissons alors un **critère d'évaluation de performance énergétique CEPE** par :

$$CEPE = \frac{\Phi}{\Phi_{meca}}$$

En comparant deux échangeurs, on peut déterminer celui qui a le CEPE le plus élevé. Ce critère peut également être utilisé pour comparer deux échangeurs identiques mais utilisant des fluides différents [12].

6. Conclusions et perspectives

Dans cet article a été précisé le domaine que nous avons analysé. Nous avons montré la généralité de ce que nous avons appelé un échangeur de chaleur et nous avons restreint ce domaine à l'ensemble des échangeurs de chaleur à deux fluides à l'état stationnaire. Les notions de débit de capacité thermique, de différence de température moyenne logarithmique (DTML), d'efficacité, de nombre d'unités de transfert (NUT), de coefficient d'échange thermique global ont été précisées. On a décrit les deux configurations de base des écoulements (co-courant et contre-courant). On a souligné que la configuration contre-courant servira de configuration de référence pour le dimensionnement d'échangeurs ayant d'autres configurations. Un récapitulatif des principales définitions est donné tableau 2.

Tableau 2 – Récapitulatif des grandeurs de base

Définition	Échangeur co-courant	Échangeur contre-courant
Différence de température moyenne logarithmique DTML $\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_{x=0} - \Delta T_{x=L}}{\ln \frac{\Delta T_{x=0}}{\Delta T_{x=L}}}$	$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{1e} - T_{2e}) - (T_{1s} - T_{2s})}{\ln \frac{(T_{1e} - T_{2e})}{(T_{1s} - T_{2s})}}$	$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{1e} - T_{2s}) - (T_{1s} - T_{2e})}{\ln \frac{(T_{1e} - T_{2s})}{(T_{1s} - T_{2e})}}$
Rapports des débits de capacité thermique	$R_1 = \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_2}; \quad R_2 = \frac{\dot{C}_2}{\dot{C}_1} = \frac{1}{R_1}$ $R = \min(R_1, R_2) = \frac{\dot{C}_{\min}}{\dot{C}_{\max}}$	
Efficacités $\varepsilon_1 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}}$ $\varepsilon_2 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max}}$ $\varepsilon = \frac{\max(\Delta T_1, \Delta T_2)}{\Delta T_{\max}}$	$\varepsilon_1 = \frac{[1 - \exp(-NUT_1(1+R_1))]}{1+R_1}$ $\varepsilon_2 = \frac{[1 - \exp(-NUT_2(1+R_2))]}{1+R_2}$ $\varepsilon = \frac{[1 - \exp(-NUT(1+R))]}{1+R}$	$\varepsilon_1 = \frac{1 - \exp(-NUT_1(1-R_1))}{1 - R_1 \exp(-NUT_1(1-R_1))}$ $R_1 \neq 1$ $\varepsilon_2 = \frac{1 - \exp(-NUT_2(1-R_2))}{1 - R_2 \exp(-NUT_2(1-R_2))}$ $R_2 \neq 1$ $\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1-R))}{1 - R \exp(-NUT(1-R))}$ $R \neq 1$ $\varepsilon = \frac{NUT}{NUT+1}$ $R = 1$
Nombre d'unités de transfert NUT $NUT_1 = \frac{KA_\ell}{\dot{C}_1}$ $NUT_2 = \frac{KA_\ell}{\dot{C}_2}$ $NUT = \frac{KA_\ell}{\dot{C}_{\min}}$	$NUT = \frac{1}{1+R} \ln \left[\frac{1}{1-\varepsilon(1+R)} \right]$	$NUT = \frac{1}{1-R} \ln \left[\frac{1-R\varepsilon}{1-\varepsilon} \right]$ $R \neq 1$ $NUT = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$ $R = 1$

L'exploitation du schéma ici développé sera donnée dans l'article *Échangeurs de chaleur. Dimensionnement thermique* [B 2 342] (tant analytique que numérique). Ce schéma s'adapte bien à tous les fluides monophasiques quelle que soit la nature de ces fluides et de la paroi commune. La nature de cette paroi est dictée non seulement par ses propriétés thermiques (conductivité thermique en particulier) mais aussi par des considérations technologiques : pression, mouillabilité, corrosion, vibrations, compatibilité biologique, tenue mécanique... Quant aux fluides, on a considéré qu'ils étaient

newtoniens et complètement transparents ou complètement opaques en regard des longueurs d'onde des émissions radiatives qui peuvent intervenir de manière énergétiquement notable.

En effet, le traitement classique n'est pas très bien adapté à la prise en compte des **transferts radiatifs** et cette difficulté ne doit pas les faire considérer systématiquement comme négligeables. Ils interviennent dans le cas de particules solides transportées par des fluides non opaques, par exemple, pour des températures

assez élevées. Cependant, cet effet radiatif est à comptabiliser pour des gaz, même sans particules, s'ils sont actifs dans l'infrarouge. C'est le cas des gaz constitués de molécules non symétriques comme le CO_2 , CO ou H_2O (présents dans les fumées de combustion) contrairement aux gaz monoatomiques ou diatomiques ayant des molécules symétriques (N_2 , O_2 et par conséquent l'air).

Si la prise en compte des processus convecto-radiatifs est malaisée, l'extension de la théorie élémentaire des échangeurs aux **écoulements diphasiques** l'est moins. La notion de débit de capacité thermique perd son sens puisqu'un transfert d'énergie thermique vers ou à partir d'un écoulement diphasique ne modifie pas la température mais seulement le titre en vapeur (en se limitant à des fluides purs ou à des mélanges zéotropes). Dans la fraction de l'échangeur où l'un des fluides est diphasique, le débit d'enthalpie ne s'écrit plus uniquement $\dot{m}c_p T$ mais on doit utiliser directement l'expression $\dot{m}H_{sp}$, où H_{sp} est l'enthalpie spécifique, sans que soit modifié le traitement conceptuel. On doit tenir compte de deux particularités :

- la connaissance de l'enthalpie de changement d'état du fluide est indispensable ;
- le coefficient d'échange du fluide vis-à-vis de la paroi croît en général par rapport à la valeur en monophasique. Pour avoir un ordre de grandeur, on peut même parfois considérer que la valeur du h correspondant tend vers l'infini vis-à-vis du h pour l'autre fluide et dans certaines conditions.

Les deux catégories d'appareils, évaporateurs et condenseurs, entrent bien dans la rubrique échangeurs.

On rappelle l'existence des échangeurs non conventionnels suivants :

- **échangeurs à lits fluidisés** ;
- **échangeurs à contact direct** (contact entre deux fluides non miscibles comme dans le cas des tours aéroréfrigérantes ou bien contact fluide-paroi dans le cas des régénérateurs) ;
- **échangeurs à fluides complexes**, si l'on désigne par là un liquide véhiculant des particules solides (fréquents dans l'industrie agroalimentaire).

L'intérêt grandissant porté à l'efficacité énergétique et au stockage de l'énergie fait apparaître des appareils de conceptions diverses selon le type d'énergie que l'on souhaite accumuler. Le développement de certains de ces appareils n'a pas encore atteint sa maturité mais leur point commun est de fonctionner en régime transitoire.

Les **régénérateurs**, du type à plateau tournant ou du type « *cowper* » de haut-fourneau, n'ont plus grand-chose à voir avec les échangeurs classiques : ils fonctionnent exclusivement en régime transitoire sur une durée de quelques heures et les transferts radiatifs sont en général très substantiels et déséquilibrés entre la phase de stockage d'énergie par des fumées actives en infrarouge et celle de déstockage vers de l'air lors de laquelle l'apport radiatif est nul. Les phénomènes thermiques qui y règnent sont donc la conduction solide en régime transitoire, la convection fluide/paroi et le transfert radiatif solide/milieux semi-transparents. L'usage classant, cependant, ces appareils comme des échangeurs, ils sont traités dans l'article *Échangeurs de chaleur. Description* [BE 9 516].

Les **échangeurs de stockage de chaleur** voient leur développement accéléré par les nombreux projets de stockage d'énergie solaire qui sont en cours. Un fluide chauffé par la source que l'on cherche à valoriser échange avec un matériau que l'on choisit souvent pour sa haute capacité calorifique. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont particulièrement adaptés à cette fonction du fait de leur enthalpie élevée de fusion/solidification. Ces matériaux ont par contre souvent une conductivité thermique modeste de sorte que des solutions d'intensification des échanges thermique doivent être recherchées.

Concernant le stockage d'hydrogène, des réservoirs de taille industrielle font leur apparition sur le principe d'un stockage solide par absorption sur des hydrures métalliques, par exemple de magnésium. Là encore, la faible conductivité thermique des hydrures amène à concevoir les réservoirs de stockage d'hydrogène comme des échangeurs de chaleur. Le temps de chargement/déchargement de ces réservoirs est très dépendant de la situation : si l'hydrogène est produit par un électrolyseur alimenté par des panneaux photovoltaïques, le cycle de chargement est de l'ordre de 6 h tandis qu'une source éolienne conduit à des temps plus longs. Le temps de décharge est lui aussi très lié à l'utilisation, pouvant inclure une pile à combustible ou un moteur à combustion alimenté en hydrogène.

Pour les applications qui viennent d'être citées, la qualité des échanges thermiques est le facteur déterminant du calcul du temps de stockage ou de déstockage des appareils concernés. Une attention particulière doit donc être portée à la qualité et à la technologie des échanges de chaleur qui sont mis en œuvre.

Parmi les objectifs d'un concepteur, l'obtention de la puissance échangée maximale pour un coût minimal constitue sans doute le principal. Deux types de méthodes sont employés et/ou sont en cours de développement pour intensifier les échanges thermiques : les méthodes passives et les méthodes actives. Une revue déjà ancienne peut être trouvée dans la référence [13].

Dans les **méthodes passives**, on ne fournit pas d'énergie extérieure supplémentaire (autre que celle fournie par les pompes ou les ventilateurs qui augmente si la méthode utilisée augmente les pertes de pression). L'intensification des échanges fluide/paroi se fait par l'intermédiaire de systèmes à ailettes, d'aspérités, de corrugations, de turbulateurs, d'exploitation systématique du régime d'établissement de l'écoulement... (voir article *Échangeurs de chaleur. Intensification des échanges thermiques* [B 2 343]).

L'augmentation délibérée d'une des surfaces, celle pour laquelle le coefficient d'échange convectif est le plus faible, fait partie des moyens utilisés pour intensifier les échanges thermiques. Les caloducs peuvent constituer une extension de la surface intéressante pour la réalisation d'ailettes longues puisque leur conductivité équivalente est quasiment infinie par rapport à celle d'un solide.

Dans certains procédés d'intensification, on modifie la nature ou le trajet des écoulements. On peut ainsi créer un jet qui frappe la surface d'échange et qui produit alors une augmentation substantielle de coefficient d'échange. On peut également trouver une géométrie de l'échangeur ou un dispositif à l'entrée de l'échangeur qui permet d'alimenter correctement tous les canaux.

Une autre direction de développement est, si le procédé le permet, de choisir ou de fabriquer un fluide de forte conductivité thermique, par exemple en utilisant un métal liquide [14] [15] ou un nanofluide [12] [16]. Dans ce dernier cas, se pose le problème de la stabilité du fluide.

Le deuxième type de méthodes concerne les **méthodes actives**. Dans certains cas, on peut utiliser des actionneurs mécaniques ou électromécaniques pour diriger les écoulements là où la géométrie de l'échangeur tend à ce que certaines parties ne soient pas correctement alimentées pour certains régimes de fonctionnement. Une autre méthode en plein développement concerne l'utilisation d'ultrasons pour faire vibrer la surface d'échange de façon à briser la couche limite près de la surface [17].

Cet article doit être considéré comme une introduction à d'autres articles sur les échangeurs de chaleur qui concernent leur technologie, leur dimensionnement et leur fonctionnement. Les définitions données dans cet article sont utilisées et les notions développées ici, approfondies.

Échangeurs de chaleur

Définitions et principes généraux

par **André BONTEMPS**

Professeur émérite
Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (LEGI)
Universités Joseph Fourier, Grenoble, France

Sources bibliographiques

- [1] SHAH (R.K.) et SEKULIC (D.P.). – *Fundamentals of heat exchanger design*. Wiley & sons, Hoboken, New Jersey, USA, 941 p. (2003).
- [2] KUPPAN (T.). – *Heat exchanger design handbook*. CRC Press, Taylor & Francis group, 1 119 p. (2000).
- [3] KAKAC (S.), LIU (H.) et PRAMUANJAROENKIJ (A.). – *Heat exchangers. Selection, rating, and thermal design*. CRC Press, Taylor & Francis group, 615 p. (2012).
- [4] ANXIONNAZ (Z.), CABASSUD (M.), GOURDON (C.) et TOCHON (P.). – *Heat exchangers/reactors (HEX reactors): concepts, technologies: State-of-the-art*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47, p. 2029-2050 (2008).
- [5] SACADURA (J.-F.). – *Initiation aux transferts thermiques*. Tech & Doc/Lavoisier, Paris, 442 p. (1993).
- [6] INCROPERA (F.P.), DeWITT (D.P.), BERGMAN (T.L.) et LAVINE (A.S.). – *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6^e éd., Wiley & sons, 1 024 p. (2007).
- [7] MILLS (A.F.). – *Heat transfer*. Prentice Hall, 954 p. (1998).
- [8] PADET (J.). – *Principes des transferts convectifs*. Polytechnica, Paris, 269 p. (1997).
- [9] BEJAN (A.). – *Convection heat transfer*. Wiley & sons, New York, 623 p. (1995).
- [10] FEIDT (M.). – *Énergétique. Thermodynamique – Concepts et applications*. Dunod, Paris, 976 p. (2006).
- [11] IDEL'CIK (I.E.). – *Mémento des pertes de charge*. Eyrolles, 494 p. (1986).
- [12] FERROUILLAT (S.), BONTEMPS (A.), RIBEIRO (J.-P.), GRUSS (J.A.) et SORIANO (O.). – *Hydraulic and heat transfer study of SiO₂/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions*. Int. J. Heat Fluid Flow, 32, p. 424-439 (2011).
- [13] BERGLES (A.E.). – *Survey and evaluation of techniques to augment convective heat and mass transfer*. Progress in Heat and Mass Transfer, vol. 1, p. 331-424 (1969).
- [14] SCHUMACHER (K.B.). – *Liquid metal heat exchangers*. Journal of the American Society of Naval Engineers, vol. 72, p. 779-782 (1960).
- [15] ZEIGARNIK (Y.A.). – *Liquid metal heat transfer*. Thermopedia, DOI 1615 (2013) <http://www.thermopedia.com>
- [16] CHOI (S.U.S.). – *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, development and applications of non-newtonian flows*. Eds SIGINER (D.A.) and WANG (H.P.), The American Society of American Engineers, New York, FED vol. 231/MD vol. 66, p. 99-105 (1995).
- [17] LEGAY (M.), GONDREXON (N.), LE PERSON (S.), BOLDO (P.) et BONTEMPS (A.). – *Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances*. International Journal of Chemical Engineering, Article ID 670108, 17 p. (2011).

À lire également dans nos bases

- DEGIOVANNI (A.). – *Transmission de l'énergie thermique. Conduction*. [BE 8 200] (1999).
- DEGIOVANNI (A.). – *Transmission de l'énergie thermique. Conduction*. [BE 8 200v2] (2008).
- PADET (J.). – *Convection thermique et massique. Principes généraux*. [BE 8 205] (2005).
- PADET (J.). – *Convection thermique et massique. Partie 1: Nombre de Nusselt*. [BE 8 206] (2005).
- PADET (J.). – *Convection thermique et massique. Partie 2: Nombre de Nusselt*. [BE 8 207] (2005).
- MATTEI (S.). – *Rayonnement thermique des matériaux opaques*. [BE 8 210] (2005).
- BONJOUR (J.), LEFÈVRE (F.), SARTRE (V.), BERTIN (Y.), ROMESTANT (C.), AYEL (V.) et PLATEL (V.). – *Systèmes diphasiques de contrôle thermique. Thermosiphons et caloducs*. [BE 9 545] (2010).
- LALLEMAND (M.). – *Transferts en changement de phase. Ébullition libre*. [BE 8 235] (2005).
- LALLEMAND (M.). – *Transferts en changement de phase. Ébullition convective*. [BE 8 236] (2006).
- PANDAY (P.). – *Transferts en changement de phase. Condensation sur des surfaces lisses*. [BE 8 238] (2006).
- PANDAY (P.). – *Transferts en changement de phase. Condensation en situations particulières*. [BE 8 239] (2006).
- BANDELIER (P.), CANEY (N.) et MINVIELLE (Z.). – *Échangeurs de chaleur. Intensification des échanges*. [BE 9 518] (2014).
- CLEMENT (P.). – *Échangeurs de chaleur. Problèmes de fonctionnement*. [BE 9 519] (2014).

Supports numériques

Bvents
<http://www.bvents.com/fr/>

Conference alerts
<http://www.conferencealerts.com/>

BaseAcademic resources
<http://www.ourglocal.com/>

All conferences
<http://www.allconferences.com/>

Events & Conference directory
<http://events.einnews.com/>

Base de données Fridoc (domaine du froid)
<http://www.iifir.org/>

ÉCHANGEURS DE CHALEUR

Manuel technique GRETh (fiches de calcul, base dataphy)
<http://www.greth.fr/>

ProSim (propriétés thermodynamiques et simulation de procédés)
<http://www.prosim.net/fr/logiciels-simulis-thermodynamics-3.php>

Événements

Interclima
<http://www.interclimaelec.com/>

Batimat
<http://www.batimat.com/>

Pollutec
<http://www.pollutec.com/>

Energy Hannover
<http://www.hannovermesse.de/en/about-the-trade-show/program/tradeshows-lineup/energy>

WTT Karlsruhe (Fahrmesse für Industrielle Wärme – und Kältetechnik)
<http://www.wtt-expo.com/de/home/homepage.jsp>

International conference on Thermal Engineering (tous les ans)

International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology (tous les deux ans)

ASME/JSME Thermal Engineering joint conference (tous les quatre ans)

Annuaire

Organismes – Fédérations – Associations

(liste non exhaustive)

ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<http://www.ademe.fr/>

AFF - Association Française du Froid
http://www.association-francaise-du-froid.fr/role_missions.php

CEA – Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
<http://www.cea.fr/>

CETIAT - Centre Technique des Industries Aérouniques et Thermiques
<http://www.cetiat.fr/>

CETIM - Centre Technique des Industries Mécaniques
<http://www.cetim.fr/>

IIF/IIR – Institut International du Froid
<http://www.iifiir.org/medias/>

INES – Institut National de l'Energie Solaire
<http://www.ines-solaire.com/plandusite.htm>

IRSTEA - Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
<http://www.irstea.fr/>

AICVF – Association des Ingénieurs en Climatologie, Ventilation et Froid
<http://aicvf.org/>

AspenTech : HTFS
<http://htfs.aspentech.com/>

GRETh - Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques
<http://www.greth.fr/>

HTRI - Heat Transfer Research, Inc.
<http://www.htri.net/>

UNICLIMA - Syndicat des Industries Thermiques, Aérouniques et Frigorifiques
<http://www.uniclima.fr/>

ThermalFluids Central - Global Digital Central
<https://www.thermalfluidscentral.org/>

Documentation - Formation – Séminaires

(liste non exhaustive)

Journaux scientifiques: transferts de chaleur et de masse

Chemical Engineering & Technology (Wiley-VCH)

AIChE Journal (AIChE)

Applied Thermal Engineering (Elsevier)

Chemical Engineering and Processing: Process Intensification (Elsevier)

Chemical Engineering Journal (Elsevier)

Experimental Heat Transfer (Taylor & Francis)

Experimental Thermal and Fluid Science (Elsevier)

Frontiers in Heat and Mass Transfer (Global Digital Central)

Heat and Mass Transfer (Springer)

Heat Transfer Engineering (Taylor & Francis)

Heat Transfer Research (Begell House)

Internal Journal of Thermal Sciences (Elsevier)

International Communications in Heat and Mass Transfer (Elsevier)

International Journal of Heat and Fluid Flow (Elsevier)

International Journal of Heat and Mass Transfer (Elsevier)

International Journal of Sustainable Energy (Taylor & Francis)

International Journal of Transport Phenomena (OCP Science)

Journal of Enhanced Heat Transfer (Begell House)

Journal of Heat Transfer (ASME Digital Library)

Journal of Porous Media (Begell House)

Journal of Thermal Science and Engineering Applications (ASME)

Journal of Thermal Science and Technology (JSME)

Journal of Thermal Stresses (Taylor & Francis)

Journal of Thermophysics and Heat Transfer (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA))

Numerical Heat Transfer, Part A Applications (Taylor & Francis)

Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals (Taylor & Francis)

Transport in Porous Media (Springer Netherlands)

Revue d'informations techniques

Revue Générale du Froid et du Conditionnement d'air
<http://www.agpcom.fr/rgfroid/>

Revue Pratique du Froid
<http://www.larpe.fr/Agenda>

Journaux de thermique appliquée

Heat transfer Engineering
<http://www.tandfonline.com/loi/uhte20#.UrNq8ux7mQ>

Applied Thermal Engineering
<http://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering/>

Thermal engineering
<http://www.springer.com/engineering/mechanical+engineering/journal/11509>

Journal of Thermal Science and Engineering Applications
<http://thermalscienceapplication.asmedigitalcollection.asme.org/journal.aspx>

International Journal of Thermal Engineering (IJTE) (Open access)
<http://www.iaeme.com/ijte.asp>

Intercontinental Journal of Thermal Science & Engg (Open access)
<http://aditisci.com/index.php?act=vol&jid=15>

Journal of Thermal Engineering and Applications (JoTEA)
<http://stmjournals.com/Journal-of-Thermal-Engineering-and-Applications.html>

am3306

Propriétés des thermoplastiques - Tableaux comparatifs

Date de publication : 10/10/2014

Par :

Michel BIRON

Ingénieur de l'Institut national supérieur de chimie industrielle de Rouen (INSCIR) et de l'Institut français du caoutchouc (IFC) - Consultant

Cet article fait partie de la base documentaire :

Matières thermoplastiques : monographies

Dans le pack : Plastiques et composites

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 : 02/06/2015

Pour le compte : 7200034092 - // nc COMPTE INTERNE TI // 195.25.183.153

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

Propriétés des thermoplastiques

Tableaux comparatifs

par **Michel BIRON**

*Ingénieur de l'Institut national supérieur de chimie industrielle de Rouen (INSCIR)
et de l'Institut français du caoutchouc (IFC) – Consultant*

1. Propriétés physico-chimiques	AM 3 306v2 - 4
Tableau 1 – Masse volumique	– 4
Tableau 2 – Absorption d'eau en 24 h.....	– 6
2. Propriétés mécaniques	– 7
2.1 Traction	
Tableau 3 – Module d'élasticité en traction	– 7
Tableau 4 – Contrainte de rupture en traction.....	– 9
Tableau 5 – Allongement à la rupture en traction.....	– 11
Tableau 6 – Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction.....	– 13
Tableau 7 – Allongement au seuil d'écoulement haut en traction	– 14
2.2 Flexion	
Tableau 8 – Module de flexion	– 15
Tableau 9 – Contrainte de rupture en flexion	– 17
2.3 Compression	
Tableau 10 – Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression.....	– 18
Tableau 11 – Module en compression	– 19
2.4 Résistance au choc	
Tableau 12 – Résistance au choc Charpy avec entaille.....	– 19
Tableau 13 – Résistance au choc Izod avec entaille	– 20
2.5 Dureté	
Tableau 14 – Dureté Shore D	– 22
Tableau 15 – Dureté Rockwell M.....	– 23
3. Propriétés thermiques	– 25
Tableau 16 – Coefficient de dilatation thermique linéique	– 25
Tableau 17 – Conductivité thermique.....	– 26
Tableau 18 – Température de fusion	– 27
Tableau 19 – Température de ramollissement Vicat A	– 28
Tableau 20 – Température maximale d'utilisation en continu	– 28
Tableau 21 – Température de transition vitreuse.....	– 30
Tableau 22 – Température de fragilité	– 31
Tableau 23 – Température de fléchissement sous charge TFC A	– 32
Tableau 24 – Température de fléchissement sous charge TFC B	– 34
Tableau 25 – Indice de fluidité, selon diverses normes	– 35
4. Propriétés diélectriques	– 35
Tableau 26 – Résistivité superficielle.....	– 35
Tableau 27 – Résistivité transversale	– 36
Tableau 28 – Rigidité diélectrique.....	– 38
Tableau 29 – Permittivité relative à 50 Hz	– 39
Tableau 30 – Permittivité relative à 1 000 Hz	– 40
Tableau 31 – Permittivité relative à 1 MHz.....	– 41
Tableau 32 – Facteur de dissipation diélectrique à 50 Hz.....	– 42
Tableau 33 – Facteur de dissipation diélectrique à 1 000 Hz	– 43
Tableau 34 – Facteur de dissipation diélectrique à 1 MHz.....	– 43
5. Autres propriétés	– 44
Tableau 35 – Indice de réfraction.....	– 44
Tableau 36 – Indice d'oxygène.....	– 45
Tableau 37 – Composants d'origine renouvelable.....	– 46

L'objet du présent article est de permettre de comparer rapidement les différentes familles de thermoplastiques, selon leurs principales caractéristiques physico-chimiques, mécaniques, thermiques et électriques, ainsi que leurs taux de matières renouvelables grâce à une représentation graphique des plages de valeurs pour chacune d'elles.

Les thermoplastiques se sont beaucoup développés et sont maintenant déclinés en de nombreuses familles, chacune comportant plusieurs grades de plusieurs producteurs et compoundeurs. La présélection des matériaux correspondant à un problème donné devient de plus en plus complexe. Pour faciliter ces présélections, les thermoplastiques ont été divisés en une centaine de sous-familles en tenant compte d'éventuels additifs : fibres de renfort (verre ou carbone), agents de renforcement, modifiants choc, lubrifiants, stabilisants, recyclé etc.

37 tableaux visualisent et classent les propriétés les plus utilisées de sous-familles de façon à faciliter la recherche de solutions. Ils regroupent :

- les **propriétés physico-chimiques** (masse volumique, absorption d'eau) ;
- les **propriétés mécaniques** (traction, flexion, compression, chocs Charpy et Izod, dureté Shore D et Rockwell M) ;
- les **propriétés thermiques** (coefficient de dilatation, conductivité thermique, fusion, température de ramollissement Vicat, température maximale d'utilisation continue sans contrainte, température transition vitreuse, température de fragilité ou température minimale d'utilisation, températures de fléchissement sous charge, indice de fluidité à chaud) ;
- les **propriétés diélectriques** (résistivités superficielle et transversale, rigidité diélectrique, permittivités relatives ou constantes diélectriques, facteurs de dissipation diélectrique) ;
- les **propriétés optiques** (indice de réfraction) ;
- le **comportement au feu** (indice d'oxygène) ;
- le **taux de composants issus de sources renouvelables**.

Les graphes classent les sous-familles dans l'ordre croissant des plages de valeurs pour chacune des 37 propriétés retenues. Les valeurs minimales et maximales sont extraites des articles de monographie et des documentations des divers producteurs et de la littérature technique.

Dans la mesure du possible, les valeurs d'une caractéristique donnée correspondent à une même méthode de mesure régie par des normes équivalentes. Toutefois, il existe des exceptions ou des imprécisions, comme, par exemple :

- les températures de résistance continue sans contrainte et la température de fragilité (ou température minimale de service) qui ne sont pas des grandeurs normalisées mais sont d'un grand intérêt d'un point de vue pratique ;
- la rigidité diélectrique dont la méthode n'est pas toujours précisée dans ses détails opératoires tels que l'épaisseur de l'éprouvette ou la nature du milieu ;
- le taux de composants issus de sources renouvelables qui n'est pas précisément défini mais permet de situer un matériau dans le courant environnemental actuel.

Il convient d'être prudent sur l'utilisation des valeurs indiquées qui ne peuvent se substituer aux valeurs notifiées par le Producteur ou le Transformateur du grade finalement sélectionné. Les propriétés sont mesurées sur des éprouvettes d'essais dont la mise en œuvre est normalisée et, dans la réalité, les valeurs peuvent être notablement différentes pour de multiples raisons, par exemple :

- présence d'additifs de toute nature : colorants nucléophiles, plastifiants fonctionnels, fibres ou noir de carbone, agents de démoulage, antistatiques, déchets rebroyés, recyclé ;
- conditions de mise en œuvre entraînant des variations de cristallinité, des contraintes résiduelles, une orientation des macromolécules et des renforts, des défauts physiques tels que des lignes de soudure... ;
- finition : traitement de surface, peinture, assemblage...

Les températures d'essai sont de 20 °C ou 23 °C, ce qui n'est pas forcément la température d'utilisation. En outre, pour certains matériaux, un faible écart de température peut entraîner des variations notables de propriétés (module du PVC plastifié, coefficient de dilatation du PTFE...).

L'hygrométrie joue également un rôle qui n'est pas négligeable, notamment pour les polyamides qui sont plastifiés par l'eau absorbée.

Notations et symboles	
Symboles	Définitions
ABS	poly(styrène butadiène acrylonitrile)
CA	acétate de cellulose
CAB	cellulose acétate butyrate
CNT	<i>Carbon NanoTube</i>
COC	cyclo-oléfines copolymères
copo	copolymère
CP	propionate de cellulose
E/TFE	poly(éthylène/tétrafluoroéthylène)
E/CTFE	poly(éthylène/chlorotrifluoroéthylène)
E/MA	copolymère d'éthylène et d'acrylate de méthyle
E/VA	copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle
FC	fibres de carbone
FEP	poly(tétrafluoroéthylène/hexafluoropropène)
FV	fibres de verre
GMT	<i>Glass Mat Thermoplastic</i>
homo	homopolymère
HR	humidité relative
LFRT	<i>Long Fibre Reinforced Thermoplastic</i>
MPR TPV	<i>Melt Processible Rubber</i>
PA	polyamide
PA MXD-6	polyamide semi-aromatique
PAEK	polyaryléthercétone
PAI	polyamide-imide
PAS	polyarylsulfone
PBI	polybenzimidazole
PBT	polytéréphtalate de butanediol-1,4
PCL	polycarpolactone
PCTFE	polychlorotrifluoroéthylène
PE	polyéthylène

Notations et symboles	
Symboles	Définitions
PEBA	copolymère éther/amide
PEEK	polyétheréthercétone
PEI	polyétherimide
PESU (ou PES)	polyéthersulfone
PET	polyéthylènetéréphtalate
PE-tBD	polyéthylène très basse densité
PFA	poly(tétrafluoroéthylène/éthers vinyliques pefluorés)
PI	polyimide
PLA	acide polylactique
PMMA	polyméthacrylate de méthyle
PMP	polyéthylène pentène
POM	polyoxyméthylène
PP	polystyrène
PPE	polyphénylèneéther
PPS	polysulfure de phénylène
PS	polystyrène
PSU	polysulfone
PTFE	polytétrafluoroéthylène
PVC	polychlorure de vinyle
PVCC PVC	chloré
SAN	styrène-acrylonitrile
ShD	dureté Shore échelle D
TP	thermoplastique
TPE	thermoplastique
TPE	élastomère thermoplastique
TPU	polyuréthane thermoplastique
WPC	<i>Wood Plastic Composite</i>

1. Propriétés physico-chimiques

Tableau 1 – Masse volumique, selon NF T 51-063 ou norme équivalente (g/cm ³)				
Plastique	Article	Mini	Maxi	
PMP.....		0,833	0,835	
PE-t BD.....	[AM 3 310]	0,86	0,91	
PP copo.....	[AM 3 320]	0,89	0,905	
PP homo.....	[AM 3 320]	0,9	0,91	
PP/EPDM-VD.....	[AM 3 400]	0,9	1	
TPE styréniques (TPS).....	[AM 3 400]	0,9	1,1	
TPE oléfiniques (TPO).....	[AM 3 400]	0,9	1,1	
PE-BD.....	[AM 3 310]	0,915	0,935	
PP autorenforcé.....		0,92	0,92	
EVA.....	[AM 3 310]	0,925	0,965	
E/MA.....	[AM 3 310]	0,941	0,943	
PE/HD.....	[AM 3 315]	0,946	0,964	
COC.....		0,95	1,02	
PP fibres naturelles.....		0,99	1,09	
Amidon/PP.....		0,995	0,995	
PS choc.....	[AM 3 340]	1,01	1,04	
Amidon/PE.....		1,01	1,01	
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	1,01	1,14	
PEBA 55 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	1,01	1,14	
PEBA Bio.....		1,02	1,03	
PA 11 ou 12.....	[A 3 360]	1,02	1,04	
WPC PP 40 bois.....		1,02	1,05	
PLA/PE.....		1,03	1,03	
PP 40 % fibres de lin.....		1,04	1,04	
PS.....	[AM 3 340]	1,04	1,05	
ABS.....	[A 3 345]	1,04	1,06	
PPE.....	[AM 3 392]	1,04	1,1	
WPC PE 40 bois.....		1,05	1,05	
SAN.....		1,06	1,1	
PA transparent.....	[A 3 360]	1,06	1,18	
MPR.....		1,06	1,35	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12.....	[A 3 360]	1,07	1,08	
WPC PS 20 bois.....		1,07	1,08	
Amidon/PS.....		1,1	1,1	
WPC PLA bois.....		1,1	1,1	
TPU Bio.....		1,1	1,17	
TPE à base PVC.....	[A 3 400]	1,1	1,2	
Copolyesters COPE.....		1,1	1,3	
LFRT PP 30 % FV longue.....		1,12	1,12	
ABS/PC.....		1,12	1,16	
PA 6.....	[A 3 360]	1,13	1,13	
PP GMT.....		1,13	1,21	
PA 6-6.....	[A 3 360]	1,14	1,14	
WPC PP 60 bois.....		1,14	1,15	
WPC PS 40 bois.....		1,15	1,16	
TPU.....		1,15	1,2	
CAB.....		1,15	1,22	
WPC PE 60 bois.....		1,16	1,16	
PVC plastifié.....	[AM 3 325]	1,16	1,35	
CP.....		1,17	1,24	
PMMA.....	[AM 3 350]	1,18	1,18	
PA 4-6.....	[A 3 360]	1,18	1,18	
PLA/PC.....		1,19	1,19	
Polyphénylène autorenforcé.....		1,19	1,24	
PC.....	[AM 3 381]	1,2	1,2	
WPC PVC bois.....		1,2	1,4	
PP 40 % talc.....	[AM 3 320]	1,21	1,21	
PLA/PMMA.....		1,21	1,21	
COPE Bio.....		1,21	1,23	
PLA.....		1,21	1,25	
PA MXD-6.....	[A 3 360]	1,22	1,22	
CA.....		1,22	1,34	
PSU.....	[AM 3 392]	1,24	1,24	
LFRT PP 40 % FV longue.....		1,24	1,24	
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	1,25	1,25	
Amidon/copolyester.....		1,26	1,26	
LFRT PA66 30 % FC longue.....		1,27	1,27	
PEI.....		1,27	1,3	
PEEK.....		1,27	1,32	
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	1,27	1,36	
PLA fibres naturelles.....		1,29	1,31	

En italique, les articles archivés.

Tableau 1 – Masse volumique, selon NF T 51-063 ou norme équivalente (g/cm³) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	
PAS	[AM 3 392]	1,29	1,37																		
POM choc	[AM 3 384]	1,29	1,39																		
PBI		1,3	1,3																		
PEEK/PBI		1,3	1,3																		
PET autorenforcé		1,3	1,3																		
PAEK	[A 3 395]	1,3	1,32																		
PEI FC		1,3	1,4																		
PVC plastifié chargé	[A 3 325]	1,3	1,7																		
PBT	[AM 3 376]	1,31	1,31																		
LFRT PA66 40 % FC longue		1,31	1,31																		
PLA 40 % fibres de lin		1,33	1,33																		
PI linéaires	[AM 3 398]	1,33	1,43																		
PA 6 30 % FV	[AM 3 360]	1,35	1,35																		
PA 6-6 30 % FV	[AM 3 360]	1,36	1,36																		
PI	[AM 3 398]	1,36	1,43																		
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	1,36	1,7																		
LFRT PA66 30 % FV longue		1,37	1,37																		
PES	[AM 3 392]	1,37	1,46																		
PET	[AM 3 376]	1,38	1,38																		
PVC rigide	[AM 3 325]	1,4	1,4																		
PET pour films	[AM 3 375]	1,4	1,4																		
PCL (LCP)	[AM 3 380]	1,4	1,4																		
PEEK/PBI FC		1,4	1,4																		
PP/tissu FV		1,4	1,4																		
PAI		1,4	1,42																		
PAI antifriction		1,4	1,5																		
PEI minéral		1,4	1,5																		
TPU 20-50 % FV		1,4	1,7																		
PI antifriction		1,4	1,7																		
PA 4-6 30 % FV	[AM 3 360]	1,41	1,41																		
POM copo	[AM 3 386]	1,41	1,41																		
POM homo	[AM 3 384]	1,42	1,42																		
PAEK 30 % FC	[AM 3 395]	1,42	1,45																		
PA MXD-6 30 % FV	[A 3 360]	1,43	1,43																		
PI 30 % FC		1,43	1,43																		
LFRT TPU 30 % FV longue	[AM 3 400]	1,43	1,43																		
PC 30 % FV	[AM 3 381]	1,44	1,44																		
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	1,44	1,44																		
LFRT PA66 40 % FV longue		1,45	1,45																		
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	1,46	1,46																		
LFRT PBT 40 % FC longue		1,47	1,47																		
PVCC		1,47	1,52																		
PES 30 % FC	[AM 3 392]	1,48	1,48																		
PAI FC		1,48	1,5																		
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	1,49	1,54																		
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	1,49	1,54																		
PCL 30 % FC		1,5	1,5																		
PEI 30 % FV		1,5	1,6																		
TP/FV unidirectionnels		1,5	1,95																		
PCL 30 % minéral	[A 3 380]	1,5	2																		
LFRT TPU 40 % FV longue		1,51	1,51																		
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	1,53	1,53																		
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	1,55	1,62																		
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	1,55	1,55																		
POM 30 % FV	[AM 3 384]	1,56	1,56																		
PI 30 % FV		1,56	1,56																		
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	1,58	1,58																		
PI 40 % graphite	[AM 3 398]	1,58	1,65																		
PES 30 % FV	[AM 3 392]	1,6	1,6																		
PAI 30 % FV		1,6	1,6																		
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	1,6	1,7																		
LFRT PBT 40 % FV longue		1,61	1,61																		
PPS 40 % FV		1,63	1,67																		
PVDC		1,65	1,7																		
E/CTFE	[AM 3 390]	1,69	1,69																		
E/TFE	[AM 3 390]	1,7	1,7																		
PVDF	[AM 3 390]	1,78	1,78																		
PPS FV et minéral		1,9	2																		
PCTFE	[AM 3 390]	2,12	2,12																		
PFA	[AM 3 390]	2,14	2,16																		
FEP	[AM 3 390]	2,14	2,16																		
PTFE	[AM 3 390]	2,14	2,18																		

En italique, les articles archivés.

Tableau 2 – Absorption d’eau en 24 h, selon NF EN ISO 62 (indice de classement : T 51-166) ou norme équivalente (%)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
PTFE.....	[AM 3 390]	< 0,01		
FEP.....	[AM 3 390]	< 0,01		
PE-HD.....	[AM 3 315]	< 0,01		
PMP.....		0,01	0,01	
COC.....		0,01	0,01	
E/CTFE.....	[AM 3 390]	0,01	0,01	
PS.....	[AM 3 340]	0,01	0,03	
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	0,01	0,05	
PCTFE.....	[AM 3 390]	0,01	0,05	
TPE oléfiniques TPO.....	[AM 3 400]	0,01	0,1	
PPS 40 % FV.....		0,02	0,02	
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	0,02	0,02	
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	0,02	0,03	
PVCC.....		0,02	0,15	
PE-tBD.....	[AM 3 310]	< 0,03		
PE-BD.....	[AM 3 310]	< 0,03		
E/VA.....	[AM 3 310]	< 0,03	0,1	
PFA.....	[AM 3 390]	0,03	0,03	
E/TFE.....	[AM 3 390]	0,03	0,03	
PCL 30 % FC.....		0,03	0,03	
PVDF.....	[AM 3 390]	0,03	0,06	
PCL 30 % FV.....	[AM 3 380]	0,03	0,09	
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	0,04	0,04	
PVC rigide.....	[AM 3 325]	0,04	0,4	
PP homo.....	[AM 3 320]	< 0,05		
PP copo.....	[AM 3 320]	< 0,05		
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	0,05	0,05	
PS choc.....	[A 3 340]	0,05	0,07	
PPE 30 % FV.....	[A 3 387]	0,06	0,06	
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	0,06	0,08	
PEEK 30 % FV.....	[AM 3 394]	0,06	0,12	
PPE.....	[AM 3 392]	0,06	0,12	
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	0,06	0,12	
PAEK 30 % FC.....	[A 3 395]	0,06	0,12	
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	0,06	0,1	
PPS minéral et FV.....		0,08	0,08	
PBT.....	[AM 3 376]	0,08	0,08	
PVDC.....		0,1	0,1	
PP autorenforcé.....		0,1	0,1	
Polyphénylène autorenforcé.....		0,1	0,1	
PEI 30 % FV.....		0,1	0,2	
PET.....	[A 3 376]	0,1	0,2	
PET pour films.....	[A 3 375]	0,1	0,2	
PAS.....	[AM 3 392]	0,1	0,2	
PAEK.....	[A 3 395]	0,1	0,25	
PAI.....		0,1	0,3	
PAI 30 % FV.....		0,1	0,3	
PAI antifriction.....		0,1	0,4	
PEEK.....	[AM 3 394]	0,1	0,5	
PES.....	[AM 3 392]	0,12	1,7	
PI 40 % graphite.....	[AM 3 398]	0,14	0,14	
PSU 30 % FC.....	[AM 3 392]	0,15	0,25	
PVC plastifié.....	[AM 3 325]	0,15	0,75	
SAN.....		0,15	0,3	
ABS PC.....		0,15	0,3	
PA semi-aromatique 30 % FV.....	[A 3 360]	0,2	0,2	
POM autolubrité PTFE.....	[A 3 385]	0,2	0,2	
POM copo.....	[AM 3 384]	0,2	0,22	
ABS.....	[A 3 345]	0,2	0,45	
PI 30 % FV.....	[AM 3 398]	0,2	0,3	
PI 30 % FC.....		0,2	0,3	
PI antifriction.....		0,2	0,3	
PEI.....		0,2	0,3	
PEI minéral.....		0,2	0,3	
PI linéaires.....	[AM 3 398]	0,2	3	
Copolyesters – COPE.....	[AM 3 400]	0,2	7	
PI.....	[AM 3 398]	0,24	0,34	
PMMA.....	[A 3 350]	0,25	0,25	
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	0,25	0,25	
PA 11 ou 12.....	[A 3 360]	0,25	0,4	
POM homo.....	[AM 3 384]	0,25	0,4	
PC 30 % FV.....	[A 3 381]	0,28	0,28	
PESU 30 % FC.....	[AM 3 392]	0,29	0,35	
PSU.....	[AM 3 392]	0,3	0,3	

En italique, les articles archivés.

Tableau 2 – Absorption d'eau en 24 h, selon NF EN ISO 62 (indice de classement : T 51-166) ou norme équivalente (%) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6 ²	1,8	2,2	2,4	2,6	2,8	3	
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	0,3	0,3																
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	0,3	0,3																
POM choc.....	[AM 3 384]	0,31	0,45																
PC.....	[AM 3 381]	0,35	0,35																
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12.....	[A 3 360]	0,37	1,4																
PBI.....		0,4	0,4																
PA transparent.....	[A 3 360]	0,4	1,4																
PVC plastifié chargé.....	[AM 3 325]	0,5	1																
PA 6-6 30 % FV.....	[A 3 360]	0,7	1,1																
PEBA Bio.....		0,7	1,5																
PESU 30 % FV.....	[AM 3 392]	0,8	0,8																
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	0,9	1,2																
PA 6 30 % FV.....	[A 3 360]	0,9	1,2																
CAB.....		0,9	2,2																
PA 6-6.....	[A 3 360]	1	2,8																
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	1,2	1,2																
CP.....		1,2	3																
PA 6.....	[A 3 360]	1,3	1,9																
CA (1).....		1,9	7																
PEEK/PBI (1).....		6,5	6,5																

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

2. Propriétés mécaniques

2.1 Traction

Tableau 3 – Module d'élasticité en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement T 51-034) ou norme équivalente (GPa)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PE-IBD.....	[AM 3 310]	0,01	0,145																									
PP/EPDM-VD.....	[AM 3 400]	0,01	0,35																									
TPU.....	[AM 3 400]	0,01	0,73																									
TPE oléfiniques (TPO).....	[AM 3 400]	0,01	2,5																									
E/VA.....	[AM 3 310]	0,013	0,2																									
Copolyesters – COPE.....	[AM 3 400]	0,03	0,9																									
PEBA Bio.....	[AM 3 401]	0,04	0,56																									
E/MA.....	[AM 3 310]	0,06	0,06																									
Amidon/copolyester.....		0,08	0,09																									
COPE Bio.....		0,16	0,26																									
PE-BD.....	[AM 3 310]	0,19	0,6																									
Amidon/PE.....		0,2	0,3																									
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	0,25	1,3																									
FEP.....	[AM 3 390]	0,3	0,7																									
PVDC.....		0,35	0,5																									
PA 11 ou 12 50 % HR.....		0,4	1																									
CAB.....		0,4	1,7																									
CP.....		0,45	1,4																									
PE-HD.....	[AM 3 315]	0,5	1,1																									
PMP.....		0,5	1,5																									
CA.....		0,6	2,8																									
PFA.....	[AM 3 390]	0,7	0,8																									
PP copo.....	[AM 3 320]	0,7	1,4																									
PTFE.....	[AM 3 390]	0,75	0,75																									
PA 6 50 % HR.....		0,8	2																									
E/TFE.....	[AM 3 390]	0,825	0,825																									
PP 4-6 50 % HR.....		1	1,5																									
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.....		1	2																									
PA 6-6 50 % HR.....		1	3,5																									
WPC PVC bois.....		1	8																									
TPU 20-50 % FV.....		1	13																									
PP homo.....	[AM 3 320]	1,1	1,6																									
PVC plastifié chargé.....			1,5																									
Amidon/PP.....		1,1	1,1																									
PCTFE.....	[AM 3 390]	1,4	1,4																									
WPC PP 60 bois.....		1,4	6																									
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	1,5	2,8																									
POM choc.....	[AM 3 384]	1,53	2,96																									

En italique, les articles archivés.

Tableau 3 – Module d'élasticité en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement T 51-034) ou norme équivalente (GPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PLA/PE.....	.....	1,6	1,7																								
ABS.....	[A 3 345]	1,6	2,6																									
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	1,6	3,85																									
E/CTFE.....	[AM 3 390]	1,7	1,7																									
Amidon/PS.....	.....	1,7	1,8																								
PP 2 % CNT.....	.....	1,73	1,73																								
PP 3 % CNT.....	.....	1,79	1,8																								
PA transparent 50 % HR.....	[AM 3 360]	1,8	2,2																									
COC.....	.....	1,9	3,2																								
PP 5 % CNT.....	.....	1,95	2																								
PVDF.....	[AM 3 390]	2	2																									
PS choc.....	[AM 3 340]	2	2,5																									
ABS/PC.....	.....	2	2,5																								
PI linéaires.....	[AM 3 398]	2	3,2																									
PLA/PC.....	.....	2,1	2,1																								
PET pour films.....	[AM 3 375]	2,2	5,3																									
PVCC.....	.....	2,3	3,2																								
PPE.....	[AM 3 392]	2,38	2,66																									
PC.....	[AM 3 381]	2,4	2,4																									
PES.....	[AM 3 392]	2,4	2,8																									
PAS.....	[AM 3 392]	2,43	2,43																									
PSU.....	[AM 3 392]	2,52	2,52																									
PC 2 % CNT.....	.....	2,58	2,59																								
PLA.....	.....	2,6	3,8																								
PA 6 sec.....	[A 3 360]	2,66	3,2																									
PC 3 % CNT.....	.....	2,68	2,69																								
PBT.....	[AM 3 376]	2,7	2,7																									
WPC PE 40 bois.....	.....	2,7	2,7																								
PET.....	[AM 3 376]	2,8	2,8																									
POM copo.....	[AM 3 384]	2,8	3,25																									
SAN.....	.....	2,8	4																								
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	2,87	2,87																									
POM homo.....	[AM 3 384]	2,9	3,6																									
PEI.....	.....	3	3																								
PS.....	[AM 3 340]	3	3,4																									
PI antifriction.....	.....	3	6																								
PA 2 % CNT.....	.....	3,2	3,2																								
PLA/PMMA.....	.....	3,4	3,5																								
WPC PP 40 bois.....	.....	3,4	3,9																								
PVC rigide.....	[AM 3 325]	3,5	3,5																									
PA 3 % CNT.....	.....	3,5	3,5																								
PP 40 % fibres de lin.....	.....	3,5	8																								
PEEK.....	[AM 3 394]	3,6	3,9																									
TP/FV unidirectionnels.....	.....	3,7	3,8																								
PAEK.....	[A 3 395]	3,8	4																									
WPC PLA bois.....	.....	3,8	3,8																								
Polyphénylène autorenforcé.....	.....	3,9	5,5																								
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	4	4																									
WPC PS 20 bois.....	.....	4	4																								
PP GMT.....	.....	4	8																								
PAI.....	.....	4,2	5																								
PP autorenforcé.....	.....	4,2	6																								
WPC PE 60 bois.....	.....	4,4	4,4																								
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	4,5	4,5																									
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	4,5	7,4																									
PP 40 % kenaf.....	.....	4,6	4,6																								
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....	.....	5	5																								
PET autorenforcé.....	.....	5	5																								
PBI.....	.....	5	6																								
PAI antifriction.....	.....	5	7																								
PEI minéral.....	.....	5	7																								
PEEK/PBI.....	.....	5,1	5,1																								
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....	.....	5,6	5,6																								
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	5,8	5,8																									
WPC PS 40 bois.....	.....	5,8	5,8																								
LFRT PP 40 % FV longue.....	[AM 3 320]	6,5	6,5																									
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	6,5	7																									
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	7	9,1																									
PMMA.....	[A 3 350]	7,7	13																									
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....	.....	8	8																								
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	8	20																									
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	8,05	8,05																									
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	8,75	10																									
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	9	9																									
PEI 30 % FV.....	.....	9	9																								

En italique, les articles archivés.

Tableau 3 – Module d'élasticité en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement T 51-034) ou norme équivalente (GPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	9	10																									
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	9	11,8																									
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	9	13																									
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	9,1	9,1																									
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	9,45	9,45																									
LFRT TPU 30 % FV longue	[AM 3 400]	9,8	9,8																									
PESU 30 % FV	[AM 3 392]	10	10																									
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	10	14																									
LFRT PA66 30 % FV longue	[AM 3 360]	10,5	10,5																									
PP tissu FV		10,5	10,5																									
POM 30 % FV	[AM 3 384]	11	11																									
PAI 30 % FV		11	15																									
PCL 30 % FV (1)	[AM 3 380]	11	25																									
LFRT TPU 40 % FV longue		11,2	11,2																									
PI 30 % FV	[AM 3 398]	12	12																									
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	13	20																									
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	13	24																									
PLA 40 % fibres de lin		13,2	13,2																									
LFRT PBT 40 % FV longue		13,6	13,6																									
PPS 40 % FV		14	14																									
LFRT PA66 40 % FV longue	[A 3 360]	14	14																									
PEI FC		16	16																									
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	17,3	17,3																									
PESU 30 % FC	[AM 3 392]	17,5	17,5																									
PI 30 % FC		21	21																									
PPS FV et minéral		22	22																									
PAI FC		22	23																									
PEEK/PBI FC		24	24																									
LFRT PA66 30 % FC longue (1)		24,5	24,5																									
PCL 30 % FC (1)		28	37																									
LFRT PBT 40 % FC longue (1)		32	32																									
LFRT PA66 40 % FC longue (1)		34,3	34,3																									

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 4 – Contrainte de rupture en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement TS1-034) ou norme équivalente (MPa)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200				
TPE styréniques (TPS)	[AM 3 400]	1	35																									
PP/EPDM-VD	[AM 3 400]	3	28																									
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	4	30																									
PE-tBD@	[AM 3 310]	4	35																									
EVA	[AM 3 310]	5	33																									
TPE à base PVC	[AM 3 400]	6	19																									
PVC plastifié chargé		7	24,5																									
MPR	[AM 3 400]	7	13																									
PE-BD	[AM 3 310]	8	26																									
E/MA	[AM 3 310]	10	12																									
PVC plastifié	[AM 3 325]	10	25																									
WPC PVC bois		10	25																									
Copolyesters – COPE	[AM 3 400]	10	50																									
CA		13	67																									
PE-HD	[AM 3 315]	14	40																									
CP		14	50																									
PC 3 % CNT		16	16																									
PMP		16	25																									
Amidon/PS		17	18																									
CAB		18	48																									
Amidon/copolyester		20	26																									
PVDC		20	35																									
PS choc	[AM 3 340]	20	50																									
Amidon/PP		21	21																									
FEP	[AM 3 390]	21	23																									
TPU	[AM 3 400]	22	55																									
PC 2 % CNT		23	23																									
ABS	[A 3 345]	25	40																									
PTFE	[AM 3 390]	25	40																									
TPU Bio	[AM 3 401]	25	39																									
PLA/PE		28	28																									
PP copo	[AM 3 320]	28	38																									
COPE Bio	[AM 3 401]	29	33																									

En italique, les articles archivés.

Tableau 4 – Contrainte de rupture en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement TS1-034) ou norme équivalente (MPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	29	36	
PFA	[AM 3 390]	30	30	
PEBA Bio	[AM 3 401]	30	55	
PCTFE	[AM 3 390]	31	40	
PP homo	[AM 3 320]	31	42	
Amidon/PE		31	53	
PEBA 42 à 69 Sh D	[AM 3 360]	32	55	
PP 40 % kenaf		32,7	32,7	
PP 2 % CNT		35	36	
PVC rigide	[AM 3 325]	35	60	
PP 3 % CNT		36	37	
PP 40 % fibres de lin		36,4	56	
PP 5 % CNT		38	39	
PBT	[AM 3 376]	40	50	
PVDF	[AM 3 390]	40	50	
PS	[AM 3 340]	40	60	
PLA		41	62	
PET	[AM 3 376]	42	42	
COC		42	71	
PI antifriction		44	66	
E/TFE	[AM 3 390]	45	45	
ABS/PC		45	55	
POM choc	[AM 3 384]	45	59	
PVCC		45	60	
PPE	[AM 3 392]	45	67	
PI 40 % graphite	[AM 3 398]	48	52	
E/CTFE	[AM 3 390]	50	50	
PA 11 ou 12 (50 % HR)		50	50	
POM copo	[AM 3 384]	50	62	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 (50 % HR)		50	65	
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 392]	50	70	
PA 6 (50 % HR)		50	80	
PA 6-6 (50 % HR)		50	85	
PA transparent (50 % HR)	[A 3 360]	50	90	
TPU 20-50 % FV		50	150	
PLA/PC		52	52	
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	55	60	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	55	70	
PC 30 % FV	[AM 3 381]	60	60	
PAS	[AM 3 392]	63	63	
PMMA	[A 3 350]	65	75	
PA 4-6 (50 % HR)		65	85	
SAN		65	85	
POM homo	[AM 3 384]	68	68	
LFRT PP 30 % FV longue		68	125	
PLA/PMMA		69	69	
PA 3 % CNT		69	69	
PES	[AM 3 392]	69	97	
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	70	70	
PSU	[AM 3 392]	70	80	
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	70	80	
PEEK	[AM 3 394]	70	97	
PP GMT (1)		70	250	
PI linéaires (1)	[AM 3 398]	70	262	
PAEK	[A 3 395]	71	105	
PC	[AM 3 381]	72	72	
PA 2 % CNT		72	72	
PI	[AM 3 398]	72	86	
PA 6 sec	[A 3 360]	80	80	
PAI antifriction		84	165	
PA 6-6 sec	[A 3 360]	85	85	
PEEK/PBI		90	90	
PEI		90	100	
PEI minéral		90	100	
LFRT PP 30 % FV longue		95	125	
PA 4-6 sec	[A 3 360]	100	100	
LFRT PP 40 % FV longue		100	100	
PCL 30 % FV (1)	[AM 3 380]	100	230	
PA MXD-6 sec	[A 3 360]	101	101	
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	102	102	
PLA 40 % fibres de lin		102	102	
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	105	130	
PAI 30 % FV (1)		105	210	
Polyphénylène autorenforcé		115	152	
PA 4-6 30 % FV 50 % HR		120	120	

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 4 – Contrainte de rupture en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement TS1-034) ou norme équivalente (MPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
PP autorenforcé.....		120	200	
PESU 30 % FV.....	[AM 3 392]	122	140	
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	125	186	
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	125	188	
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....		130	130	
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....		130	130	
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	130	140	
PAI.....		130	195	
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	132	132	
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	140	140	
PBI.....		140	160	
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	140	175	
PET autorenforcé.....		144	144	
PEEK 30 % FV.....	[AM 3 394]	150	180	
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	157	190	
PCL 30 % FC.....		158	241	
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR.....		160	160	
PSU 30 % FC.....	[AM 3 392]	160	160	
PEI 30 % FV.....		160	160	
PI 30 % FV.....		168	168	
PPS FV et minéral.....		170	170	
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	180	180	
PA 6-3 30 % FV sec.....	[A 3 360]	180	180	
LFRT PBT 40 % FV longue.....		180	180	
LFRT TPU 30 % FV longue.....	[AM 3 400]	182	182	
PA MXD-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	185	185	
PEEK/PBI FC.....		185	185	
LFRT PA66 30 % FV longue.....	[A 3 360]	185	186	
PESU 30 % FC.....	[AM 3 392]	185	196	
PPS 40 % FV.....		190	190	
PEI FC.....		200	200	
PEEK 30 % FC (1).....	[AM 3 394]	200	233	
PAI FC (1).....		203	203	
LFRT TPU 40 % FV longue (1).....	[AM 3 400]	203	203	
LFRT PBT 40 % FC longue (1).....		220	220	
PP tissu FV (1).....		231	231	
PI 30 % FC (1).....		233	233	
LFRT PA66 40 % FV longue (1).....	[A 3 360]	238	238	
LFRT PA66 30 % FC longue (1).....		259	259	
LFRT PA66 40 % FC longue (1).....		336	336	
TP/FV unidirectionnels (1).....		11	720	

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 5 – Allongement à la rupture en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement : T 51-034) ou norme équivalent (%)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
WPC PVC bois.....		0,3	1	
LFRT PBT 40 % FC longue.....		0,85	0,85	
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	1	2	
PSU 30 % FC.....	[AM 3 392]	1	2	
PCL 30 % FC.....		1	2	
LFRT PA66 40 % FC longue.....		1	2	
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	1	3	
PESU 30 % FC.....	[AM 3 392]	1	3	
PS.....	[AM 3 340]	1	4	
PAEK 30 % FC.....	[A 3 395]	1	4	
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	1	4	
PCL 30 % FV.....	[AM 3 380]	1	6	
PEEK/PBI FC.....		1,2	1,2	
PPS FV et minéral.....		1,4	1,4	
PP 40 % fibres de lin.....		1,5	1,5	
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	1,5	3	
PLA 40 % fibres de lin.....		1,6	1,6	
PPS 40 % FV.....		1,7	1,7	
PEEK/PBI.....		1,8	1,8	
PA MXD-6 sec.....	[A 3 360]	2	2	
PI 30 % FC.....		2	2	
PEI FC.....		2	2	
POM 30 % FV.....	[A 3 384]	2	3	

En italique, les articles archivés.

**Tableau 5 – Allongement à la rupture en traction, selon NF EN ISO 527
(indice de classement : T 51-034) ou norme équivalent (%) (suite)**

Plastique	Article	Mini	Maxi	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1 000	
PAEK 30 % FV	[AM 3 395]	2	3																	
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	2	3																	
LFRT PA66 30 % FV longue	[A 3 360]	2	3																	
LFRT PA66 40 % FV longue	[A 3 360]	2	3																	
LFRT TPU 30 % FV longue	[AM 3 400]	2	3																	
LFRT TPU 40 % FV longue	[AM 3 400]	2	3																	
LFRT PA66 30 % FC longue		2	3																	
PP GMT		2	4																	
PESU 30 % FV	[AM 3 392]	2	4																	
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	2	5																	
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	2	5																	
PI antifriction		2	6																	
PMMA	[A 3 350]	2	7																	
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	2	7																	
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	2	9																	
SAN		2	6,5																	
PVC rigide	[AM 3 325]	2	100																	
LFRT PP 30 % FV longue	[AM 3 320]	2,1	2,4																	
PA 3 % CNT		2,2	2,3																	
PA MXD-6 30 % FV sec	[AM 3 360]	2,5	2,5																	
PI 40 % graphite	[AM 3 398]	2,5	3																	
PA 2 % CNT		2,5	2,6																	
PP tissu FV	[AM 3 320]	2,5	2,6																	
PLA		2,5	11																	
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	3	3																	
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	3	3																	
PI 30 % FV	[AM 3 398]	3	3																	
PEI 30 % FV		3	3																	
PBI		3	3																	
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	3	5																	
PAI 30 % FV		3	7																	
PAI antifriction		3	9																	
COC		3	140																	
PEEK	[AM 3 394]	3	150																	
PC 30 % FV	[AM 3 381]	3,5	3,5																	
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	4	4																	
PA 4-6 30 % FV sec	[A 3 360]	4	4																	
PA 6-6 30 % FV 50 % HR		4	7																	
PVCC		4	27																	
TPU 20-50 % FV	[AM 3 400]	4	40																	
PAI FC		6	6																	
PEI minéral		6	6																	
PLA/PMMA		6	6																	
PP autorenforcé		6	20																	
CA		6	70																	
PES	[AM 3 392]	6	80																	
PI	[AM 3 398]	7,5	8																	
PI linéaires	[AM 3 398]	7,5	95																	
PLA/PC		10	11																	
PLA/PE		10	11																	
Polyphénylène autorenforcé		10	15																	
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	10	22																	
PA 4-6 30 % FV 50 % HR		11	15																	
PAI		15	15																	
ABS	[A 3 345]	15	60																	
PMP		15	120																	
PP 5 % CNT		16	16																	
Amidon/PS		17	17																	
PS choc	[AM 3 340]	20	65																	
TPE à base PVC	[AM 3 400]	20	500																	
POM homo	[AM 3 384]	25	70																	
PA 4-6 sec	[A 3 360]	30	30																	
CP		30	100																	
PAEK	[A 3 395]	30	150																	
PPE	[AM 3 392]	35	60																	
PAS	[AM 3 392]	40	60																	
POM copo	[AM 3 384]	40	75																	
PAS	[AM 3 392]	40	60																	
CAB		40	90																	
PA 6-6 sec	[A 3 360]	45	45																	
PA 6 sec	[A 3 360]	50	50																	
PA transparent 50 % HR	[A 3 360]	50	60																	
PSU	[AM 3 392]	50	100																	
ABS/PC		50	125																	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	50	150																	

En italique, les articles archivés.

**Tableau 5 – Allongement à la rupture en traction, selon NF EN ISO 527
(indice de classement : T 51-034) ou norme équivalent (%) (suite)**

Plastique	Article	Mini	Maxi	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1 000	
PEI		60	60																	
POM choc	[AM 3 384]	60	200																	
PP 3 % CNT		64	64																	
PET	[AM 3 370]	70	70																	
Amidon/PP		75	75																	
PET pour films	[A 3 375]	90	300																	
PVC plastifié chargé	[AM 3 325]	100	400																	
PP homo	[AM 3 320]	100	600																	
PC	[AM 3 381]	120	120																	
PCTFE	[AM 3 390]	150	150																	
PA 6-6 50 % HR		150	300																	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR		150	300																	
PE-BD	[AM 3 310]	150	1 000																	
PP 2 % CNT		154	154																	
PVDC		160	250																	
PA 4-6 50 % HR		160	300																	
E/TFE	[AM 3 390]	200	200																	
E/CTFE	[AM 3 390]	200	200																	
PA 6 50 % HR		200	300																	
PVC plastifié	[AM 3 325]	200	400																	
Copolyesters/COPE	[AM 3 400]	200	900																	
MPR	[AM 3 400]	210	420																	
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	250	300																	
PA 11 ou 12 50 % HR		250	400																	
TPU	[AM 3 400]	250	850																	
FEP	[AM 3 390]	300	300																	
PFA	[AM 3 390]	300	300																	
PVDF	[AM 3 390]	300	300																	
PTFE	[AM 3 390]	300	400																	
PP/EPDM-VD		300	600																	
PEBA Bio		300	700																	
TPE styréniques (TPS) (1)	[AM 3 400]	300	1 100																	
COPE Bio		320	360																	
TPU Bio		400	710																	
PE-HD	[AM 3 315]	400	1 000																	
E/VA	[AM 3 310]	400	1 000																	
PEBA 42 à 60 Sh D	[A 3 360]	410	700																	
PEBA 25 à 42 Sh D	[AM 3 360]	450	790																	
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	450	850																	
PP copo	[AM 3 320]	450	900																	
Amidon/PE		480	680																	
Amidon/copolyester		500	520																	
E/MA	[AM 3 310]	700	750																	
PBT (1)	[AM 3 376]		> 200																	
PE-tBD (1)	[AM 3 310]		> 800																	

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

**Tableau 6 – Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF EN ISO 527
(indice de classement : T51-034) ou norme équivalente (MPa)**

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
PE-BD	[AM 3 310]	7	17,5																		
PEBA 42 à 69 Sh D	[AM 3 360]	8	24																		
E/VA	[AM 3 310]	8	42																		
E/MA	[AM 3 310]	11,5	11,5																		
PMP		14	24																		
WPC PE 60 bois		15,5	15,5																		
PP copo	[AM 3 320]	17	33																		
WPC PE 40 bois		17,8	17,8																		
PVDC		20	30																		
PS choc	[AM 3 340]	20	30																		
PVDF	[AM 3 384]	20	56																		
PA 11 ou 12 sec	[AM 3 360]	21	42,7																		
POM choc	[AM 3 384]	21	56																		
WPC PS 20 bois		22,5	22,5																		
CA		23	23																		
PE-HD	[AM 3 315]	24	28																		
WPC PP 40 bois		26	31																		
WPC PS 40 bois		28,9	28,9																		
PMMA	[A 3 350]	30	30																		
ABS	[A 3 345]	30	60																		

En italique, les articles archivés.

Tableau 6 – Contrainte au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement : T51-034) ou norme équivalente (MPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
E/CTFE.....	[AM 3 390]	31	34																		
PP homo.....	.....	32	38																		
CP.....	.....	32	32																		
CAB.....	.....	34	34																		
WPC PLA bois.....	.....	34	34																		
PVC rigide.....	[AM 3 325]	35	50																		
PS.....	[A 3 340]	35	60																		
PVCC.....	.....	40	55																		
PPE.....	[AM 3 392]	45	63																		
PA 6-6 50 % HR.....	.....	45	85																		
ABS/PC.....	.....	47	60																		
PLA.....	.....	48	48																		
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	48	53																		
PA 11 ou 12 50 % HR.....	.....	50	60																		
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.....	.....	50	65																		
PA 6-6 50 % HR.....	.....	50	80																		
PBT.....	[A 3 376]	55	55																		
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	56	84																		
SAN.....	.....	60	85																		
POM copo.....	[AM 3 384]	62	73																		
PC.....	[A 3 381]	63	63																		
POM homo.....	[AM 3 384]	65	84																		
PA 4-6 50 % HR.....	.....	65	85																		
PSU.....	[AM 3 392]	70	72																		
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	75	110																		
PAS.....	[AM 3 392]	78	78																		
PET.....	[AM 3 376]	80	80																		
PA 6 sec.....	[A 3 360]	82	82																		
PES.....	[AM 3 392]	85	94																		
PEI minéral.....	.....	90	100																		
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	90	120																		
PAEK.....	[AM 3 384]	92	104																		
PEI.....	.....	100	110																		
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	100	125																		
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	105	105																		
PAI antifriction.....	.....	125	165																		
PESU 30 % FV.....	[AM 3 392]	126	132																		
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....	.....	130	130																		
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	135	140																		
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	140	160																		
PEEK 30 % FV (1).....	[AM 3 394]	150	180																		
PEI 30 % FV.....	.....	160	160																		
PEI FC (1).....	.....	200	200																		
PEEK 30 % FC (1).....	[AM 3 394]	200	220																		

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 7 – Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement : T 51-034) ou norme équivalente (%)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
PEI FC.....	.....	1	2																										
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	1	3																										
PS.....	[AM 3 340]	1	4																										
WPC PP 60 bois.....	.....	1,2	1,2																										
WPC PE 60 bois.....	.....	1,3	1,3																										
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR.....	[A 3 360]	2	2																										
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	2	3																										
PBT 30 % FV.....	.....	2	3																										
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	2	3																										
PEEK 30 % FV.....	[AM 3 394]	2	3																										
SAN.....	.....	2	5																										
ABS.....	[A 3 345]	2	7																										
PMMA.....	[A 3 350]	2	7																										
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	2	7																										
PPE.....	[AM 3 392]	2	7																										
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	2,3	2,3																										
PEI 30 % FV.....	.....	3	3																										
PAI antifriction.....	.....	3	7																										
ABS/PC.....	.....	3	8																										

En italique, les articles archivés.

Tableau 7 – Allongement au seuil d'écoulement haut en traction, selon NF EN ISO 527 (indice de classement : T 51-034) ou norme équivalente (%) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
PE-BD	[AM 3 310]	3	6																										
WPC PLA bois		3,8	3,8																										
PET.....	[AM 3 376]	4	4																										
PBT.....		4	4																										
WPC PP 40 bois.....		4,5	6,2																										
WPC PE 40 bois.....		4,9	4,9																										
PVCC.....		5	5																										
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	5	8																										
PEI minéral.....		6	6																										
PEI.....		7	7																										
PE-HD.....	[AM 3 315]	15	15																										
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A3 360]	18	25																										

En italique, les articles archivés.

2.2 Flexion

Tableau 8 – Module de flexion, selon NF EN ISO 178 (indice de classement : T51-001) ou norme équivalente (GPa)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	0,01	2,5																								
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	0,02	0,09																								
PEBA Bio.....	[AM 3 401]	0,04	0,56																								
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	0,09	0,43																								
COPE Bio.....		0,16	0,26																								
Copolyesters/COPE.....	[AM 3 400]	0,19	0,9																								
PE-BD.....	[AM 3 310]	0,25	0,74																								
PVDC.....		0,385	0,665																								
PP copo.....	[AM 3 320]	0,42	1,4																								
CP.....		0,45	1,4																								
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.....		0,52	0,7																								
PTFE.....	[AM 3 390]	0,6	1																								
CAB.....		0,6	2,1																								
CA.....		0,6	2,8																								
FEP.....	[AM 3 390]	0,65	0,65																								
PFA.....	[AM 3 390]	0,7	0,7																								
PMP.....		0,8	1,5																								
POM choc.....	[AM 3 384]	0,84	2,1																								
PA 6 50 % HR.....		0,98																									
Amidon/PP.....		1	1,1																								
WPC PVC bois.....		1	6																								
PP homo.....	[AM 3 320]	1,19	1,75																								
PA 11 ou 12 sec.....	[AM 3 360]	1,2	1,45																								
PE-HD.....	[AM 3 315]	1,25	1,25																								
PCTFE.....	[A 3 360]	1,27	1,27																								
PA 6-6 50 % HR.....	[A 3 390]	1,295	1,295																								
PVC plastifié.....	[AM 3 325]		< 1,5																								
PVC plastifié chargé.....	[AM 3 325]		< 1,5																								
PLA/PE.....		1,5	1,5																								
Amidon/PS.....		1,5	1,6																								
PS choc.....	[AM 3 340]	1,6	2,9																								
E/CTFE.....	[AM 3 390]	1,7	1,7																								
ABS.....	[A 3 345]	1,7	2,8																								
COC.....		1,7	3,1																								
PVDF.....	[AM 3 390]	1,9	1,9																								
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	2	2,4																								
ABS/PC.....		2	2,5																								
PP fibres naturelles.....		2,1	4,5																								
PVC rigide.....	[AM 3 325]	2,1	3,5																								
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	2,2	2,9																								
PPE.....	[AM 3 392]	2,27	2,8																								
PMMA.....	[A 3 350]	2,28	3,32																								
PVCC.....		2,3	3,2																								
PC.....	[AM 3 381]	2,31	2,38																								
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	2,38	2,66																								
PI.....	[AM 3 392]	2,48	3,1																								
PLA/PC.....		2,5	2,5																								
PES.....	[AM 3 392]	2,55	2,55																								
POM homo.....	[AM 3 384]	2,56	3,43																								

En italique, les articles archivés.

Tableau 8 – Module de flexion, selon NF EN ISO 178 (indice de classement : T51-001) ou norme équivalente (GPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PBT.....	[AM 3 376]	2,5	2,5																					
PAS.....	[AM 3 392]	2,55	2,8																					
POM copo.....	[A 3 385]	2,59	3,15																					
PLA.....	.....	2,6	3,4																					
WPC PE 40 bois.....	.....	2,7	2,7																					
PSU.....	[AM 3 392]	2,73	2,73																					
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	2,87	3,20																					
PI linéaires.....	[AM 3 398]	2,9	3,5																					
PA 6 sec.....	[A 3 360]	3	3																					
PET.....	[AM 3 376]	3	3																					
PS.....	[AM 3 340]	3	3,40																					
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	3	5,46																					
PEI.....	.....	3	3,3																					
PI antifriction.....	.....	3	5																					
PP 40 % fibres de lin.....	.....	3,1	4,5																					
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	3,1	7																					
WPC PS 20 bois.....	.....	3,2	3,2																					
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	3,3	3,3																					
WPC PP 40 bois.....	.....	3,5	3,9																					
SAN.....	.....	3,5	4,2																					
PP autorenforcé.....	.....	3,5	6																					
LFRT PP 40 % FV longue.....	[AM 3 320]	3,5	8																					
WPC PLA bois.....	.....	3,7	3,7																					
PLA/PMMA.....	.....	3,7	3,8																					
PEEK.....	[AM 3 394]	3,7	4,1																					
PP 40 % kenaf.....	.....	3,8	3,8																					
PA MXD-6 sec.....	[A 3 360]	3,9	3,9																					
PAEK.....	[A 3 395]	3,9	3,9																					
PAI.....	.....	4	5																					
Polyphénylène autorenforcé.....	.....	4	6																					
WPC PE 60 bois.....	.....	4,4	4,4																					
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	4,7	4,7																					
PEEK/PBI.....	.....	4,8	4,8																					
PI 40 % graphite.....	[AM 3 398]	4,82	4,82																					
WPC PP 60 bois.....	.....	4,9	4,9																					
WPC PS 40 bois.....	.....	5	5																					
PAI antifriction.....	.....	5	7																					
PBI.....	.....	5	7																					
PEI minéral.....	.....	5	7																					
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	5,1	7																					
PLA fibres naturelles.....	.....	5,5	6																					
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....	[A 3 360]	6	6																					
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....	[A 3 360]	6	6																					
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....	[A 3 360]	6	6																					
PCL (LCP) (1).....	[AM 3 380]	7	21																					
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	7,35	7,35																					
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	7,7	7,7																					
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	7,7	7,7																					
LFRT TPU 30 % FV longue.....	[AM 3 400]	7,7	7,7																					
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	7,7	8,1																					
PLA 40 % fibres de lin.....	.....	7,8	7,8																					
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	8	8																					
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	8	8																					
PA 4-6- 30 % FV sec.....	[A 3 360]	8,5	8,5																					
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	8,5	9																					
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	8,8	11,2																					
PBT 30 % FV.....	[A 3 376]	9	9																					
PEI 30 % FV.....	.....	9	9																					
PEEK 30 % FV.....	[AM 3 394]	9	10																					
PI 30 % FV.....	.....	9	10																					
LFRT PA66 30 % FV longue.....	[A 3 360]	9,8	9,8																					
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	10	12																					
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	10	12																					
PCL 30 % FV (1).....	[AM 3 380]	10	25																					
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR.....	[A 3 360]	10,2	10,2																					
PESU 30 % FV.....	[AM 3 392]	10,5	10,5																					
PAI 30 % FV.....	.....	11	15																					
LFRT TPU 40 % FV longue.....	[AM 3 400]	11,2	11,2																					
PA MXD-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	11,3	11,3																					
LFRT PA66 40 % FV longue.....	[A 3360]	12,6	12,6																					
LFRT PBT 40 % FV longue.....	.....	12,7	12,7																					
PPS 40 % FV.....	.....	13	13																					
PAEK 30 % FC.....	[A 3 395]	13	18,2																					
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	13	20																					

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 8 – Module de flexion, selon NF EN ISO 178 (indice de classement : T51-001) ou norme équivalente (GPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PEI FC.....		13,5	13,5																					
PSU 30 % FC.....	[AM 3 392]	14,7	14,7																					
PESU 30 % FC.....	[AM 3 392]	16,1	16,1																					
PPS FV et minéral.....		19	19																					
PAI FC.....		19	20																					
PI 30 % FC.....		19	20																					
LFRT PA66 30 % FC longue.....		19,6	19,6																					
PEEK/PBI FC (1).....		20,6	20,6																					
PCL 30 % FC (1).....		22	32																					
LFRT PBT 40 % FC longue (1).....		27,5	27,5																					
LFRT PA66 40 % FC longue (1).....		28	28																					

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle .

Tableau 9 – Contrainte de rupture en flexion, selon NF EN ISO 178 (indice de classement : T 51-001) ou norme équivalente (MPa)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	9,8	56,7																																			
PVDC.....		29,4	43,4																																			
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR.....		30,1	30,1																																			
Amidon/PP.....		32	33																																			
PP copo.....	[AM 3 320]	35	49																																			
PS choc.....	[AM 3 340]	35	70																																			
E/TFE.....	[AM 3 390]	38,5	38,5																																			
PA 6 50 % HR.....		40,5	40,5																																			
POM choc.....	[AM 3 384]	40,6	70																																			
PP homo.....	[AM 3 320]	42	56																																			
PA 6-6 50 % HR.....		42,7	42,7																																			
PVC rigide.....	[AM 3 325]	44	112																																			
PLA/PE.....		45	45																																			
ABS.....	[A 3 345]	45	78																																			
E/CTFE.....	[AM 3 390]	49	49																																			
PVDF.....	[AM 3 390]	49	95																																			
PCTFE.....	[AM 3 390]	51,8	77																																			
PP fibres naturelles.....		55	80																																			
COC.....		55	104																																			
PPE.....	[AM 3 392]	58	98																																			
PP 40 % kenaf.....		58,9	58,9																																			
PP 40 % fibres de lin.....		61,8	79																																			
PLA.....		62	86																																			
PI 40 % graphite.....	[AM 3 396]	69	96																																			
PC.....	[AM 3 381]	70	94,5																																			
PS.....	[AM 3 340]	70	95																																			
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	70	98																																			
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	75	170																																			
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	77	77																																			
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	77	77																																			
LFRT PP 40 % FV longue.....	[AM 3 320]	80	200																																			
PVCC.....		82	105																																			
PMMA.....	[A 3 350]	84	110																																			
PET.....	[AM 3 376]	84	110																																			
PBT.....	[AM 3 376]	85	85																																			
PLA/PC.....		86	86																																			
PAS.....	[AM 3 392]	86,8	100																																			
POM copo.....	[AM 3 384]	90	93																																			
PLA fibres naturelles.....		90	95																																			
POM homo.....	[AM 3 384]	95	98																																			
PI.....	[AM 3 396]	96	131																																			
PA transparent 50 % HR.....		98	98																																			
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	105	105																																			
PSU.....	[AM 3 392]	108	108																																			
PA 6 sec.....	[A 3 360]	109,9	109,9																																			
PAEK.....	[A 3 395]	110	130																																			
PP GMT.....		120	160																																			
PLA/PMMA.....		121	121																																			
PES.....	[AM 3 392]	125	125																																			
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	130	200																																			
PLA 40 % fibres de lin.....		131	131																																			
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	135	135																																			

En italique, les articles archivés.

Tableau 10 – Contrainte de rupture ou contrainte au seuil, en compression, selon NF EN ISO 604 (indice de classement T 51-101) ou norme équivalente (MPa) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285			
PI linéaires	[AM 3 398]	110	280	[Barre horizontale de 120 à 285]																						
POM copo	[AM 3 384]	112	112	[Barre horizontale de 112 à 112]																						
POM 30 % FV	[AM 3 384]	112	119	[Barre horizontale de 112 à 119]																						
PEEK	[AM 3 394]	118	119	[Barre horizontale de 118 à 119]																						
PI	[AM 3 398]	122,5	280	[Barre horizontale de 120 à 285]																						
PPS 40 % FV	[AM 3 395]	125	140	[Barre horizontale de 120 à 140]																						
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	125,3	125,3	[Barre horizontale de 125,3 à 125,3]																						
PAEK	[A 3 395]	126	140	[Barre horizontale de 120 à 140]																						
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	126	164,5	[Barre horizontale de 120 à 164,5]																						
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	133	133	[Barre horizontale de 133 à 133]																						
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	133	168	[Barre horizontale de 120 à 168]																						
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	140	280	[Barre horizontale de 120 à 285]																						
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	149	215	[Barre horizontale de 149 à 215]																						
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	163	240	[Barre horizontale de 163 à 240]																						
PI 30 % FV		190	195	[Barre horizontale de 190 à 195]																						
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	210	210	[Barre horizontale de 210 à 210]																						
PI 30 % FC		210	210	[Barre horizontale de 210 à 210]																						
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	236	237	[Barre horizontale de 236 à 237]																						
PP autorenforcé (1)		300	300	[Barre horizontale de 300 à 300]																						

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle .

Tableau 11 – Module en compression, selon la norme ASTM D 695 (GPa)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10		
PVDC		0,385	0,665	[Barre horizontale de 0,385 à 0,665]																						
PTFE	[AM 3 390]	0,42	0,42	[Barre horizontale de 0,42 à 0,42]																						
ABS	[A 3 345]	0,98	2,73	[Barre horizontale de 0,98 à 2,73]																						
PI antifriction		1	4	[Barre horizontale de 1 à 4]																						
PP homo	[AM 3 320]	1,05	2,1	[Barre horizontale de 1,05 à 2,1]																						
PCTFE	[AM 3 390]	1,2	1,5	[Barre horizontale de 1,2 à 1,5]																						
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	1,26	1,26	[Barre horizontale de 1,26 à 1,26]																						
PVCC		1,5	1,5	[Barre horizontale de 1,5 à 1,5]																						
PVDF	[AM 3 390]	1,7	1,7	[Barre horizontale de 1,7 à 1,7]																						
PA 6 50 % HR		1,75	1,75	[Barre horizontale de 1,75 à 1,75]																						
PI linéaires	[AM 3 398]	2	4	[Barre horizontale de 2 à 4]																						
PI	[AM 3 398]	2,41	2,41	[Barre horizontale de 2,41 à 2,41]																						
PC	[AM 3 381]	2,45	2,45	[Barre horizontale de 2,45 à 2,45]																						
PMMA	[A 3 350]	2,59	3,22	[Barre horizontale de 2,59 à 3,22]																						
PSU	[AM 3 392]	2,62	2,62	[Barre horizontale de 2,62 à 2,62]																						
PBT	[AM 3 376]	2,625	2,625	[Barre horizontale de 2,625 à 2,625]																						
PI 40 % graphite	[AM 3 398]	2,65	3,275	[Barre horizontale de 2,65 à 3,275]																						
POM copo	[AM 3 384]	3,15	3,15	[Barre horizontale de 3,15 à 3,15]																						
PS	[AM 3 340]	3,36	3,5	[Barre horizontale de 3,36 à 3,5]																						
POM homo	[AM 3 384]	4,69	4,69	[Barre horizontale de 4,69 à 4,69]																						
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	4,9	4,9	[Barre horizontale de 4,9 à 4,9]																						
PC 30 % FV	[AM 3 381]	9,1	9,1	[Barre horizontale de 9,1 à 9,1]																						

En italique, les articles archivés.

2.4 Résistances aux chocs

Tableau 12 – Résistance au choc Charpy avec entaille, selon NF EN ISO 179 (indice de classement : T 51-035) ou analogue norme équivalente (kJ/m²)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40		
COC		1,7	2,6	[Barre horizontale de 1,7 à 2,6]																						
PS	[AM 3 340]	2	2	[Barre horizontale de 2 à 2]																						
PLA fibres naturelles		2	2	[Barre horizontale de 2 à 2]																						
PP 5 % CNT		2,4	2,4	[Barre horizontale de 2,4 à 2,4]																						
PA 6-6 sec	[A 3 360]	3	3	[Barre horizontale de 3 à 3]																						
PET	[AM 3 376]	3	3	[Barre horizontale de 3 à 3]																						
PP 3 % CNT		3	3	[Barre horizontale de 3 à 3]																						
PA 3 % CNT		3	3	[Barre horizontale de 3 à 3]																						
PSU	[AM 3 392]	3	4	[Barre horizontale de 3 à 4]																						
PP 2 % CNT		3,2	3,2	[Barre horizontale de 3,2 à 3,2]																						

NC : éprouvette non cassée dans les conditions d'essai.

Tableau 12 – Résistance au choc Charpy avec entaille, selon NF EN ISO 179 (indice de classement : T 51-035) ou analogue norme équivalente (kJ/m²) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
PS choc.....	[AM 3 340]	3	12	
PE-HD.....	[AM 3 315]	4	4	
PA 6 sec.....	[A 3 360]	4	4	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	4	4	
PBT.....	[AM 3 376]	4	4	
PP fibres naturelles.....		4	4,1	
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	4	10	
PP homo.....	[AM 3 320]	4	20	
PA 2 % CNT.....		5	5	
PES.....	[AM 3 392]	5	6	
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	6	6	
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	6	6	
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	6	6	
PC 3 % CNT.....		6	6	
PAEK.....	[A 3 395]	6	12	
ABS.....	[A 3 345]	6	25	
POM copo.....	[AM 3 384]	8	10	
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	9	9	
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	9	16	
PP copo.....	[AM 3 320]	9	40	
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	10	10	
PC 2 % CNT.....		10	10	
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	10	10	
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	11	11	
PPE.....	[AM 3 392]	> 12	25	
TPU 20-50 % FV.....		14	NC	
LFRT PBT 40 % FC longue.....		16	16	
PI linéaires.....	[AM 3 398]	17	17	
LFRT PP 30 % FV longue (1).....	[AM 3 320]	18	45	
PC.....	[AM 3 381]	30	30	
LFRT PBT 40 % FV longue.....	[AM 3 376]	32	32	
PEBA Bio (1).....		46	NC	
ABS/PC (1).....		48	80	
LFRT PP 40 % FV longue (1).....	[AM 3 320]	60	60	
PP autorenforcé (1).....		120	140	
TP/FV unidirectionnels (1).....		383	383	

NC : éprouvette non cassée dans les conditions d'essai.
 (1) Valeurs hors échelle.

Tableau 13 – Résistance au choc Izod avec entaille, selon NF EN ISO 180 (indice de classement : T 51-911) ou norme équivalente (J/m)

Plastique	Article	Mini	Maxi	
PE-HD.....	[AM 3 315]	9	200	
SAN.....		10	30	
PET pour films.....	[A 3 375]	10	35	
PMMA.....	[A 3 350]	10	130	
ABS.....	[A 3 345]	10	200	
PLA.....		13	267	
COC.....		13	350	
PET.....	[AM 3 376]	15	40	
WPC PE 60 bois.....		16	16	
PA MXD-6 sec.....	[A 3 360]	20	20	
PS.....	[AM 3 340]	20	25	
PVDC.....		20	50	
PP homo.....	[AM 3 320]	20	65	
PVC rigide.....	[AM 3 325]	20	110	
WPC PS 40 bois.....		20,3	20,3	
WPC PE 40 bois.....		21	21	
WPC PP 60 bois.....		23,3	23,3	
WPC PP 40 bois.....		25,1	25,1	
PBI.....		27	30	
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	30	30	
PBT.....	[AM 3 376]	35	55	
PCL 30 % FC.....		35	70	
PLA/PMMA.....		37	37	
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	37	64	
PI antifricion.....		38	80	
PEI minéral.....		40	60	
PAI 30 % FV.....		40	80	
WPC PS 20 bois.....		40,5	40,5	
PS choc.....	[AM 3 340]	45	140	

En italique, les articles archivés.

Tableau 13 – Résistance au choc Izod avec entaille, selon NF EN ISO 180 (indice de classement : T 51-911) ou norme équivalente (J/m) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000	
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	45	160																	
LFRT PP 30 % FV longue	[AM 3 320]	45	240																	
PAI FC		47	47																	
PA 6 sec	[A 3 360]	50	50																	
PA 6-6 sec	[A 3 360]	50	50																	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	50	60																	
PEI		50	60																	
PAI antifriction		50	80																	
PAEK	[A 3 395]	50	85																	
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	50	90																	
PA 6-6 50 % HR		50	150																	
PA 6 50 % HR		50	160																	
PVCC		50	290																	
CA		50	400																	
CAB		50	500																	
POM 30 % FV	[AM 3 384]	53	95																	
POM copo	[AM 3 384]	54	90																	
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	58	58																	
Polyphénylène autorenforcé		59	69																	
LFRT PP 40 % FV longue	[AM 3 320]	60	60																	
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	60	110																	
PA transparent 50 % HR	[A 3 360]	60	120																	
PPE	[AM 3 392]	60	500																	
PLA/PE		64	64																	
PESU 30 % FV	[AM 3 392]	64	90																	
POM homo	[A 3 385]	64	122																	
PEEK	[AM 3 394]	65	85																	
Amidon/PP		66	66																	
PSU	[AM 3 392]	69	69																	
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	70	70																	
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	70	70																	
PPS FV et minéral		70	70																	
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	70	140																	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 50 % HR		70	NC																	
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	71	176																	
PES	[AM 3 392]	74	84																	
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR		75	75																	
PC 30 % FV	[AM 3 381]	75	75																	
PESU 30 % FC	[AM 3 392]	75	75																	
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	80	80																	
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	80	80																	
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	80	80																	
PI	[AM 3 397]	80	80																	
PI linéaires	[AM 3 398]	80	90																	
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	80	100																	
PET 30 % à 35 % FV	[AM 3 376]	80	230																	
PPS 40 % FV		85	85																	
PAS	[AM 3 392]	85	200																	
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	85	110																	
PP 40 % fibres de lin		89	91																	
PEI 30 % FV		90	100																	
POM choc	[AM 3 384]	90	900																	
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	95	130																	
PA 4-6 sec	[A 3 360]	100	100																	
PA 6 30 % FV à 50 % HR		100	100																	
PA 6-6 30 % FV 50 % HR		100	100																	
PA 4-5 50 % HR		100	500																	
Amidon/PS		100	100																	
PI 30 % FC		108	108																	
PA 4-6 30 % FV sec	[A 3 360]	110	110																	
PAI		110	150																	
PI 30 % FV		120	120																	
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	120	200																	
PP copo	[AM 3 320]	120	1000																	
PA 11 ou 12 50 % HR		120	NC																	
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	160	294																	
PP 40 % kenaf		185	185																	
PA 4-6 30 % FV 50 % HR		190	190																	
PCTFE	[AM 3 390]	200	200																	
PVDF	[AM 3 390]	200	200																	
LFRT PA66 30 % FC longue		240	240																	
LFRT PA66 30 % FV longue	[A 3 360]	267	267																	
LFRT PA66 40 % FC longue		309	310																	

En italique, les articles archivés.

Tableau 13 – Résistance au choc Izod avec entaille, selon NF EN ISO 180 (indice de classement : T 51-911) ou norme équivalente (J/m) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1 000	
LFRT PA66 40 % FV longue.....	[A 3 360]	320	320																	
PTFE.....	[AM 3 390]	350	500																	
LFRT TPU 30 % FV longue	[AM 3 400]	363	363																	
E/MA	[AM 3 310]	365	NC																	
LFRT TPU 40 % FV longue	[AM 3 400]	368	368																	
PP autorenforcé (1) .....	.....	400	4 800																	
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	415	520																	
ABS/PC .....	.....	500	650																	
PLA/PC.....	.....	747	747																	
PC.....	[AM 3 381]	> 800	> 800																	
PE-BD.....	[AM 3 310]	NC	NC																	
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	NC	NC																	
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	NC	NC																	
FEP.....	[AM 3 390]	NC	NC																	
PFA.....	[AM 3 390]	NC	NC																	
E/TFE.....	[AM 3 390]	NC	NC																	
E/CTFE	[AM 3 390]	NC	NC																	
E/VA	[AM 3 310]	NC	NC																	
Copolyesters – COPE	[AM 3 400]	NC	NC																	
CP.....	.....	NC	NC																	
TPE oléfiniques (TPO).....	[AM 3 400]	NC	NC																	

En italique, les articles archivés.
 NC : éprouvette non cassée dans les conditions d'essai.
 (1) Valeurs hors échelle.

2.5 Duretés

Tableau 14 – Dureté Shore D, selon T 51-109 ou norme équivalente (J/m)

Plastique	Article	Mini	Maxi	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
TPE sturéniques (TPS).....	[AM 3 400]	0	60																		
MPR (1)	[AM 3 400]	1	25																		
PP/EPDM-VD (1)	[AM 3 400]	1	50																		
TPU (1)	[AM 3 400]	1	75																		
TPE oléfiniques (TPO) (1).....	[AM 3 400]	1	77																		
TPE à base PVC (1).....	[AM 3 400]	4	39																		
PE+BD.....	[AM 3 310]	< 25	65																		
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	25	42																		
TPU Bio.....	[AM 3 401]	25	55																		
PEBA Bio.....	[AM 3 401]	25	71																		
Copolyesters/COPE	[AM 3 400]	27	82																		
PVC rigide.....	[AM 3 325]	30	80																		
E/MA.....	[AM 3 310]	35	40																		
E/VA.....	[AM 3 310]	35	42																		
PVC plastifié chargé .....	.....	< 40	40																		
PE-BD	[AM 3 310]	40	47																		
CP .....	.....	40	90																		
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	42	69																		
COPE Bio	[AM 3 401]	48	57																		
PTFE	[AM 3 390]	50	60																		
CA .....	.....	50	95																		
FEP	[AM 3 390]	55	55																		
PFA	[AM 3 390]	55	55																		
PMMA	[A 3 350]	60	70																		
PS choc	[AM 3 340]	60	75																		
PMP .....	.....	60	76																		
TPU 20-50 % FV	[AM 3 400]	60	85																		
CAB .....	.....	60	90																		
PE-HD.....	[AM 3 315]	63	67																		
PP copo	[AM 3 320]	67	73																		
PP homo	[AM 3 320]	72	74																		
PA 11 ou 12.....	[A 3 360]	74	80																		
E/TFE	[AM 3 390]	75	75																		
E/CTFE	[AM 3 390]	75	75																		
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12.....	[A 3 360]	75	80																		
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	75	82																		

En italique, les articles archivés.
 (1) Valeurs hors échelle.

3. Propriétés thermiques

Tableau 16 – Coefficient de dilatation thermique linéique, selon NF T 51-221 ou ASTM D 696 ou norme équivalente ($10^{-5} K^{-1}$)

Plastique	Article	Mini	Maxi	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100
PCL (LCP) (1)	[AM 3 380]	-0,5	7																
PCL 30 % FC (1)		-0,3	7																
PCL 30 % FV (1)	[AM 3 380]	-0,1	9																
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	0,5	6																
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	0,6	0,6																
PI 30 % FC		0,6	4,7																
PEI FC		0,7	5																
TP/FV unidirectionnels		0,7	9																
PESU 30 % FC	[AM 3 392]	0,9	0,9																
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	1	1																
PA 4-6 30 % FV	[A 3 360]	1	1																
PA MXD-6 30 % FV	[A 3 360]	1	1																
PAI FC		1	1																
PP tissu FV		1	2																
TPU 20-50 % FV	[AM 3 400]	1	2																
PA 6 30 % FV	[A 3 360]	1	2,2																
PAI 30 % FV		1	3																
PPS FV et minéral		1,2	1,2																
PP GMT		1,4	2,9																
PPS 40 % FV		1,5	1,5																
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	1,5	2,2																
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	1,5	4																
PI 30 % FV	[AM 3 398]	1,7	5,3																
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	2	2																
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	2	2																
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	2	2																
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	2	3																
PAI antifriction		2	3																
PBI		2	3																
PAI		2	4																
PEI minéral		2	5																
PEI 30 % FV		2	5																
PI linéaires	[AM 3 398]	2	5,5																
PESU 30 % FV	[AM 3 392]	2,3	2,3																
PI antifriction		2,3	4																
PP autorenforcé		2,3	6,8																
PEEK/PBI FC		2,6	2,6																
PI 40 % graphite	[AM 3 392]	2,7	3,8																
PA transparent	[A 3 360]	2,8	7																
PC 30 % FV	[AM 3 381]	3	3																
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	3	3																
POM 30 % FV	[AM 3 384]	3	4																
PPE	[AM 3 358]	3	8																
PEEK/PBI		3	7																
Polyphénylène autorenforcé		3,1	3,1																
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	3,4	3,4																
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	3,8	3,8																
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	4	4																
PAS	[AM 3 392]	4	4																
PEEK	[AM 3 394]	4	6																
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	4	20																
PAEK	[A 3 395]	4,1	4,1																
FEP	[AM 3 390]	5	5																
PI	[AM 3 398]	5	5,4																
PEI		5	6																
PVC rigide	[AM 3 325]	5	8																
TPE à base PVC	[AM 3 400]	5	20																
PES	[AM 3 392]	5,5	5,5																
PSU	[AM 3 392]	5,6	5,6																
PA 11 ou 12	[AM 3 360]	6	10																
PVCC		6	8																
SAN		6	8																
COC		6	9																
PS	[AM 3 340]	7	7																
PMMA	[A 3 350]	7	7																
PET	[AM 3 376]	7	7																
PC	[AM 3 381]	7	7																
PCTFE	[AM 3 390]	7	7																
PVC plastifié		7	25																
ABS	[AM 3 345]	7,5	9,5																

En italique, les articles archivés.
(1) Hors échelle.

Tableau 17 – Conductivité thermique, selon ASTM C 177, NF X 10-021 ou norme équivalente ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)								
				0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70		
PAEK	[A 3 395]	0,22	0,22									
PEI		0,22	0,22									
PESU 30 % FV	[AM 3 392]	0,23	0,23									
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	0,24	0,24									
E/TFE	[AM 3 390]	0,24	0,24									
PTFE	[AM 3 390]	0,25	0,25									
FEP	[AM 3 390]	0,25	0,25									
PEEK	[AM 3 394]	0,25	0,3									
PSU	[AM 3 392]	0,26	0,26									
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	0,27	0,27									
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	0,28	0,28									
E/MA	[AM 3 310]	0,28	0,33									
PET	[AM 3 376]	0,29	0,29									
PEI 30 % FV		0,29	0,33									
PE-BD	[AM 3 310]	0,3	0,3									
PI	[AM 3 398]	0,3	0,3									
PPS 40 % FV		0,3	0,4									
POM homo	[AM 3 384]	0,3	0,4									
POM copo	[AM 3 384]	0,3	0,4									
POM 30 % FV	[AM 3 384]	0,3	0,4									
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	0,31	0,31									
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	0,33	0,33									
PE-HD	[AM 3 315]	0,35	0,47									
PEI FC		0,36	0,36									
PI 30 % FV	[AM 3 398]	0,37	0,37									
PBI		0,4	0,4									
PI antifriction (1)		0,4	2,1									
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	0,42	0,42									
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	0,43	0,43									
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	0,5	0,5									
PA MXD-6 30 % FV 50 % HR		0,5	0,5									
PAI FC		0,53	0,53									
PAI antifriction		0,53	0,53									
PEEK 30 % FC (1)	[AM 3 394]	0,9	0,9									

En italique, les articles archivés.

Tableau 18 – Température de fusion, selon NF EN ISO 3146 (indice de classement : T51-621) ou norme équivalente (°C)

Plastique	Article	Mini	Maxi	Température de fusion (°C)															
				50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	
E/VA	[AM 3 310]	50	> 75																
E/MA	[AM 3 310]	81	95																
PE-BD	[AM 3 310]	105	125																
PE-HD	[AM 3 315]	125	135																
PP copo	[AM 3 320]	130	168																
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	133	160																
PEBA Bio	[AM 3 401]	135	186																
PVDC		137	165																
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	159	172																
PP homo	[AM 3 320]	160	170																
POM copo	[AM 3 384]	160	175																
POM choc	[AM 3 384]	160	175																
POM 30 % FV	[AM 3 384]	160	175																
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	168	168																
PVDF	[AM 3 390]	170	170																
POM homo	[AM 3 384]	175	181																
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	176	187																
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	181	181																
TPU Bio	[AM 3 401]	185	195																
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	205	215																
COPE Bio	[AM 3 401]	208	215																
PCTFE	[AM 3 390]	214	214																
PA 6 sec	[A 3 360]	215	215																
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	215	215																
PBT	[AM 3 376]	225	225																
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	225	225																
PMP		235	240																

En italique, les articles archivés.

Tableau 20 – Température maximale d'utilisation en continu, sans contrainte (°C) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300																											
PS	[AM 3 340]	65	80	[Bar chart showing range from 65 to 80]																											
ABS	[A 3 345]	65	110	[Bar chart showing range from 65 to 110]																											
PVDC		70	90	[Bar chart showing range from 70 to 90]																											
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	70	105	[Bar chart showing range from 70 to 105]																											
PE-BD	[AM 3 310]	80	90	[Bar chart showing range from 80 to 90]																											
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	80	90	[Bar chart showing range from 80 to 90]																											
PA 6 sec.....	[A 3 360]	80	120	[Bar chart showing range from 80 to 120]																											
PBT	[AM 3 370]	80	130	[Bar chart showing range from 80 to 130]																											
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	80	140	[Bar chart showing range from 80 to 140]																											
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	80	140	[Bar chart showing range from 80 to 140]																											
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	80	140	[Bar chart showing range from 80 to 140]																											
PET	[AM 3 370]	80	140	[Bar chart showing range from 80 to 140]																											
PET pour films	[A 3 375]	80	140	[Bar chart showing range from 80 to 140]																											
PVCC		80	105	[Bar chart showing range from 80 to 105]																											
TPU	[AM 3 400]	85	85	[Bar chart showing range from 85 to 85]																											
TPU 20-50 % FV	[AM 3 400]	85	85	[Bar chart showing range from 85 to 85]																											
SAN		85	95	[Bar chart showing range from 85 to 95]																											
TPE à base PVC.....	[AM 3 400]	85	105	[Bar chart showing range from 85 to 105]																											
POM homo	[AM 3 384]	90	110	[Bar chart showing range from 90 to 110]																											
POM copo	[AM 3 384]	90	110	[Bar chart showing range from 90 to 110]																											
POM 30 % FV	[AM 3 384]	90	110	[Bar chart showing range from 90 to 110]																											
PC 30 % FV	[AM 3 381]	90	125	[Bar chart showing range from 90 to 125]																											
PMP		90	110	[Bar chart showing range from 90 to 110]																											
COC		90	110	[Bar chart showing range from 90 to 110]																											
PP homo	[AM 3 320]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PP copo	[AM 3 320]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PPE	[AM 3 392]	100	110	[Bar chart showing range from 100 to 110]																											
PE-HD	[AM 3 315]	100	120	[Bar chart showing range from 100 to 120]																											
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	100	140	[Bar chart showing range from 100 to 140]																											
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	100	140	[Bar chart showing range from 100 to 140]																											
PC	[AM 3 381]	100	145	[Bar chart showing range from 100 to 145]																											
PEBA Bio.....	[AM 3 401]	100	100	[Bar chart showing range from 100 to 100]																											
PP/EPDM-VD	[AM 3 400]	100	120	[Bar chart showing range from 100 to 120]																											
MPR	[AM 3 400]	107	107	[Bar chart showing range from 107 to 107]																											
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	110	150	[Bar chart showing range from 110 to 150]																											
PA MXD-6 sec	[A 3 360]	110	150	[Bar chart showing range from 110 to 150]																											
Copolyesters/COPE	[AM 3 400]	110	135	[Bar chart showing range from 110 to 135]																											
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	115	115	[Bar chart showing range from 115 to 115]																											
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	120	120	[Bar chart showing range from 120 to 120]																											
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	130	130	[Bar chart showing range from 130 to 130]																											
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	135	135	[Bar chart showing range from 135 to 135]																											
PA 4-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
PCTFE	[A 3 390]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
PVDF	[AM 3 390]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
E/TFE	[AM 3 390]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
E/CTFE	[AM 3 390]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
PSU	[AM 3 392]	150	150	[Bar chart showing range from 150 to 150]																											
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	155	155	[Bar chart showing range from 155 to 155]																											
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	170	170	[Bar chart showing range from 170 to 170]																											
PEI		170	180	[Bar chart showing range from 170 to 180]																											
PEI minéral		170	180	[Bar chart showing range from 170 to 180]																											
PEI 30 % FV		170	180	[Bar chart showing range from 170 to 180]																											
PEI FC.....		170	180	[Bar chart showing range from 170 to 180]																											
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	175	175	[Bar chart showing range from 175 to 175]																											
PES	[AM 3 392]	180	180	[Bar chart showing range from 180 to 180]																											
PAS.....	[AM 3 392]	180	180	[Bar chart showing range from 180 to 180]																											
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	180	220	[Bar chart showing range from 180 to 220]																											
PI linéaires	[AM 3 398]	180	250	[Bar chart showing range from 180 to 250]																											
PI 30 % FV.....	[AM 3 398]	180	250	[Bar chart showing range from 180 to 250]																											
PI 30 % FC.....		180	250	[Bar chart showing range from 180 to 250]																											
PI antifriction		180	250	[Bar chart showing range from 180 to 250]																											
PES 30 % FV	[AM 3 392]	195	195	[Bar chart showing range from 195 to 195]																											
FEP	[AM 3 390]	200	200	[Bar chart showing range from 200 to 200]																											
PES 30 % FC.....	[AM 3 392]	200	200	[Bar chart showing range from 200 to 200]																											
PPS FV et minéral.....		200	220	[Bar chart showing range from 200 to 220]																											
PCL (LCP)	[AM 3 380]	200	240	[Bar chart showing range from 200 to 240]																											
PCL 30 % FV.....	[AM 3 380]	200	240	[Bar chart showing range from 200 to 240]																											
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	200	240	[Bar chart showing range from 200 to 240]																											
PCL 30 % FC		200	240	[Bar chart showing range from 200 to 240]																											
PPS 40 % FV		> 200	220	[Bar chart showing range from > 200 to 220]																											
PAI		220	220	[Bar chart showing range from 220 to 220]																											

En italique, les articles archivés.

Tableau 20 – Température maximale d'utilisation en continu, sans contrainte (°C) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300																									
PAI 30 % FV.....	.....	220	220																										
PAI FC.....	.....	220	220																										
PAI antifriction.....	.....	220	220																										
PEEK.....	[AM 3 394]	240	250																										
PEEK 30 % FV.....	[AM 3 394]	240	250																										
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	240	250																										
PTFE.....	[AM 3 390]	250	250																										
PFA.....	[AM 3 390]	250	250																										
PAEK.....	[A 3 395]	250	250																										
PAEK 30 % FC.....	[A 3 395]	250	250																										
PBI (1).....	.....	260	425																										
PEEK/PBI.....	.....	270	300																										
PEEK/PBI FC.....	.....	270	300																										
PI.....	[AM 3 392]	< 300	300																										
PI 40 % graphite.....	[AM 3 398]	< 300	300																										

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 21 – Température de transition vitreuse (°C)

Plastique	Article	Mini	Maxi	-110 -100 -80 -60 -40 -20 0 10 30 50 70 90 110 120 140 160 180 200 220 230 250																									
PE-BD.....	[AM 3 310]	- 110	- 100																										
PE-HD.....	[AM 3 315]	- 110	- 100																										
POM copo.....	[AM 3 384]	- 60	- 50																										
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	- 60	- 50																										
POM homo.....	[AM 3 384]	- 60	- 60																										
PVC plastifié.....	.....	- 50	- 5																										
PVC plastifié chargé.....	.....	- 50	- 5																										
TPU Bio.....	[AM 3 401]	- 48	- 20																										
PP copo.....	[AM 3 320]	- 20	- 20																										
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	- 20	- 10																										
PVDC.....	.....	- 15	12																										
PP homo.....	[AM 3 320]	- 10	- 10																										
PMP.....	.....	20	30																										
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	37	46																										
PBT.....	[AM 3 376]	40	40																										
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	40	40																										
PVCC.....	.....	45	45																										
PA 6 sec.....	[A 3 360]	50	50																										
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	50	58																										
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	50	60																										
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	57	57																										
PVC rigide.....	[AM 3 325]	60	100																										
COC.....	.....	70	180																										
PET.....	[AM 3 376]	80	80																										
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	80	80																										
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	80	80																										
CAB.....	.....	80	120																										
CP.....	.....	80	120																										
PA MXD-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	85	100																										
PPS 40 % FV.....	.....	88	93																										
PPS FV et minéral.....	.....	88	93																										
PS.....	[AM 3 340]	90	90																										
PS choc.....	[AM 3 340]	90	90																										
PA MXD-6 sec.....	[A 3 360]	90	90																										
PMMA.....	[A 3 350]	90	135																										
ABS.....	[A 3 345]	95	115																										
PPE.....	[AM 3 392]	100	142																										
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	100	150																										
CA.....	.....	100	130																										
PCL (LCP).....	[AM 3 380]	100	150																										
PCL 30 % FV.....	[AM 3 380]	100	150																										
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	100	150																										
PTFE.....	[AM 3 390]	105	105																										
SAN.....	.....	115	115																										
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	125	170																										
PAEK.....	[A 3 395]	132	187																										
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	132	187																										
PAEK 30 % FC.....	[A 3 395]	132	187																										
PEEK.....	[AM 3 394]	143	157																										

En italique, les articles archivés.

Tableau 21 – Température de transition vitreuse (°C) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	-110	-100	-80	-60	-40	-20	0	10	30	50	70	90	110	120	140	160	180	200	220	230		
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	143	157																						
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	143	157																						
PC	[AM 3 381]	148	148																						
PC 30 % FV	[AM 3 381]	148	148																						
PSU	[AM 3 392]	185	190																						
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	189	190																						
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	189	190																						
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	190	190																						
PEI		215	215																						
PEI minéral		215	215																						
PEI 30 % FV		215	215																						
PEI FC		215	215																						
PI linéaires (1)	[AM 3 398]	217	315																						
PAS	[AM 3 392]	220	220																						
PES	[AM 3 392]	220	230																						
PES 30 % FV	[AM 3 392]	220	230																						
PES 30 % FC	[AM 3 392]	225	225																						
PAI (1)		275	275																						
PAI 30 % FV (1)		275	275																						
PAI FC (1)		275	275																						
PAI antifriction (1)		275	275																						
PBI (1)		400	425																						

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelles.

Tableau 22 – Température de fragilité ou température minimale d'utilisation (1) (°C)

Plastique	Article	Mini	Maxi	-250	-240	-220	-200	-180	-160	-150	-130	-110	-100	-80	-60	-50	-30	-10	0	20					
PCTFE	[AM 3 390]	-250	-250																						
PCL (LCP)	[AM 3 380]	> -196																							
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	> -196																							
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	> -196																							
PAI		> -196																							
PAI 30 % FV		> -196																							
PAI FC		> -196																							
PBI		-160	-160																						
PTFE	[AM 3 390]	-150	-150																						
FEP	[AM 3 390]	-150	-150																						
PFA	[AM 3 390]	-150	-150																						
PA 11 ou 12 sec	[AM 3 360]	-120	-70																						
PES 30 % FV	[AM 3 392]	-100	-100																						
PES 30 % FC	[AM 3 392]	-100	-100																						
PAS	[AM 3 392]	-100	-100																						
PAEK		-100	-100																						
E/TFE	[AM 3 390]	-100	-100																						
PSU	[AM 3 392]	-100	-100																						
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	-100	-100																						
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	-100	-100																						
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	-100	-100																						
PES	[AM 3 392]	-100	-100																						
PE-HD	[AM 3 315]	-100	-75																						
PE-BD	[AM 3 310]	-100	-70																						
Copolyesters/COPE	[AM 3 400]	-100	-48																						
MPR	[AM 3 400]	-91	-17																						
E/CTFE	[AM 3 390]	-80	-80																						
PA 6-6 sec	[A 3 360]	-80	-65																						
E/MA	[AM 3 310]	-70	-50																						
TPU	[AM 3 400]	-70	-40																						
PP/EPDM-VD	[AM 3 400]	-63	-30																						
TPE à base PVC	[AM 3 400]	-62	-30																						
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	-60	-40																						
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	-60	-40																						
TPE styréniques (TPS)	[AM 3 400]	-60	-40																						
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	-60	-40																						
PEBA Bio	[AM 3 401]	-60	-40																						
POM choc	[AM 3 384]	-50	-40																						
PPE	[AM 3 392]	-50	-40																						
PET	[AM 3 376]	-40	-40																						
PBT	[AM 3 376]	-40	-40																						

(1) Méthode de mesure en général non normalisée, quelquefois selon ISO 974.

Tableau 22 – Température de fragilité ou température minimale d'utilisation (1) (°C) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	-250	-240	-220	-200	-180	-160	-150	-130	-110	-100	-80	-60	-50	-30	-10	0	20
PET pour film.....	[A 3 375]	-40	-40																	
POM homo.....	[AM 3 384]	-40	-40																	
POM copo.....	[AM 3 384]	-40	-40																	
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	-40	-40																	
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	-40	-40																	
PVDF.....	[AM 3 390]	-40	-40																	
PS choc.....	[AM 3 340]	-40	-20																	
ABS.....	[A 3 345]	-40	-20																	
PP copo.....	[AM 3 320]	-40	-10																	
PVC plastifié chargé.....	[AM 3 325]	-40	-5																	
PVC plastifié.....	[AM 3 325]	-40	-5																	
PMP.....	.....	-40	-20																	
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	-30	-5																	
CA.....	.....	-30	-30																	
PC.....	[AM 3 381]	-25	-25																	
PVC rigide.....	[AM 3 325]	-10	0																	
PP homo.....	[AM 3 320]	0	0																	
PVCC.....	.....	0	0																	
PS.....	[AM 3 340]	20	20																	
SAN.....	.....	20	20																	

(1) Méthode de mesure en général non normalisée, quelquefois selon ISO 974.

(2) Mesure hors échelle.

Tableau 23 – Température de fléchissement sous charge TFC A sous 1,82 MPa, selon NF EN ISO 75 (indice de classement : T 51-005) ou norme équivalente (°C)

Plastique	Article	Mini	Maxi	30	40	60	80	100	120	140	150	170	190	200	220	240	250	260	280	300	320	340	350	
TPE oléfiniques (TPO) (1).....	[AM 3 400]	20	72																					
PE-BD.....	[AM 3 310]	30	40																					
PMP.....	.....	40	55																					
Copolyesters/COPE.....	[AM 3 400]	< 40	55																					
CA.....	.....	44	90																					
CP.....	.....	44	110																					
PE-HD.....	[AM 3 315]	45	60																					
CAB.....	.....	45	94																					
PFA.....	[AM 3 390]	50	50																					
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	50	55																					
PP homo.....	[AM 3 320]	50	60																					
PP copo.....	[AM 3 320]	50	60																					
PTFE.....	[AM 3 390]	50	60																					
FEP.....	[AM 3 390]	51	51																					
WPC PE 40 bois.....	.....	53	53																					
PVDC.....	.....	54	65																					
PLA/PC.....	.....	54	54																					
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	55	60																					
PVC rigide.....	[AM 3 325]	55	70																					
POM choc.....	[AM 3 384]	56	100																					
PS choc.....	[AM 3 340]	60	80																					
PET.....	[AM 3 376]	60	100																					
WPC PE 60 bois.....	.....	62	62																					
PA 6 sec.....	[A 3 360]	63	63																					
PBT.....	[AM 3 376]	65	65																					
COC.....	.....	68	145																					
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	70	70																					
PS.....	[AM 3 340]	70	92																					
PMMA.....	[A 3 350]	70	100																					
E/TFE.....	[AM 3 390]	71	71																					
WPC PS 20 bois.....	.....	75	75																					
PCTFE.....	[AM 3 390]	76	76																					
E/CTFE.....	[AM 3 390]	76	76																					
PVDF.....	[AM 3 390]	80	110																					
WPC PS 40 bois.....	.....	81	81																					
PPE.....	[AM 3 392]	82	150																					
POM copo.....	[AM 3 384]	85	121																					
PVCC.....	.....	85	106																					
ABS.....	[A 3 345]	89	103																					
SAN.....	.....	90	100																					
TPU 20-50 % FV.....	[AM 3 400]	90	130																					
WPC PP 40 bois.....	.....	94	94																					

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 23 – Température de fléchissement sous charge TFC A sous 1,82 MPa, selon NF EN ISO 75 (indice de classement : T 51-005) ou norme équivalente (°C) (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi
WPC PP 60 bois		94	94
PA MXD-6 sec	[A 3 360]	95	95
PP autorenforcé		95	102
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	100	100
ABS/PC		100	132
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	110	135
LFRT TPU 30 % FV longue.....	[AM 3 400]	110	110
LFRT TPU 40 % FV longue.....	[AM 3 400]	112	113
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	115	115
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	120	130
POM homo	[AM 3 384]	124	126
PC	[AM 3 381]	131	131
PP fibres naturelles.....		134	134
PC 30 % FV	[AM 3 381]	135	135
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	135	158
PEEK	[AM 3 394]	140	165
LFRT PP 30 % FV longue.....	[AM 3 320]	148	160
Polyphénylène autorenforcé.....		151	171
PP GMT.....		153	165
TP/FV unidirectionnels		156	257
PA 4-6 sec	[A 3 360]	160	160
POM 30 % FV	[AM 3 384]	160	163
PAEK	[AM 3 395]	160	170
LFRT PP 40 % FV longue.....	[AM 3 320]	160	160
PCL (LCP)	[AM 3 380]	168	275
PPS FV et minéral		170	> 260
PSU	[AM 3 392]	174	174
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	174	174
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	176	176
PCL 30 % minéral.....	[AM 3 380]	183	250
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	184	184
PEI		190	200
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	200	200
PEI minéral		200	210
PEI 30 % FV		200	210
PES	[AM 3 392]	202	215
PAS	[AM 3 392]	204	204
PBT 30 % FV	[AM 3 370]	205	205
PES 30 % FV	[AM 3 392]	209	219
PEI FC.....		210	210
PES 30 % FC.....	[AM 3 392]	213	216
PCL 30 % FC		220	240
PI linéaires	[AM 3 398]	225	300
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	228	228
PCL 30 % FV (1)	[AM 3 380]	230	380
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 370]	235	235
PI 30 % FV.....	[AM 3 398]	242	242
PI 30 % FC.....		247	247
LFRT PA66 30 % FV longue	[A 3 360]	248	249
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	250	250
LFRT PA66 40 % FV longue	[A 3 360]	254	255
LFRT PA66 30 % FC longue		254	255
PPS 40 % FV		260	270
PI antifriction (1)		262	360
PAI		278	278
PAI 30 % FV		280	280
PAI antifriction		280	280
PAI FC		282	282
PA 4-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	285	285
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	290	315
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	290	350
PEEK 30 % FC.....	[AM 3 394]	315	320
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	320	> 320
PEEK/PBI FC.....		320	320
PBI (1)		427	435

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 24 – Température de fléchissement sous charge TFC B sous 0,46 MPa, selon NF EN ISO 75-2 (indice de classement : T51-005-2) ou norme équivalente (°C)

Plastique	Article	Mini	Maxi	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290		
TPE oléfiniques (TPO) (1).....	[AM 3 400]	30	132	[Bar chart showing deflection temperature range from 30 to 132°C]																											
E/MA.....	[AM 3 310]	40	48	[Bar chart showing deflection temperature range from 40 to 48°C]																											
PE-BD.....	[AM 3 310]	40	50	[Bar chart showing deflection temperature range from 40 to 50°C]																											
PEBA 25 à 42 SH D.....	[A 3 360]	42	52	[Bar chart showing deflection temperature range from 42 to 52°C]																											
Copolyesters/COPE.....	[AM 3 400]	46	156	[Bar chart showing deflection temperature range from 46 to 156°C]																											
CA.....		50	100	[Bar chart showing deflection temperature range from 50 to 100°C]																											
PLA.....		51	51	[Bar chart showing deflection temperature range from 51 to 51°C]																											
PLA/PE.....		54	54	[Bar chart showing deflection temperature range from 54 to 54°C]																											
CAB.....		54	108	[Bar chart showing deflection temperature range from 54 to 108°C]																											
PVC rigide.....	[AM 3 325]	57	80	[Bar chart showing deflection temperature range from 57 to 80°C]																											
CP.....		60	120	[Bar chart showing deflection temperature range from 60 to 120°C]																											
PLA/PMMA.....		66	66	[Bar chart showing deflection temperature range from 66 to 66°C]																											
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[AM 3 360]	66	100	[Bar chart showing deflection temperature range from 66 to 100°C]																											
FEP.....	[AM 3 390]	70	70	[Bar chart showing deflection temperature range from 70 to 70°C]																											
PE-HD.....	[AM 3 315]	72	95	[Bar chart showing deflection temperature range from 72 to 95°C]																											
PFA.....	[AM 3 390]	74	74	[Bar chart showing deflection temperature range from 74 to 74°C]																											
COC.....		75	170	[Bar chart showing deflection temperature range from 75 to 170°C]																											
PS.....	[AM 3 340]	75	100	[Bar chart showing deflection temperature range from 75 to 100°C]																											
PMMA.....	[A 3 350]	75	115	[Bar chart showing deflection temperature range from 75 to 115°C]																											
PVDC.....		80	90	[Bar chart showing deflection temperature range from 80 to 90°C]																											
PMP.....		80	100	[Bar chart showing deflection temperature range from 80 to 100°C]																											
PS choc.....	[AM 3 340]	80	100	[Bar chart showing deflection temperature range from 80 to 100°C]																											
PP copo.....	[AM 3 320]	85	104	[Bar chart showing deflection temperature range from 85 to 104°C]																											
ABS.....	[A 3 345]	90	110	[Bar chart showing deflection temperature range from 90 to 110°C]																											
SAN.....		95	105	[Bar chart showing deflection temperature range from 95 to 105°C]																											
PP homo.....	[AM 3 320]	100	120	[Bar chart showing deflection temperature range from 100 to 120°C]																											
PVCC.....		100	120	[Bar chart showing deflection temperature range from 100 to 120°C]																											
E/TFE.....	[AM 3 390]	105	105	[Bar chart showing deflection temperature range from 105 to 105°C]																											
PPE.....	[AM 3 392]	110	185	[Bar chart showing deflection temperature range from 110 to 185°C]																											
E/CTFE.....	[AM 3 390]	115	115	[Bar chart showing deflection temperature range from 115 to 115°C]																											
PET.....	[AM 3 376]	115	170	[Bar chart showing deflection temperature range from 115 to 170°C]																											
PLA/PC.....		116	116	[Bar chart showing deflection temperature range from 116 to 116°C]																											
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	118	150	[Bar chart showing deflection temperature range from 118 to 150°C]																											
TPU 20-50 % FV.....	[AM 3 400]	120	175	[Bar chart showing deflection temperature range from 120 to 175°C]																											
PCTFE.....	[AM 3 390]	125	125	[Bar chart showing deflection temperature range from 125 to 125°C]																											
PPE 30 % FC.....	[AM 3 392]	130	130	[Bar chart showing deflection temperature range from 130 to 130°C]																											
PP 20 à 30 % FV.....	[AM 3 320]	130	140	[Bar chart showing deflection temperature range from 130 to 140°C]																											
PTFE.....	[AM 3 390]	130	140	[Bar chart showing deflection temperature range from 130 to 140°C]																											
PP autorenforcé.....		130	160	[Bar chart showing deflection temperature range from 130 to 160°C]																											
PVDF.....	[AM 3 390]	135	148	[Bar chart showing deflection temperature range from 135 to 148°C]																											
PC.....	[AM 3 381]	138	138	[Bar chart showing deflection temperature range from 138 to 138°C]																											
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	140	140	[Bar chart showing deflection temperature range from 140 to 140°C]																											
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	140	160	[Bar chart showing deflection temperature range from 140 to 160°C]																											
POM choc.....	[AM 3 384]	145	169	[Bar chart showing deflection temperature range from 145 to 169°C]																											
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	150	150	[Bar chart showing deflection temperature range from 150 to 150°C]																											
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	150	195	[Bar chart showing deflection temperature range from 150 to 195°C]																											
POM copo.....	[AM 3 384]	155	165	[Bar chart showing deflection temperature range from 155 to 165°C]																											
PP fibres naturelles.....		156	156	[Bar chart showing deflection temperature range from 156 to 156°C]																											
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	164	166	[Bar chart showing deflection temperature range from 164 to 166°C]																											
POM homo.....	[AM 3 384]	164	170	[Bar chart showing deflection temperature range from 164 to 170°C]																											
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	165	165	[Bar chart showing deflection temperature range from 165 to 165°C]																											
PBT.....	[AM 3 376]	170	170	[Bar chart showing deflection temperature range from 170 to 170°C]																											
PSU.....	[AM 3 392]	181	181	[Bar chart showing deflection temperature range from 181 to 181°C]																											
PSU chargé minéral.....	[AM 3 392]	181	181	[Bar chart showing deflection temperature range from 181 to 181°C]																											
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	182	182	[Bar chart showing deflection temperature range from 182 to 182°C]																											
PA 6 sec.....	[A 3 360]	185	185	[Bar chart showing deflection temperature range from 185 to 185°C]																											
PSU 30 % FC.....	[AM 3 392]	189	189	[Bar chart showing deflection temperature range from 189 to 189°C]																											
PEI.....		195	210	[Bar chart showing deflection temperature range from 195 to 210°C]																											
PEI minéral.....		200	210	[Bar chart showing deflection temperature range from 200 to 210°C]																											
PPS FV et minéral.....		200	280	[Bar chart showing deflection temperature range from 200 to 280°C]																											
PEI 30 % FV.....		205	212	[Bar chart showing deflection temperature range from 205 to 212°C]																											
PES.....	[AM 3 392]	210	220	[Bar chart showing deflection temperature range from 210 to 220°C]																											
PES 30 % FV.....	[AM 3 392]	210	220	[Bar chart showing deflection temperature range from 210 to 220°C]																											
PBT 30 % FV.....	[AM 3 370]	215	215	[Bar chart showing deflection temperature range from 215 to 215°C]																											
PES 30 % FC.....	[AM 3 392]	216	221	[Bar chart showing deflection temperature range from 216 to 221°C]																											
PEI FC.....		220	220	[Bar chart showing deflection temperature range from 220 to 220°C]																											
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	235	255	[Bar chart showing deflection temperature range from 235 to 255°C]																											
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	245	245	[Bar chart showing deflection temperature range from 245 to 245°C]																											
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	250	250	[Bar chart showing deflection temperature range from 250 to 250°C]																											
PAEK.....	[A 3 395]	250	250	[Bar chart showing deflection temperature range from 250 to 250°C]																											
PPS 40 % FV.....		270	280	[Bar chart showing deflection temperature range from 270 to 280°C]																											
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	285	285	[Bar chart showing deflection temperature range from 285 to 285°C]																											

En italique, les articles archivés.

Tableau 25 – Indice de fluidité, selon diverses normes (g/10 min)

Plastique	Article	Charge (kg)	Température (°C)	Mini	Maxi	Indice de fluidité (g/10 min)														
						0	10	20	30	40	50	60	70	80	90					
PC 3 % CNT .....	.....	1,2	300	0,9	0,9															
PC	[A 3 381]	1,2	300	3	17															
PA 3 % CNT .....	.....	1,2	300	13,2	13,2															
PC 2 % CNT .....	.....	1,2	300	16,9	16,9															
PA 2 % CNT .....	.....	1,2	300	29,2	29,2															
PE-HD	[AM 3 315]	2,16	190	< 0,1	5,5															
PE-BD	[AM 3 310]	2,16	190	0,2	70															
E/VA	[AM 3 310]	2,16	190	0,5	60															
POM homo	[AM 3 384]	2,16	190	1	65															
POM copo	[AM 3 384]	2,16	190	1	65															
E/MA	[AM 3 310]	2,16	190	2	10															
PE-t BD	[AM 3 310]	2,16	190	2	35															
PLA .....	.....	2,16	190	10	40															
PLA .....	.....	2,16	210	5	85															
PP copo	[AM 3 320]	2,16	230	0,25	35															
PP homo	[AM 3 320]	2,16	230	0,3	40															
LFRT PP 30 % FV longue	[AM 3 320]	2,16	230	2	2															
COPE Bio	[AM 3 401]	2,16	230	12	12															
COPE Bio	[AM 3 401]	2,16	240	11	11															
PE-HD	[AM 3 315]	5	190	0,15	18															
PS	[AM 3 340]	5	200	2	20															
PS choc	[AM 3 340]	5	200	3	20															
Polyphénylène autorenforcé .....	.....	5	380	8	15															
PLA fibres naturelles .....	.....	10	190	5	20															
ABS	[A 3 345]	10	220	2,5	30															
PP fibres naturelles .....	.....	10	220	7	18															
PAEK	[A 3 395]	10	400	20	90															
PE-HD	[AM 3 315]	21,6	190	4,5	10															
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	21,6	300	18	27															
PES	[AM 3 392]	21,6	300	20	30															
PSU	[AM 3 392]	21,6	300	40	70															
PPS 40 % FV .....	.....	21,6	300	> 60																
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	21,6	400	20	30															

4. Propriétés diélectriques

Tableau 26 – Résistivité superficielle, selon NF C 26-215 ou norme équivalente (Ω)

Plastique	Article	Mini (puissance de 10)	Maxi (puissance de 10)	Résistivité superficielle (Ω)						
				10 ¹²	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁶	10 ¹⁷	
PC 3 % CNT (1) .....	.....	3	4							
PP 5 % CNT (1) .....	.....	4	5							
PC 2 % CNT (1) .....	.....	4	5							
PP 3 % CNT (1) .....	.....	8	8							
PP 2 % CNT (1) .....	.....	10	11							
PA 6 30 % FV à 50 % HR .....	.....	12	12							
PA 6-6 30 % FV 50 % HR .....	.....	12	12							
PS choc	[AM 3 340]	12	> 12							
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	12	13							
PA 6 50 % HR .....	.....	12	14							
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	12	14							
PVC rigide	[AM 3 325]	13	13							
PCL (LCP)	[AM 3 380]	13	13							
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	13	> 13							
PS	[AM 3 340]	13	> 13							
PA transparent 50 % HR	[A 3 360]	13	> 13							
PAEK	[A 3 395]	13	> 13							
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	13	> 13							
PA 6-6 50 % HR .....	.....	13	14							
PA 4-6 50 % HR .....	.....	13	14							
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	13	16							
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	13	16							
PE-HD	[AM 3 315]	14	14							

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 26 – Résistivité superficielle, selon NF C 26-215 ou norme équivalente (Ω) (suite)

Plastique	Article	Mini (puissance de 10)	Maxi (puissance de 10)							
				10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	14	14							
PET pour films.....	[A 3 375]	14	14							
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	14	14							
PP homo.....	[AM 3 320]	14	> 14							
PP copo.....	[AM 3 320]	14	> 14							
E/TFE.....	[AM 3 390]	14	> 14							
ABS.....	[A 3 345]	14	15							
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	14	15							
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	14	15							
PA MXD-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	14	15							
POM homo.....	[AM 3 384]	14	15							
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	14	16							
PC.....	[AM 3 381]	15	15							
FEP.....	[AM 3 390]	15	15							
PBT.....	[AM 3 376]	15	> 15							
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	15	> 15							
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	15	16							
PPS FV et minéral.....		15	16							
PTFE.....	[A 3 390]	15	17							
PMMA.....	[A 3 350]	16	16							
POM copo.....	[AM 3 384]	16	16							
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	16	16							
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	16	16							
PI.....	[AM 3 398]	16	16							
PPS 40 % FV.....		16	17							
PFA.....	[A 3 390]	17	17							

En italique, les articles archivés.

Tableau 27 – Résistivité transversale, selon NF C 26-215 ou norme équivalente ($\Omega \cdot \text{cm}$)

Plastique	Article	Mini (puissance de 10)	Maxi (puissance de 10)												
				10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}			
PP 5 % CNT (1).....		1	1												
PC 3 % CNT (1).....		1	2												
PP 3 % CNT (1).....		2	3												
PC 2 % CNT (1).....		3	3												
PA 3 % CNT (1).....		3	4												
PEEK 30 % FC (1).....	[AM 3 394]	5	5												
PP 2 % CNT (1).....		6	7												
MPR (1).....	[AM 3 400]	8	8												
PA 2 % CNT (1).....		8	9												
TPU (1).....	[AM 3 400]	8	13												
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	10	13												
PVC plastifié.....	[AM 3 325]	10	16												
PVC plastifié chargé.....	[AM 3 325]	10	16												
TPE à base PVC.....	[AM 3 400]	10	16												
CAB.....		11	15												
Copolyesters COPE.....	[AM 3 400]	11	16												
PA 6 50 % HR.....		12	13												
PA 6-6 50 % HR.....		12	13												
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....		12	13												
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....		12	13												
PA 6 sec.....	[A 3 360]	12	14												
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	12	14												
PVDF.....	[AM 3 390]	12	14												
PA 6-6 30 % FV sec.....	[AM 3 360]	12	15												
PI antifriction.....		12	13												
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	13	13												
CA.....		13	13												
PP/EPDM-VD.....	[AM 3 400]	13	16												
PI 30 % FV.....	[AM 3 398]	13	16												
PCL 30 % FV.....	[AM 3 380]	13	17												
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	14	14												
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	14	14												
PCTFE.....	[AM 3 390]	14	15												
PBI.....		14	15												
PVCC.....		14	16												

En italique, les articles archivés.

(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 27 – Résistivité transversale, selon NF C 26-215 ou norme équivalente ($\Omega \cdot \text{cm}$) (suite)

Plastique	Article	Mini (puissance de 10)	Maxi (puissance de 10)																	
				10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}								
PI linéaires	[AM 3 398]	14	16																	
PEI 30 % FV		14	16																	
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	14	18																	
PAI 30 % FV		14	18																	
PVDC		15	15																	
PA 4-6 sec	[A 3 360]	15	15																	
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	15	15																	
POM homo	[AM 3 384]	15	15																	
POM copo	[AM 3 384]	15	15																	
PPE	[AM 3 392]	15	15																	
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	15	15																	
PS choc	[AM 3 340]	15	16																	
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	15	16																	
POM choc	[AM 3 384]	15	16																	
POM 30 % FV	[AM 3 384]	15	16																	
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	15	16																	
PPS 40 % FV		15	16																	
PPS FV et minéral		15	16																	
PVC	[AM 3 325]	15	16																	
PMMA	[A 3 350]	> 15	16																	
PET	[AM 3 376]	> 15	16																	
PBT	[AM 3 376]	> 15	16																	
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	> 15	16																	
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	> 15	16																	
E/TFE	[AM 3 390]	> 15	17																	
PEI minéral		15	15																	
CP		15	15																	
TPE styréniques (TPS)	[AM 3 400]	15	16																	
PAI antifriction		15	16																	
Polyphénylène autorenforcé		15	16																	
PEI		15	17																	
ABS	[A 3 345]	16	16																	
PC	[AM 3 381]	16	16																	
PC 30 % FV	[AM 3 381]	16	16																	
PES 30 % FV	[AM 3 392]	16	16																	
PS	[AM 3 340]	16	17																	
PSU	[AM 3 392]	16	17																	
PE-HD	[AM 3 315]	16	18																	
PFA	[AM 3 390]	16	18																	
PCL (LCP)	[AM 3 380]	16	16																	
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	16	16																	
SAN		16	16																	
ABS/PC		16	16																	
PMP		16	16																	
COC		16	16																	
PEEK/PBI		16	16																	
PEEK	[AM 3 394]	16	17																	
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	16	17																	
PAEK	[A 3 395]	> 16	17																	
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	> 16	17																	
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	> 16	17																	
PP homo	[AM 3 320]	> 16	18																	
PP copo	[AM 3 320]	> 16	18																	
PES	[AM 3 392]	17	17																	
PTFE	[AM 3 390]	17	18																	
FEP	[AM 3 390]	17	18																	
PAI		17	18																	
PE-BD	[AM 3 310]	18	18																	
PET pour films	[A 3 375]	18	18																	

En italique, les articles archivés.

Tableau 28 – Rigidité diélectrique, selon NF C 26-226 ou norme non équivalente (1) (kV/mm)

Plastique	Article	Mini	Maxi	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Copolyesters/COPE (2)	[AM 3 400]	1	20													
MPR (2)	[AM 3 400]	5	12													
CA (2)		8	15													
PVC plastifié		10	30													
PVC plastifié chargé		10	30													
PVC rigide	[AM 3 325]	10	40													
CAB		10	17													
TPE à base PVC	[AM 3 400]	10	30													
ABS	[AM 3 345]	12	20													
PS choc	[AM 3 340]	12	50													
CP		12	18													
SAN		12	24													
PPS FV et minéral		13	13													
PAS	[AM 3 392]	14,8	14,8													
PES 30 % FV	[AM 3 392]	14,8	19,7													
PMMA	[A 3 350]	15	22													
PA 6 50 % HR		15	30													
TPU	[AM 3 400]	15	50													
PES	[AM 3 392]	15,8	15,8													
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	16	16													
PAEK	[A 3 395]	16	17													
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	16	26													
E/MA	[AM 3 310]	16	43													
PS	[AM 3 340]	16	> 50													
PE-BD	[AM 3 310]	16	> 65													
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	16	45													
PSU	[AM 3 392]	16,7	17,1													
PPS 40 % FV		17	17													
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	17	18													
PA 6 sec	[A 3 360]	17	35													
PTFE	[AM 3 390]	17	36													
PE-HD	[AM 3 315]	17	> 65													
PEEK/PBI		17	17													
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	17,7	17,7													
POM choc	[AM 3 384]	19	19													
PEEK	[AM 3 394]	19	20													
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	19	20													
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	20	20													
Polyphénylène autoreforcé		20	20													
PEI minéral		20	25													
PVCC		20	60													
E/CTFE (2)	[AM 3 390]	20	80													
PCTFE	[AM 3 390]	21	21													
PBI		21	22													
PI	[AM 3 398]	22	22													
PAI		23	24													
PA 6-6 sec	[A 3 360]	24	24													
ABS/PC		24	24													
PA 4-6 30 % FV 50 % HR		24	29													
PET	[AM 3 376]	25	25													
PBT	[AM 3 376]	25	25													
TPE styréniques (TPS)	[AM 3 400]	25	26													
PA transparent 50 % HR	[A 3 360]	25	30													
PEI 30 % FV		25	30													
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	25	50													
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	25	50													
PEBA 25 à 42 Sh D	[A 3 360]	26	34													
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	28	28													
PEI		28	33													
PA 4-6 sec	[A 3 360]	29	29													
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	30	30													
PEBA 42 à 69 Sh D	[A 3 360]	30	30													
PA MXD-6 30 % FV sec	[A 3 360]	30	30													
PC	[AM 3 381]	30	30													
PC 30 % FV	[AM 3 381]	30	30													
PPE	[AM 3 392]	30	50													
PAI 30 % FV		32	33													
FEP	[AM 3 390]	34	34													
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	35	35													
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	35	35													
PCL (LCP)	[AM 3 380]	35	50													
PVDF	[AM 3 390]	36	36													
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	37	42													
PP homo	[AM 3 320]	40	40													

En italique, les articles archivés.

(1) Échantillons d'épaisseurs variées, et milieux de nature différente (air ou huile).

(2) Valeurs hors échelle.

Tableau 29 – Permittivité relative (ou constante diélectrique) à 50 Hz (ou fréquence non précisée) selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
PES 30 % FV.....	[AM 3 392]	3,9	3,9											
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	3,9	3,9											
PAI.....		3,9	4,2											
POM homo.....	[AM 3 384]	4	4											
POM copo.....	[AM 3 384]	4	4											
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	4,1	4,1											
PPS 40 % FV.....		4,1	4,1											
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4,1	7,1											
PAI 30 % FV.....		4,2	6,3											
PPS FV et minéral.....		4,3	4,3											
PA 4-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4,3	4,4											
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4,5	4,5											
TPU.....	[AM 3 400]	5	8											
TPU 20-30 % FV.....	[AM 3 400]	5	8											
PAI antifriction.....		5	8											
PA 6-6 50 % HR.....		6	6											
PA 6 sec.....	[A 3 360]	6,6	6,6											
PI antifriction.....		6,6	14											
PVDF.....	[AM 3 390]	8	8,5											
MPR.....	[AM 3 400]	9	11											
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....		9,7	9,8											
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....		11,9	16,3											
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....		12	12											
PA 6 50 % HR.....		13	13											
PCL 30 % FC (1).....		16	32											
PA 4-6 50 % HR.....		21	22											

En italique, les articles archivés.
(1) Valeurs hors échelle.

Tableau 30 – Permittivité relative (ou constante diélectrique) à 1 000 Hz selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente

Plastique	Article	Mini	Maxi	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PTFE.....	[AM 3 390]	2,1	2,1											
PE-BD.....	[AM 3 310]	2,3	2,3											
PE-HD.....	[AM 3 315]	2,3	2,5											
PS.....	[AM 3 340]	2,5	2,65											
PS choc.....	[AM 3 340]	2,5	2,7											
ABS.....	[A 3 345]	2,6	3,1											
E/TFE.....	[AM 3 390]	2,6	3,4											
PC.....	[AM 3 381]	3	3											
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	3	3											
Polyphénylène autorenforcé.....		3,11	3,11											
PET pour films.....	[AM 3 375]	3,2	3,2											
PSU.....	[AM 3 392]	3,2	3,2											
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	3,2	4											
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	3,3	3,3											
PBT.....	[AM 3 370]	3,3	3,5											
PVC.....	[AM 3 325]	3,4	3,5											
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	3,5	3,5											
PES.....	[AM 3 392]	3,5	3,5											
PAS.....	[AM 3 392]	3,5	3,5											
PI.....	[AM 3 398]	3,5	3,5											
PMMA.....	[A 3 350]	3,6	3,7											
POM homo.....	[AM 3 384]	3,7	3,7											
POM copo.....	[AM 3 384]	3,7	3,7											
POM choc.....	[AM 3 384]	3,7	3,7											
PA 11 ou 12 sec.....	[A 3 360]	3,7	3,8											
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	3,7	3,9											
PA 6 sec.....	[A 3 360]	3,7	6,2											
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	3,9	3,9											
PES 30 % FV.....	[A 3 392]	3,9	3,9											
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	3,9	4,1											
E/VA.....	[AM 3 310]	4	4											
PPS 40 % FV.....		4	4											
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4	6,4											
PET 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	4,2	4,2											
PA 4-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4,2	4,3											

En italique, les articles archivés.

Tableau 30 – Permittivité relative (ou constante diélectrique) à 1 000 Hz selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4,5	4,5											
PPS FV et minéral.....		4,6	5,1											
PA 6-6 50 % HR.....		5,2	5,2											
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....		7,8	7,8											
PVDF.....	[AM 3 390]	8,3	8,3											
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....		8,9	9,6											
PA 6 50 % HR.....		10,7	10,7											
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....		10,7	10,7											
PA 4-6 50 % HR.....		11	11											

En italique, les articles archivés.

Tableau 31 – Permittivité relative (ou constante diélectrique) à 1 MHz selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente

Plastique	Article	Mini	Maxi	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
PTFE.....	[AM 3 390]	2,1	2,1															
PP copo.....	[AM 3 320]	2,1	2,3															
PP homo.....	[AM 3 320]	2,2	2,3															
E/MA.....	[AM 3 310]	2,2	2,5															
PE-BD.....	[AM 3 310]	2,28	2,3															
PE-HD.....	[AM 3 315]	2,3	2,5															
PS.....	[AM 3 340]	2,5	2,65															
PS choc.....	[AM 3 340]	2,5	2,7															
PMMA.....	[AM 3 350]	2,6	2,6															
E/VA.....	[AM 3 310]	2,6	2,8															
E/TFE.....	[A 3 390]	2,6	3,4															
PPE.....	[AM 3 392]	2,64	2,64															
PET pour films.....	[AM 3 375]	2,9	2,9															
PC.....	[AM 3 381]	2,9	2,9															
ABS.....	[A 3 345]	2,9	3															
PA 6-6 sec.....	[A 3 360]	2,9	3,3															
PPE 30 % FV.....	[AM 3 392]	2,92	2,92															
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec.....	[A 3 360]	3	3															
PSU 30 % FV.....	[AM 3 392]	3	3															
PVC rigide.....	[AM 3 325]	3	3,2															
PA transparent 50 % HR.....	[A 3 360]	3	3,4															
Polyphénylène autoreforcé.....		3,01	3,01															
PBT.....	[AM 3 376]	3,1	3,1															
PSU.....	[AM 3 392]	3,1	3,1															
PA 6-6 50 % HR.....		3,2	3,2															
PC 30 % FV.....	[AM 3 381]	3,3	3,3															
PAEK.....	[A 3 395]	3,3	3,3															
PES.....	[AM 3 392]	3,5	3,5															
PES 30 % FV.....	[AM 3 392]	3,5	3,5															
PAS.....	[AM 3 392]	3,5	3,5															
PA 4-6 sec.....	[A 3 360]	3,5	3,6															
PA 6 sec.....	[A 3 360]	3,6	3,6															
POM autolubrifié PTFE.....	[AM 3 384]	3,6	3,6															
PA 6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	3,6	3,8															
PBT 30 % FV.....	[AM 3 376]	3,6	4,3															
POM homo.....	[AM 3 384]	3,7	3,7															
POM copo.....	[AM 3 384]	3,7	3,7															
POM choc.....	[AM 3 384]	3,7	3,7															
PA 6-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	3,7	3,8															
PAEK 30 % FV.....	[A 3 395]	3,8	3,8															
PA 6 50 % HR.....		3,9	3,9															
PA 6 30 % FV à 50 % HR.....		3,9	3,9															
PA 6-6 30 % FV 50 % HR.....		4	4															
PA 4-6 30 % FV sec.....	[A 3 360]	4	4															
PPS 40 % FV.....		4	4															
PA 4-6 50 % HR.....		4,5	4,5															
PPS FV et minéral.....		4,5	4,5															
PA 4-6 30 % FV 50 % HR.....		4,6	4,7															
POM 30 % FV.....	[AM 3 384]	4,8	4,8															
PEBA 42 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	6	7,5															
PVDF.....	[AM 3 390]	6,4	8															
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	7	8,6															

En italique, les articles archivés.

Tableau 33 – Facteur de dissipation diélectrique (ou tangente de l’angle de pertes) à 1 000 Hz, selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente

Plastique	Article	Min (en 10 ⁻⁴)	Maxi (en 10 ⁻⁴)	10 ⁻⁵ 2 4 6 8 10 ⁻⁴ 2 4 6 8 10 ⁻³ 2 4 6 8 10 ⁻² 2 4 6 8 10 ⁻¹ 2 4 6 8 1															
				[Graphique à échelle logarithmique montrant la plage de variation du facteur de dissipation diélectrique pour chaque matériau]															
PTFE	[AM 3 390]	0,3	2	[Graphique]															
PS	[AM 3 340]	0,6	0,6	[Graphique]															
PFA	[AM 3 390]	1	1	[Graphique]															
PE-HD	[AM 3 315]	1	1	[Graphique]															
PS choc	[AM 3 340]	1	2,5	[Graphique]															
PE-BD	[AM 3 310]	2	2	[Graphique]															
PP homo	[AM 3 320]	2	4,5	[Graphique]															
PP copo	[AM 3 320]	2	4,5	[Graphique]															
FEP	[AM 3 390]	3	3	[Graphique]															
E/CTFE	[AM 3 390]	5	5	[Graphique]															
PPE	[AM 3 392]	7	7	[Graphique]															
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	8	8	[Graphique]															
E/TFE	[AM 3 390]	8	8	[Graphique]															
PC	[AM 3 381]	10	10	[Graphique]															
PC 30 % FV	[AM 3 381]	10	10	[Graphique]															
PSU	[AM 3 392]	10	10	[Graphique]															
PPS 40 % FV		15	30	[Graphique]															
PES 30 % FV	[AM 3 392]	19	19	[Graphique]															
PES	[AM 3 392]	20	20	[Graphique]															
POM 30 % FV	[AM 3 384]	23	23	[Graphique]															
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	25	25	[Graphique]															
POM homo	[AM 3 384]	27	27	[Graphique]															
POM copo	[AM 3 384]	27	27	[Graphique]															
PPS FV et minéral		30	65	[Graphique]															
PET 30 à 35 % FV	[AM 3 376]	40	40	[Graphique]															
PET pour films	[A 3 375]	52	52	[Graphique]															
Polyphénylène autorenforcé		70	70	[Graphique]															
ABS	[A 3 345]	90	140	[Graphique]															
PA 6-6 30 % FV sec	[A 3 360]	100	100	[Graphique]															
PBT	[AM 3 376]	100	100	[Graphique]															
PBT 30 % FV	[AM 3 376]	100	110	[Graphique]															
PA 4-6 30 % FV sec	[A 3 360]	110	130	[Graphique]															
PA 11 ou 12 sec	[A 3 360]	120	120	[Graphique]															
PA 4-6 sec	[A 3 360]	120	140	[Graphique]															
PA 6-6 30 % FV 50 % HR		130	130	[Graphique]															
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12 sec	[A 3 360]	150	150	[Graphique]															
PA 6 30 % FV sec	[A 3 360]	150	700	[Graphique]															
PVDF	[AM 3 390]	180	180	[Graphique]															
PA 6-6 sec	[A 3 360]	210	210	[Graphique]															
PVC rigide	[AM 3 325]	250	250	[Graphique]															
PCTFE	[AM 3 390]	250	250	[Graphique]															
PA transparent 50 % HR	[A 3 360]	280	280	[Graphique]															
PMMA	[A 3 350]	500	500	[Graphique]															
PA 6 sec	[A 3 360]	650	650	[Graphique]															
PA 6-6 50 % HR		850	850	[Graphique]															
PA 6 30 % FV à 50 % HR		1 500	1 500	[Graphique]															
PA 6 50 % HR		1 700	1 700	[Graphique]															
PA 4-6 30 % FV 50 % HR		1 700	2 600	[Graphique]															
PA 4-6 50 % HR		1 900	3 500	[Graphique]															

En italique, les articles archivés.

Tableau 34 – Facteur de dissipation diélectrique (ou tangente de l’angle de pertes) à 1 MHz selon NF C 26-230 ou CEI 250 ou norme équivalente

Plastique	Article	Min (en 10 ⁻⁴)	Maxi (en 10 ⁻⁴)	10 ⁻⁵ 2 4 6 8 10 ⁻⁴ 2 4 6 8 10 ⁻³ 2 4 6 8 10 ⁻² 2 4 6 8 10 ⁻¹ 2 4 6 8 1															
				[Graphique à échelle logarithmique montrant la plage de variation du facteur de dissipation diélectrique pour chaque matériau]															
PS choc	[AM 3 340]	0,4	4	[Graphique]															
PS	[AM 3 340]	0,7	0,7	[Graphique]															
PTFE	[AM 3 390]	0,7	0,7	[Graphique]															
PE-HD	[AM 3 315]	1	7	[Graphique]															
PE-BD	[AM 3 310]	2	2	[Graphique]															
PP 20 à 30 % FV	[AM 3 320]	2,62	23	[Graphique]															
PP homo	[AM 3 320]	3	3	[Graphique]															
PP copo	[AM 3 320]	3	3	[Graphique]															
PPE	[AM 3 392]	9	9	[Graphique]															
E/MA	[AM 3 310]	10	110	[Graphique]															
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	15	15	[Graphique]															
PPS 40 % FV		15	100	[Graphique]															
PAEK	[A 3 395]	20	20	[Graphique]															

En italique, les articles archivés.

Tableau 36 – Indice d’oxygène selon NF EN ISO 4589 (indice de classement : T 51-071) ou norme équivalente (suite)

Plastique	Article	Mini	Maxi	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
PAI 30 % FV.....	.....	51	51																			
PAI FC.....	.....	52	52																			
Polyphénylène autorenforcé.....	.....	55	55																			
PBI.....	.....	58	58																			
E/CTFE.....	[AM 3 390]	60	60																			
PTFE.....	[AM 3 390]	95	95																			
FEP.....	[AM 3 390]	95	95																			
PFA.....	[AM 3 390]	95	95																			
PCTFE.....	[AM 3 390]	95	95																			

En italique, les articles archivés.

Tableau 37 – Composants d’origine renouvelable

Plastique	Article	Mini	Mini	Exemples de taux de matière renouvelable (%)
CA.....	.....	Significatif	Significatif	
CAB.....	.....	Significatif	Significatif	
PEBA Bio.....	[AM 3 401]	Significatif	Significatif	62 à 97
COPE Bio.....	[AM 3 401]	Significatif	Significatif	20 à 60
TPU Bio.....	[AM 3 401]	Significatif	Significatif	30 à 90
PE Bio.....	.....	Significatif	Significatif	
PLA.....	.....	Significatif	Significatif	
Dérivés de l’amidon.....	.....	Significatif	Significatif	
WPC PE 40 bois.....	.....	Significatif	Significatif	40
WPC PE 60 bois.....	.....	Significatif	Significatif	60
WPC PP 40 bois.....	.....	Significatif	Significatif	40
WPC PP 60 bois.....	.....	Significatif	Significatif	60
WPC PS 20 bois.....	.....	Significatif	Significatif	20
WPC PS 40 bois.....	.....	Significatif	Significatif	40
WPC PLA.....	.....	Significatif	Significatif	
Plastiques renforcés fibres naturelles.....	.....	Significatif	Significatif	
PA 11 ou 12.....	[A 3 360]	Négligeable	Significatif	
PA 6-9 ou 6-10 ou 6-12.....	[A 3 360]	Négligeable	Significatif	45 à 63
PA transparent.....	[A 3 360]	Négligeable	Significatif	54
PEBA 25 à 42 Sh D.....	[A 3 360]	Négligeable	Significatif	
PEBA 55 à 69 Sh D.....	[A 3 360]	Négligeable	Significatif	
PVC plastifié.....	[AM 3 325]	Négligeable	Limité	
PVC plastifié chargé.....	[AM 3 325]	Négligeable	Limité	
TPE à base PVC.....	[AM 3 400]	Négligeable	Limité	
PE très BD.....	[AM 3 310]	Négligeable	Négligeable	
PE-BD.....	[AM 3 310]	Négligeable	Négligeable	
PE-HD.....	[AM 3 315]	Négligeable	Négligeable	
EVA.....	[AM 3 310]	Négligeable	Négligeable	
EMA.....	[AM 3 310]	Négligeable	Négligeable	
PP homo.....	[AM 3 320]	Négligeable	Négligeable	
PP copo.....	[AM 3 320]	Négligeable	Négligeable	
PP 40 % talc.....	[AM 3 320]	Négligeable	Négligeable	
PVC rigide.....	[AM 3 325]	Négligeable	Négligeable	
PVDC.....	.....	Négligeable	Négligeable	
PS.....	[AM 3 340]	Négligeable	Négligeable	
PS choc.....	[AM 3 340]	Négligeable	Négligeable	
ABS.....	[A 3 345]	Négligeable	Négligeable	
PMMA.....	[A 3 350]	Négligeable	Négligeable	
PA 6.....	[A 3 360]	Négligeable	Négligeable	
PA 6-6.....	[A 3 360]	Négligeable	Négligeable	
PA 6 30 % FV.....	[A 3 360]	Négligeable	Négligeable	
PA 6-6 30 % FV.....	[A 3 360]	Négligeable	Négligeable	
PETP.....	[AM 3 376]	Négligeable	Négligeable	
PBTP.....	[AM 3 376]	Négligeable	Négligeable	
PETP 30 à 35 % FV.....	[AM 3 376]	Négligeable	Négligeable	
PBTP 30 % FV.....	[AM 3 376]	Négligeable	Négligeable	
PET pour films.....	[A 3 375]	Négligeable	Négligeable	
PC.....	[AM 3 381]	Négligeable	Négligeable	
PC 30 % FV.....	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	
POM homo.....	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	
POM copo.....	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	

Négligeable : utilisation éventuelle d’adjuvants mineurs d’origine renouvelable.
Limité : utilisation éventuelle de taux significatifs de plastifiants ou autres additifs d’origine renouvelable.
Significatif : en général 10 % minimum de produits d’origine renouvelable, renforts inclus.

Tableau 37 – Composants d’origine renouvelable (suite)

Plastique	Article	Mini	Mini	Exemples de taux de matière renouvelable (%)
POM choc	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	
POM 30 % FV	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	
POM autolubrifié PTFE	[AM 3 384]	Négligeable	Négligeable	
PPE	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PPE 30 % FV	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PPE 30 % FC	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PTFE	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
FEP	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
PFA	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
PCTFE	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
PVDF	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
ETFE	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
ECTFE	[AM 3 390]	Négligeable	Négligeable	
PSU	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PSU 30 % FV	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PSU 30 % FC	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PSU chargé minéral	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PES	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PES 30 % FV	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PES 30 % FC	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PAS	[AM 3 392]	Négligeable	Négligeable	
PAEK	[A 3 395]	Négligeable	Négligeable	
PAEK 30 % FV	[A 3 395]	Négligeable	Négligeable	
PAEK 30 % FC	[A 3 395]	Négligeable	Négligeable	
PPS 40 % FV .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PPS FV et minéral .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PI	[AM 3 398]	Négligeable	Négligeable	
PI 40 % graphite	[AM 3 398]	Négligeable	Négligeable	
TPE styréniques (TPS)	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
TPE oléfiniques (TPO)	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
PP/EPDM-VD	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
MPR	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
TPU	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
TPU 20-50 % FV	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
Copolyesters/COPE	[AM 3 400]	Négligeable	Négligeable	
PVCC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEEK	[AM 3 394]	Négligeable	Négligeable	
PEEK 30 % FV	[AM 3 394]	Négligeable	Négligeable	
PEEK 30 % FC	[AM 3 394]	Négligeable	Négligeable	
PCL (LCP)	[AM 3 380]	Négligeable	Négligeable	
PCL 30 % FV	[AM 3 380]	Négligeable	Négligeable	
PCL 30 % minéral	[AM 3 380]	Négligeable	Négligeable	
PCL 30 % FC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PI linéaires	[AM 3 398]	Négligeable	Négligeable	
PI 30 % FV	[AM 3 398]	Négligeable	Négligeable	
PI 30 % FC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PI antifriction .....	.....	Négligeable	Négligeable	
SAN .....	.....	Négligeable	Négligeable	
ABS/PC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PMP .....	.....	Négligeable	Négligeable	
COC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PAI .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PAI 30 % FV .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PAI FC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PAI antifriction .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEI .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEI minéral .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEI 30 % FV .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEI FC .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PBI .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEEK/PBI .....	.....	Négligeable	Négligeable	
PEEK/PBI FC .....	.....	Négligeable	Négligeable	

Négligeable : utilisation éventuelle d’adjuvants mineurs d’origine renouvelable.
Limite : utilisation éventuelle de taux significatifs de plastifiants ou autres additifs d’origine renouvelable.
Significatif : en général 10 % minimum de produits d’origine renouvelable, renforts inclus.

bm5560

Modélisation et calcul des assemblages vissés. Généralités

Date de publication : 10/07/2007

Par :

Jean GUILLOT

Professeur émérite, Institut national des sciences appliquées de Toulouse (INSAT)

Cet article fait partie de la base documentaire :

Assemblages et fixations mécaniques

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 : 02/06/2015

Pour le compte : 7200034092 - // nc COMPTE INTERNE TI // 195.25.183.153

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

Modélisation et calcul des assemblages vissés. Généralités

par **Jean GUILLOT**

Professeur émérite

Institut national des sciences appliquées de Toulouse (INSAT)

1. Normalisation	BM 5 560 - 2
1.1 Vis (NF EN ISO 898-1).....	— 4
1.2 Écrous (NF EN ISO 898-2).....	— 5
1.3 Rondelles.....	— 8
1.4 Remarque sur les essais de caractérisation.....	— 8
1.5 Marquage des éléments.....	— 8
1.6 Boulon à serrage contrôlé (NF E 27-701, E 27-711).....	— 8
2. Détermination du couple de serrage	— 9
2.1 Expression de $C1$	— 9
2.2 Expression de $C2$	— 10
2.3 Expression du couple de serrage C	— 10
2.4 Incertitude sur la valeur de la précontrainte installée Q	— 10
3. Résistance statique d'un boulon	— 11
3.1 État de contrainte dans la vis.....	— 11
3.2 Résistance des vis.....	— 13
3.2.1 Traction axiale.....	— 13
3.2.2 Traction et torsion combinées.....	— 13
3.2.3 Traction, torsion et flexion combinées.....	— 13
3.3 Résistance à l'arrachement des filets.....	— 14
3.4 Contrainte maximale sous tête de vis ou sous écrou.....	— 16
4. Résistance à la fatigue d'un boulon	— 17
5. Amélioration de la tenue en fatigue d'un boulon	— 19
6. Conclusion	— 19
Références bibliographiques	— 20

Ce dossier traite de la normalisation des éléments filetés utilisés pour la réalisation de liaisons fortement sollicitées et de leurs caractéristiques de résistance statique et en fatigue. Il est conçu pour que l'ingénieur dispose des principales données lui permettant de développer un calcul pertinent, en utilisant les modèles et les méthodes développés dans les dossiers suivants.

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Définition
A	%	allongement après rupture
A_s	mm ²	section résistante du filetage
C	N · mm	couple de serrage
D_t	mm	diamètre du trou
E	MPa	module d'élasticité longitudinale
F	N	effort
F_B, F_P	N	forces de traction (ou de compression) du boulon et des pièces
H, H_1	mm	dimensions caractéristiques du filet ISO fonction du pas $P (H = 0,866 P$ et $H_1 = 0,541 2 P)$
HB	sans dimension	dureté Brinell
HV	sans dimension	dureté Vickers
HRB	sans dimension	dureté Rockwell B
HRC	sans dimension	dureté Rockwell C
K	N/mm	coefficient de raideur
K_t	sans dimension	coefficient de concentration de contrainte
KCU	daJ/cm ²	résilience (entaille Charpy U)
KU	J	résilience (section de l'éprouvette normalisée = 0,5 cm ²)
L	mm	longueur
M	N · mm	moment
M_B	N · mm	moment de torsion appliqué sur la vis
N	sans dimension	nombre de sollicitations
P	mm	pas
Q	N	force de serrage des pièces
R_e	MPa	limite apparente d'élasticité
R_m	MPa	résistance à la traction
R_p	MPa	limite conventionnelle d'élasticité
a, b	mm	longueurs
d (ou D)	mm	diamètre nominal
d_1 (ou D_1)	mm	diamètre intérieur de l'écrou
d_2 (ou D_2)	mm	diamètre sur flancs
d_3	mm	diamètre du noyau de la vis
d_s	mm	diamètre du cylindre de section A_s
e	mm	distance entre la résultante des forces de contact F_P et l'axe neutre
f, f'	sans dimension	coefficients de frottement
f_1	sans dimension	coefficient de frottement vis/écrou
f_2	sans dimension	coefficient de frottement pièce (ou rondelle)/écrou
l	mm	longueur des pièces dans le modèle considéré
l_0, l_1, l_2	mm	longueurs de différentes parties dans le boulon
m	mm	excentration de la force extérieure F_E par rapport à l'axe principal
p	Pa	pression
p_c	Pa	pression de contact
p_m	Pa	pression de matage
r	mm	rayon à fond de filet d'un filetage
r_0, r_P	mm	rayons de courbure
s	mm	excentration de la résultante des forces de contact F_C
α	degré	angle moyen de l'hélice

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Définition
α_1, α_2	sans dimension	coefficients de sécurité
α_s	sans dimension	coefficient d'incertitude de serrage
θ	degré	angle de rotation
$\rho_1, \rho_2 (\rho_m)$	mm	rayons limites de la surface d'appui de l'écrou (ρ_m valeur moyenne)
σ	MPa	contrainte de traction dans le noyau
σ_a	MPa	contrainte alternée (dynamique)
σ_e	MPa	contrainte normale équivalente
σ_D	MPa	contrainte limite de fatigue
σ_m	MPa	contrainte moyenne (statique)
τ	MPa	contrainte de torsion dans le noyau
φ_1	degré	angle de frottement fictif

Liste des indices	
B	pour le boulon
c	contact
max	maximal
min	minimal
m ou moy	moyenne
nom	nominal
i	intérieur
t	tension
f	flexion
e	écrou
v	vis
u	utile

1. Normalisation

Compte tenu de leur importance dans la construction mécanique, les éléments de fixation filetés (vis, goujons, écrous) font l'objet de très nombreuses normes. Nous n'envisagerons que le cas des éléments de dimensions métriques et nous ferons référence aux normes les plus générales : normes françaises (NF), normes européennes (NF EN), normes internationales (NF EN ISO) [1].

Ces recommandations concernent en particulier les matériaux, les spécifications d'essais, les dimensions et tolérances, les caractéristiques mécaniques, les outillages de serrage.

Parmi ces normes, celles relatives aux spécifications dimensionnelles et mécaniques des éléments de fixation d'usage général NF E 27-005 et 009, NF EN ISO 898-1 et 2, et aux boulons à serrage contrôlés : NF E 27-701, 702, 711, sont particulièrement importantes pour le calcul des assemblages.

Elles définissent :

- les **couples de dimensions (diamètre nominal et pas)** pour la boulonnerie à pas gros et à pas fin (pas normal) (tableaux 1 et 2) ;
- la **section résistante A_s des filetages** (figure 1) : section d'une tige cylindrique de résistance équivalente à celle de la partie filetée de la vis ; cette donnée essentielle permet de passer, au cours des essais réalisés sur la pièce filetée (ou au cours des calculs), des efforts aux contraintes (tableaux 1 et 2) :

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (1)$$

Tableau 1 – Filetage à pas gros (1)

Diamètre nominal (2) $d = D$ (mm)	Pas P (mm)	Valeurs calculées correspondantes					
		Diamètre sur flancs $d_2 = D_2$ (mm)	Diamètre du noyau de la vis d_3 (mm)	Diamètre intérieur de l'écrou D_1 (mm)	Rayon à fond de filet (3) r (mm)	Diamètre résistant d_s (mm)	Section résistante A_s (mm ²)
1	0,25	0,838	0,693	0,729	0,036	0,765	0,460
(1,1)	0,25	0,938	0,793	0,829	0,036	0,865	0,588
1,2	0,25	1,038	0,893	0,929	0,036	0,965	0,732
1,4	0,3	1,205	1,032	1,075	0,043	1,119	0,983
1,6	0,35	1,373	1,171	1,221	0,050	1,272	1,27
1,8	0,35	1,573	1,371	1,421	0,050	1,472	1,70
2	0,4	1,740	1,509	1,567	0,058	1,625	2,07
2,2	0,45	1,908	1,648	1,713	0,065	1,778	2,48
2,5	0,45	2,208	1,948	2,013	0,065	2,078	3,39
3	0,55	2,643	2,325	2,459	0,072	2,484	4,85
3,5	0,6	3,110	2,764	2,850	0,087	2,937	6,78
4	0,7	3,545	3,141	3,242	0,101	3,343	8,78
(4,5)	0,75	4,013	3,580	3,688	0,108	3,796	11,3
5	0,8	4,480	4,019	4,134	0,116	4,249	14,2
6	1	5,351	4,773	4,918	0,144	5,062	20,1
(7)	1	6,351	5,773	5,918	0,144	6,062	28,9
8	1,25	7,188	6,467	6,647	0,180	6,827	36,6
10	1,5	9,026	8,160	8,376	0,216	8,593	58,0
12	1,75	10,863	9,853	10,106	0,253	10,358	84,3
14	2	12,701	11,546	11,835	0,289	12,124	115
16	2	14,701	13,546	13,835	0,289	14,124	157
18	2,5	16,376	14,933	15,294	0,361	15,655	192
20	2,5	18,376	16,933	17,294	0,361	17,655	245
22	2,5	20,376	18,933	19,294	0,361	19,655	303
24	3	22,052	20,320	20,753	0,433	21,186	353
27	3	25,052	23,320	23,752	0,433	24,186	459
30	3,5	27,727	25,706	26,211	0,505	26,716	561
33	3,5	30,727	28,706	29,211	0,505	29,716	694
36	4	33,402	31,093	31,670	0,577	32,247	817
39	4	36,402	34,093	34,670	0,577	35,247	976

(1) **Désignation** : par exemple, M 8 (diamètre nominal d de 8 mm) sans indication de pas.

(2) **Éviter les valeurs en maigre et surtout entre parenthèses.**

(3) r = valeur calculée du rayon de l'outil neuf à profil circulaire (donnée à titre indicatif).

Tableau 2 – Filetage à pas fin (1)

Diamètre nominal (2) $d = D$ (mm)	Pas P (mm)	Valeurs calculées correspondantes					
		Diamètre sur flancs $d_2 = D_2$ (mm)	Diamètre du noyau de la vis d_3 (mm)	Diamètre intérieur de l'écrou D_1 (mm)	Rayon à fond de filet (3) r (mm)	Diamètre résistant d_s (mm)	Section résistante $A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$ (mm ²)
8	1	7,351	6,773	6,918	0,144	7,062	39,2
10	1,25	9,188	8,467	8,647	0,180	8,827	61,2
12	1,25	11,188	10,467	10,647	0,180	10,827	92,1
14	1,5	13,026	12,160	12,376	0,216	12,593	125
16	1,5	15,026	14,160	14,376	0,216	14,593	167
18	1,5	17,026	16,160	16,376	0,216	16,593	216
20	1,5	19,026	18,160	18,376	0,216	18,593	272
22	1,5	21,026	20,160	20,376	0,216	20,593	333
24	2	22,701	21,546	21,835	0,289	22,124	384
27	2	25,701	24,546	24,835	0,289	25,124	496
30	2	28,701	27,546	27,835	0,289	28,124	621
33	2	31,701	30,546	30,835	0,289	31,124	761
36	3	34,052	32,320	32,752	0,433	33,186	865
39	3	37,052	35,320	35,752	0,433	36,186	1 028

- (1) Désignation : par exemple, M8x1 (diamètre nominal $d = 8$ mm et $P = 1$ mm).
 (2) Employer de préférence les diamètres en caractères gras.
 (3) r = valeur calculée du rayon de l'outil neuf à profil circulaire (donnée à titre indicatif).

– les essais de caractérisation :

- essais de caractérisation du métal sur éprouvette ($R_{m \min}$, $R_{e \min}$, A_{\min} , KCU_{\min} à 20 °C),
- essais de caractérisation de l'élément sur vis ou goujon entier ($R_{m \max}$, résistance à la charge d'épreuve, résistance à la traction avec cale biaisée),
- essais de fatigue sous charge axiale ; la norme NF E 27-009 définit parfaitement les conditions d'essai et de présentation des résultats ; toutefois, aucune donnée concernant les valeurs limites des contraintes de fatigue n'est indiquée ;

– les classes de qualité des articles de boulonnerie en acier : chaque classe de qualité définit les caractéristiques des matériaux exigées pour les vis et goujons (tableau 3) et pour les écrous (tableau 5) dans le cadre des essais de caractérisation.

1.1 Vis (NF EN ISO 898-1)

La classe de qualité est symbolisée par deux nombres (par exemple : 10.9). Le premier nombre correspond sensiblement au 1/100 de la résistance minimale à la traction (exprimée en MPa) et le second indique sensiblement 10 fois la valeur du rapport entre la limite minimale d'élasticité et la résistance minimale à la traction de la vis ou du goujon.

Exemple : pour une vis de classe 10.9, on a :

$$R_{m \min} \approx 100 \times 10 = 1\ 000 \text{ MPa}$$

$$\frac{R_{e \min}}{R_{m \min}} = \frac{9}{10} = 0,9$$

d'où $R_{e \min} = 0,9 \times 1\ 000 = 900 \text{ MPa}$

Les figures 2, 3 et 4 définissent la forme et le tableau 4 les dimensions utiles pour les calculs des principales vis d'assemblage.

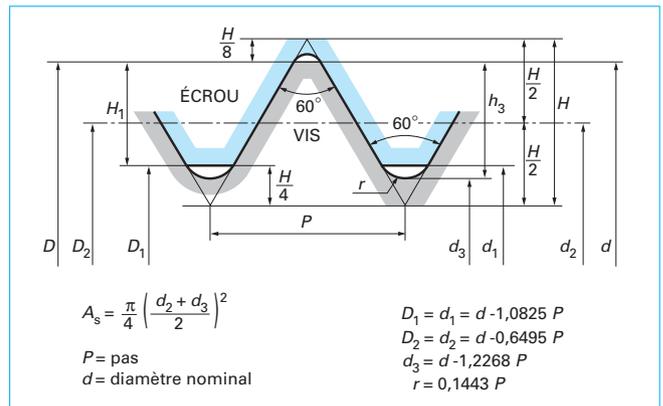


Figure 1 – Profil ISO : définition des caractéristiques géométriques et de la section résistante A_s d'un filetage

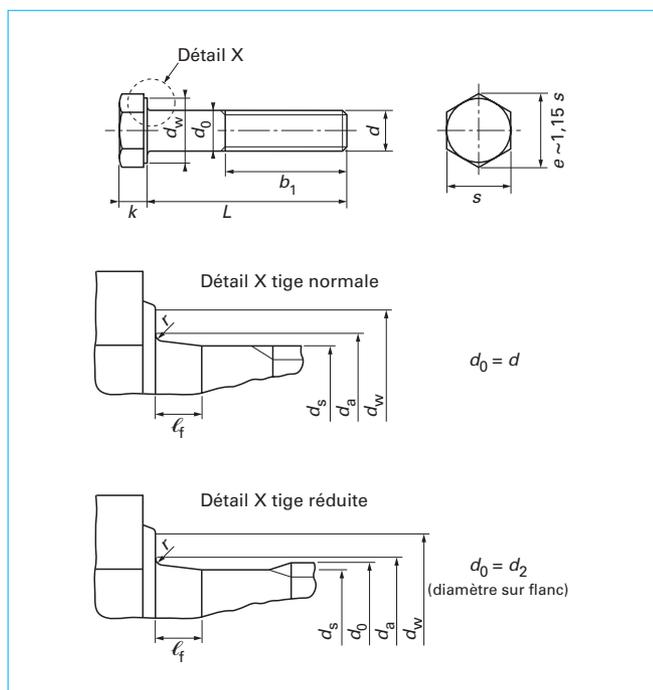
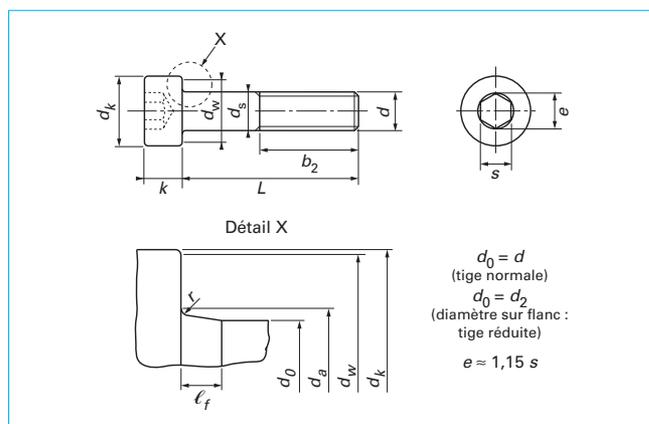
On peut remarquer, pour ces trois types de vis, la forme du raccordement avec la tête, étudiée pour diminuer la concentration de contrainte et, dans le tableau 4, les dimensions minimales de la zone de contact sous tête ($d_{w \min}$) qui est plus petite pour les vis H à collerette que pour les vis CHC et les vis H à embase cylindrotronconique. Cette dimension est essentielle pour le calcul du risque de matage sous tête.

Désignation : une vis à tête cylindrique à six pans creux de filetage **M5**, de longueur $l = 20$ mm et de classe de qualité 12.9, est désignée comme suit :

Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762-M5X20-12.9.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques des vis et goujons en fonction de leur classe de qualité
 (d'après norme NF EN ISO 898-1)

Caractéristique mécanique contrôlée		Classe de qualité des vis et goujons											
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6;8	8.8		9.8	10.9	12.9	
								$d < 16$	$d > 16$				
Résistance à la traction R_m (en MPa)	nom	300	400	420	500	520	600	800	800	900	1 000	1 200	
	minimale	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220	
Dureté Vickers HV	min.	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	
	max.	220					250	320	335	360	380	435	
Dureté Brinell HB	min.	90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366	
	max.	209					238	304	318	342	361	314	
Dureté Rockwell	min	HRB	52	67	71	79	82	89	-	-	-	-	-
		HRC	-	-	-	-	-	-	22	23	28	32	39
	max	HRB	95					99,5	-	-	-	-	-
		HRC	-	-	-	-	-	-	32	34	37	39	44
Limite inférieure d'écoulement R_{eL} (en MPa)	min.	190	240	340	300	420	480	-	-	-	-	-	
Limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0,2}$ (en MPa)	min.	-	-	-	-	-	-	640	660	720	940	1 100	
Contrainte à la charge d'épreuve (en MPa)		180	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970	
Allongement pour-cent après rupture A :	min.	25	22	-	20	-	-	12	12	10	9	8	
Résistance à la traction avec cale biaisée		Pour vis entières : valeurs minimales de résistance à la traction.											
Résilience KU à + 20 °C (en J)	min.	-	-	-	25	-	-	30	30	25	20	15	
Solidité de la tête		Aucune rupture											
Décarburation : profondeur maximale de décarburation (en mm)		-	-	-	-	-	-	-	-	0,015	-	-	


Figure 2 – Définition géométrique des vis à tête hexagonale (H)
 d'après la norme NF EN ISO 4014

Figure 3 – Vis à tête à six pans creux (CHC)
 d'après la norme NF EN ISO 4762

1.2 Écrous (NF EN ISO 898-2)

La **classe de qualité** est symbolisée par un nombre (par exemple 10) qui correspond sensiblement au 1/100 de la contrainte minimale à la traction (exprimée en MPa) d'une vis qui, associée à l'écrou, peut être chargée jusqu'à sa limite apparente minimale d'élasticité.

Exemple : une vis de classe 10.9 et un écrou de classe 10 constituent une fixation pouvant être chargée jusqu'à la limite apparente minimale d'élasticité de la vis.

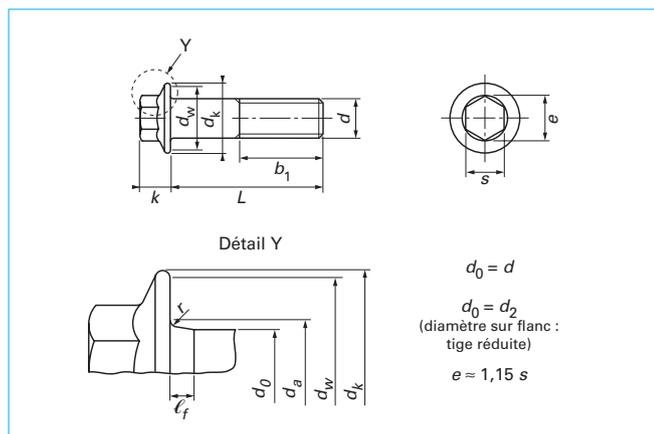


Figure 4 – Définition géométrique des vis à tête hexagonale à embase cylindro-tronconique (H embase) d'après la norme NF EN 1665

Les écrous, pour les assemblages fortement chargés, auront une hauteur $\geq 0,8 d$ (longueur utile du filetage $\geq 0,6 d$). Ils sont désignés par un nombre indiquant la classe de qualité maximale des vis avec lesquelles ils peuvent être montés.

La défaillance des éléments de fixation par excès de serrage peut prendre la forme soit d'une rupture du corps de la vis, soit d'un arrachement des filetages de la vis, soit d'un arrachement du filetage de l'écrou.

L'amorçage de l'arrachement des filetages peut être difficile à détecter. Il est donc important que les assemblages filetés soient conçus de manière que, en cas de dépassement du chargement limite, ce soit toujours la rupture du corps de la vis qui se produise.

Pour cela, une vis (M5 à M39) assemblée avec un écrou de classe de qualité équivalente, conformément au tableau 5, est destinée à fournir un assemblage capable d'assurer une contrainte dans la vis équivalente à la contrainte à la charge d'épreuve sans risque d'arrachement des filets. Pour satisfaire cette condition essentielle, les hauteurs d'écrous ne peuvent plus avoir un rapport fixe avec le diamètre de la vis et sont données dans la figure 5 et le tableau 6. Ces valeurs garantissent que, dans les cas de tolérances

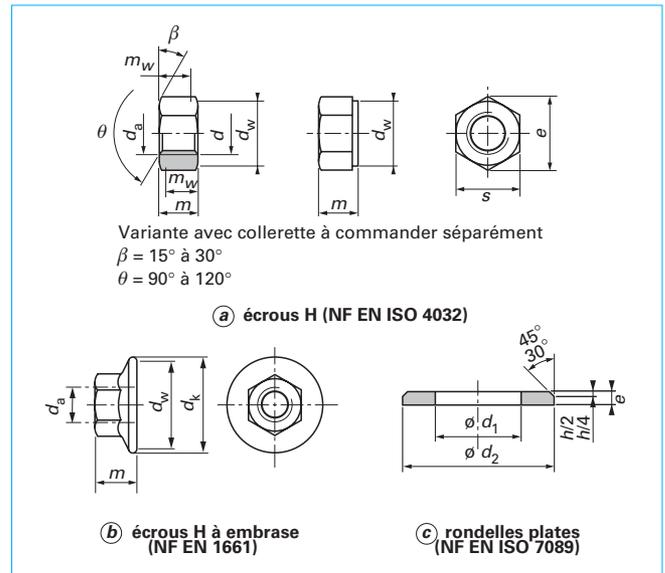
Tableau 4 – Principales dimensions des vis d'assemblages (d'après les normes ISO 4014, ISO 4762, EN 1665)

d	M5	M6	M8	M10	M12	(M14)	M16	M20	M24	M30										
P	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	3	3,5										
$d_{a\max}$	5,7	6,8	9,2	11,2	13,7	15,7	17,7	22,4	26,4	33,4										
H	$d_{w\min}$	6,88	8,88	11,63	14,63	16,63	19,64	22,49	28,19	33,16	42,75									
	s_{nom}	8	10	13	16	18	21	24	30	36	46									
	K_{nom}	3,5	4	5,3	6,4	7,5	8,8	10	12,5	15	18,7									
CHC	$d_{w\min}$	8,03	9,38	12,33	15,33	17,23	20,17	23,17	28,87	34,81	43,61									
	$d_{k\max}$	8,5	10	13	16	18	21	24	30	36	45									
	s_{nom}	4	5	6	8	10	12	14	17	19	22									
H à embase	$d_{w\min}$	9,8	12,2	15,8	19,6	23,8	27,6	31,9	39,9	-	-									
	$d_{k\max}$	11,8	14,2	18	22,3	26,6	30,5	35	43	-	-									
	s_{nom}	8	10	13	16	18	21	24	30	-	-									
K_{nom}	5,8	6,6	8,1	10,4	11,8	15,4	13,7	18,9	-	-										
Longueurs filetées : b_1 pour vis H et H à embase ; b_2 pour vis CHC																				
L_{nom}	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2
25	16																			
30	16	22	18																	
35	16	22	18	24																
40	16	22	18	24	22	28														
45	16	22	18	24	22	28	26	32												
50	16	22	18	24	22	28	26	32	30											
55			18	24	22	28	26	32	30	36										
60			18	24	22	28	26	32	30	36	34	40								
65					22	28	26	32	30	36	34	40	38	44						
70					22	28	26	32	30	36	34	40	38	44						
80					22	28	26	32	30	36	34	40	38	44	46	52				
90							26	32	30	36	34	40	38	44	46	52	54	60		
100							26	32	30	36	34	40	38	44	46	52	54	60		
110									30	36	34	40	38	44	46	52	54	60	66	72
120									30	36	34	40	38	44	46	52	54	60	66	72
130											40	40	44	44	52	52	60	60	72	72
140											40	40	44	44	52	52	60	60	72	72
150													44	44	52	52	60	60	72	72

Vis entièrement filetée

Tableau 5 – Système de désignation pour écrous de hauteur nominale $\geq 0,8 d$

Classe de qualité	Vis associée		Type d'écrou	
			Style 1	Style 2
	Classe de qualité	Gamme de filetage	Gamme de filetage	
4	3.6, 4.6, 4.8	> M16	> M16	
5	3.6, 4.6, 4.8	\leq M16	\leq M39	
	5.6, 5.8	\leq M39		
6	6.8	\leq M39	\leq M39	
8	8.8	\leq M39	\leq M39	> M16
				\leq M39
9	9.8	\leq M16		\leq M16
10	10.9	\leq M39	\leq M39	
12	12.9	\leq M39	\leq M6	\leq M39


Figure 5 – Principales dimensions des écrous et des rondelles
Tableau 6 – Dimension des écrous, des rondelles, des trous de passage pour vis

ÉCROU											
d		M5	M6	M8	M10	M12	(M14)	M16	M20	M24	M30
P		0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	3	3,5
s_{nom}		8	10	13	16	18	21	24	30	36	46
$d_{a,max}$		5,75	6,75	8,75	10,8	13	15,1	17,3	21,6	25,9	32,4
H	$d_{w,min}$	6,9	8,9	11,6	14,6	16,6	19,6	22,5	27,7	33,3	42,8
	m_{max}	4,7	5,2	6,8	8,4	10,8	12,8	14,8	18	21,5	25,6
	m_{min}	4,4	4,9	6,44	8,04	10,37	12,1	14,1	16,9	20,2	24,3
H embase	$d_{w,min}$	9,8	12,2	15,8	19,6	23,8	27,6	31,9	39,9	–	–
	m_{nom}	5	6	8	10	12	14	16	20	–	–
	$d_{k,max}$	11,8	14,2	18	22,3	26,6	30,5	35	43	–	–
RONDELLES PLATES											
(L'absence de chanfrein intérieur ne permet pas une utilisation sous la tête de vis)											
d_1	min	5,3	6,4	8,4	10,5	13	15	17	21	25	31
	max	5,48	6,62	8,62	10,77	13,27	15,27	17,27	21,33	25,33	31,39
d_2	min	9,64	11,57	15,57	19,48	23,48	27,48	29,48	36,38	43,38	55,26
	max	10	12	16	20	24	28	30	37	44	56
e_{nom}		1	1,6	1,6	2	2,5	2,5	3	3	4	4
TROUS DE PASSAGE											
(On doit prévoir du côté tête de vis un chanfrein de diamètre extérieur $\geq d_{a,max}$ (tableau 4)).											
Pour vis D_t série	Fine	5,3	6,4	8,4	10,5	13	15	17	21	25	31
	Moyenne	5,5	6,6	9	11	13,5	15,5	17,5	22	26	33

dimensionnelles les plus défavorables (minimum de matière) et de résistance (maximum de R_m pour la vis), on aura au moins 10 % de rupture des vis si, par inadvertance, il y a eu surserrage. On peut donc en conclure que, à classe de qualité égale, l'écrou est toujours plus résistant que la vis ; il ne sera donc pas utile de vérifier sa résistance.

Désignation : un écrou hexagonal, style 1, de filetage M12 et de classe de qualité 8 est désigné comme suit :
Écrou hexagonal ISO 4032-M12-8

1.3 Rondelles

Ces pièces comportent deux classes de qualité définies par leur dureté : 200 HV et 300 HV.

Dans tous les cas, lorsqu'on installe une rondelle entre un écrou et une pièce à serrer ou entre la tête de vis et la pièce, il est bon de vérifier que sa dureté minimale est égale ou supérieure à celle de la vis associée.

Désignation : une rondelle plate, série normale, grade A, de diamètre nominal 8 mm, de classe de dureté 200 HV, en acier est désignée comme suit :
Rondelle ISO 7089-8-200 HV

1.4 Remarque sur les essais de caractérisation

Parmi tous les essais de caractérisation décrits dans la norme NF EN ISO 898-1, trois, destinés à la vérification des caractéristiques en traction des vis, sont particulièrement importants pour les calculs de résistance.

■ Essai de résistance à la traction sur éprouvette usinée

Il permet de contrôler les caractéristiques suivantes :

- résistance à la traction R_m ;
- limite inférieure d'écoulement R_{el} ou limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, $R_{e0,2}$;
- allongement pour cent après rupture ;
- coefficient de striction.

L'éprouvette est usinée dans la vis à caractériser (figure 6), la principale condition géométrique à respecter étant que le diamètre d_0 soit inférieur au diamètre intérieur du filetage ($d_0 < d_3$).

■ Essai de résistance à la traction sur vis et goujons entiers

Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction R_m , la section résistante nominale A_s servant de base pour son calcul. La rupture doit se produire dans la partie lisse (tige) ou dans la partie filetée libre de la vis (ou du goujon) et non au raccordement de la tête et de la tige.

■ Essai de charge d'épreuve sur vis entière

Cet essai est destiné à vérifier que, sous une charge égale à $0,9 R_{p0,2} \times A_s$, l'allongement résiduel est négligeable.

Nous voyons que le premier essai est destiné à caractériser de façon classique les propriétés de résistance du matériau « à cœur » et, notamment, de garantir une certaine ductilité.

Les deux autres essais, qui sont réalisés sur vis ou goujons entiers, équipés de leurs écrous, permettent de rendre les calculs de résistance simples. En effet, le matériau de la vis, du fait du procédé de fabrication (forgée, roulée, traitée), n'est pas isotrope. D'autre part, les défauts de forme dus aux filets ainsi que l'introduction de la charge par l'écrou, concentrée sur les premiers filets, font de cet ensemble un dispositif très difficile à calculer avec

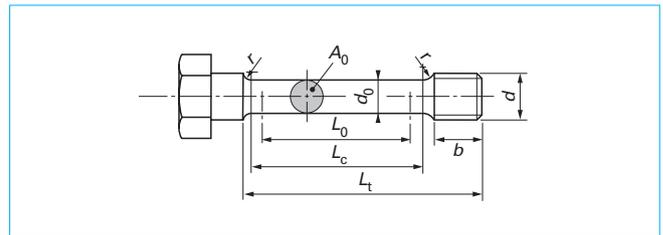


Figure 6 – Éprouvette usinée pour essai de traction (NF EN 898-1)

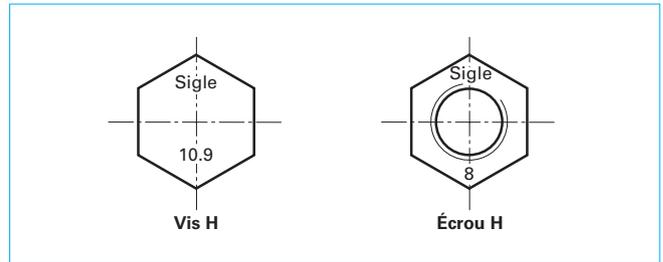


Figure 7 – Exemple de marquage

précision à partir de l'état de contrainte au point le plus chargé. Ajoutons qu'une plastification des premiers filets en prise est pratiquement toujours présente, sans que le comportement global de l'ensemble sous chargement statique en soit modifié.

Alors, les essais sur éléments entiers permettent d'introduire ces « défauts » au niveau de l'éprouvette, ce qui ramène le calcul de la partie filetée à celui d'une pièce cylindrique de section « équivalente » à la section résistante A_s (cf. figure 1).

La résistance à la rupture de l'ensemble est alors garantie par le respect de la contrainte $R_{m, \min}$ et l'absence de déformation résiduelle après application d'une contrainte égale à $0,9 R_{el}$ ou $0,9 R_{e0,2}$ suivant la classe de qualité concernée (cf. tableau 3).

On voit donc que la classe de qualité associée à la notion de section résistante A_s (section théorique donnant la même résistance que la partie filetée) et aux conditions de définition des écrous (classe de qualité et hauteur minimale) permet de caractériser facilement la résistance de l'ensemble vis-écrou (boulon).

1.5 Marquage des éléments

C'est le fabricant de vis et d'écrous qui garantit les caractéristiques mécaniques associées à la classe de qualité. Pour cela, chaque élément de boulonnerie doit comporter, forgé en creux ou en relief, l'indication de la classe de qualité et le sigle du fabricant (figure 7).

1.6 Boulon à serrage contrôlé (NF E 27-701, E 27-711)

Bien qu'ils ne fassent pas l'objet d'une norme ISO, ces boulons, destinés à l'exécution des constructions métalliques, nous paraissent particulièrement intéressants.

Ils sont composés d'une vis H à collerette, de deux rondelles et d'un écrou et ne concernent que deux classes de qualité 8.8 et 10.9 et la série de diamètres de 10 à 30 mm.

Leur première particularité est géométrique : si pour la classe 8.8 la cote sur plat de la tête H et de l'écrou (clé) est celle d'une vis ISO de même diamètre, pour la classe 10.9 cette cote est celle de la vis ISO de diamètre immédiatement supérieur. Ceci permet d'utiliser une clé de dimension supérieure pour installer un couple de serrage 25 % plus grand.

D'autre part, on associe obligatoirement à la vis deux rondelles traitées ($300 \leq HV \leq 360$) qui augmentent de manière importante la surface de contact avec les pièces. Cela permet de maintenir des pressions de matage admissibles pour les matériaux de construction métallique (aciers : S235, S355, S420).

Exemple : boulon HR 10.9 M 20.8

$$A_s = 245 \text{ mm}^2 \quad A_c \text{ tête-rondelle min} = 202 \text{ mm}^2$$

$$A_c \text{ rondelle-pièce} = 712 \text{ mm}^2$$

Pour le boulon chargé à $R_e = 900 \text{ MPa}$ on a :

$$p_c \text{ tête/rondelle} = 900 \times \frac{245}{202} = 1\,091 \text{ MPa}$$

$$p_c \text{ tête/pièce} = 900 \times \frac{245}{712} = 310 \text{ MPa}$$

avec A_c surface de contact,
 p_c pression de contact.

On remarque ici un problème qui se pose avec tous les assemblages utilisant des qualités de vis élevées, et qui concerne le risque de perte de précontrainte par matage. Ici la rondelle est traitée ($HV_{\min} = 300$) et elle doit être suffisamment épaisse pour répartir la charge (cf. dossier [BM 5 561]).

■ Aptitude à l'emploi

Pour chaque lot de fabrication, les boulons doivent satisfaire à un essai d'aptitude à l'emploi réalisé par le fabricant et qui consiste à vérifier la qualité de l'ensemble vis-écrou-rondelles lors d'une mise en précontrainte de l'assemblage par rotation de l'écrou.

Deux conditions sont à vérifier.

1. L'allongement rémanent des vis sous une charge d'épreuve correspondant à 80 % de la limite conventionnelle d'élasticité des vis doit être inférieur ou égal à 0,02 %.

2. L'allongement rémanent des vis sous une charge d'épreuve correspondant à la limite conventionnelle d'élasticité doit être inférieur ou égal à 0,2 %.

D'autre part, une courbe d'essai « couple-tension » doit être réalisée et le coefficient moyen K et sa dispersion calculée sur 3 essais doivent être fournis par le fabricant :

$$K = \frac{C \times 10^3}{0,9 d R_e A_s} \quad (2)$$

Ce coefficient permet à l'utilisateur d'installer, avec une bonne précision, la précontrainte Q désirée par serrage au couple.

On a alors :

couple de serrage :

$$C = 10^{-3} K d Q \quad (3)$$

2. Détermination du couple de serrage

Pour réaliser un assemblage boulonné, on applique en général à l'écrou (ou à la tête de la vis) un couple moteur de serrage C à l'aide d'une clé (figure 8). Le couple résistant égal et de signe contraire résulte des actions sur l'écrou des forces de contact des filets de la vis et des pièces assemblées (ou de la rondelle).

On peut écrire :

$$C = C_1 + C_2$$

avec C_1 couple dû aux forces de contact des filets de la vis sur l'écrou,

C_2 couple dû aux forces de contact de la pièce (ou de la rondelle) sur l'écrou.

2.1 Expression de C_1

On utilise couramment l'expression suivante [3] :

$$C_1 = Q r_m \tan(\alpha + \varphi_1) \quad (4)$$

avec Q force de serrage des pièces,

r_m rayon moyen du filet,

α angle moyen de l'hélice (figure 9),

φ_1 angle de frottement fictif tel que $\tan \varphi_1 = f_1 = f / \cos \beta$,

f coefficient de frottement vis/écrou.

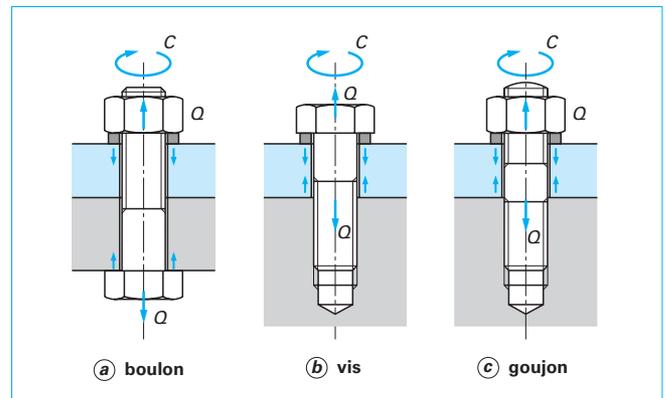


Figure 8 – Détermination du couple de serrage

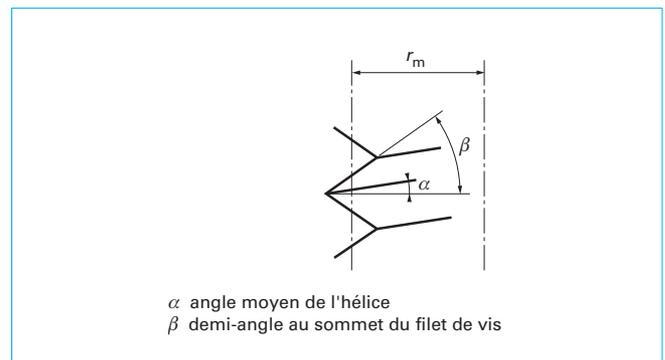
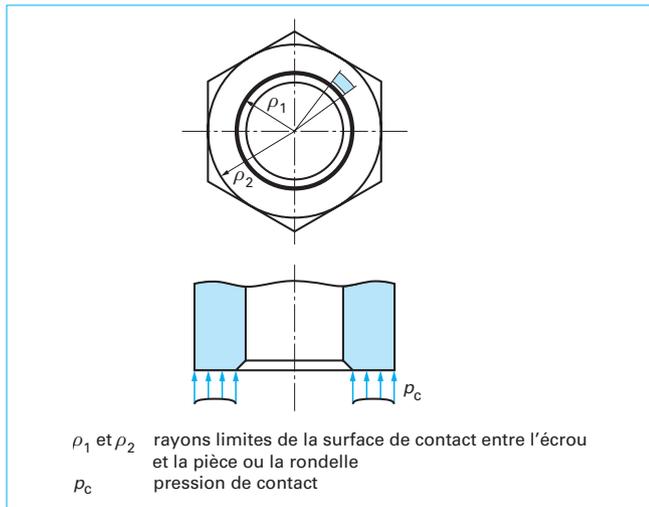


Figure 9 – Définition du filet : calcul du couple C_1


 Figure 10 – Calcul du couple de frottement C_2

2.2 Expression de C_2

On a :

$$C_2 = Q \rho_m f_2 \quad (5)$$

avec f_2 coefficient de frottement pièce (ou rondelle)/écrou,

$$\rho_m = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2) \text{ rayon moyen de la zone de contact (figure 10).}$$

Compte tenu de la faible largeur de la zone de contact, cette expression simplifiée est tout à fait suffisante.

Par contre, il faut prendre garde au fait que ρ_1 et ρ_2 peuvent prendre des valeurs différentes suivant les situations.

Par exemple, pour un écrou (figure 10), ρ_1 peut être défini par le chanfrein de l'écrou ou par le rayon du trou de passage (tableau 6).

2.3 Expression du couple de serrage C

Le couple de serrage s'exprime donc sous la forme suivante :

$$C = Q r_m \tan(\alpha + \varphi_1) + Q \rho_m f_2$$

En exprimant que les angles α et φ_1 sont petits et en introduisant le pas du filetage P avec $P = \pi d_2 \tan \alpha$ et $\tan \varphi_1 = f_1 = f / \cos \beta$, on obtient :

$$C = Q \left(\frac{P}{2\pi} + f_1 r_m + f_2 \rho_m \right) \quad (6)$$

expression tout à fait générale et qui peut être utilisée pour tous les types de filetages (NF E 03-002). D'autre part, elle met bien en évidence les trois composantes du couple de serrage :

- $\frac{QP}{2\pi}$: couple qui produit la mise sous tension Q du boulon et assure le serrage des pièces assemblées (couple utile) ;
- $Q f_1 r_m$: couple qui sert à vaincre le frottement des filets de l'écrou sur la vis ;
- $Q f_2 \rho_m$: couple qui sert à vaincre le frottement de l'écrou sur la rondelle ou sur les pièces.

Pour les assemblages filetés normalisés (profil ISO cf. figure 1), on peut exprimer le couple de serrage sous la forme pratique suivante :

$$C = Q (0,16 P + 0,583 d_2 f + \rho_m f_2) \quad (7)$$

Cette expression est obtenue en exprimant les termes de la formule (6) en fonction des dimensions caractéristiques du filetage ISO (d_2 et P définis figure 1).

Remarque : importance relative des différents termes

Considérons une vis M12 avec un serrage par boulon H et un coefficient moyen de frottement $f = f_2 = 0,15$.

On a : $P = 1,75$; $d_2 = 10,863$; $\rho_m \approx 7,75$.

On obtient : $(0,16 P) Q = 0,28 Q = C_u$ (couple utile).

$(0,583 d_2 f) Q = 0,95 Q = 3,4 C_u$ (couple de frottement dans les filets).

$(\rho_m f_2) Q = 1,16 Q = 4,15 C_u$ (couple de frottement écrou-pièce).

On remarque que les couples de frottement sont toujours bien plus grands que le couple utile et donc que la majeure partie du couple de serrage C sert à vaincre les frottements.

On a, bien sûr, toujours intérêt à diminuer ce couple pour faciliter la mise en précontrainte de l'assemblage, mais ce n'est pas un inconvénient majeur. **C'est la variabilité des coefficients de frottement qui entraîne l'incertitude sur la précontrainte installée qui représente le problème majeur du serrage par le moyen le plus simple qui est la mesure du couple.**

D'autre part, cette situation est très bénéfique pour la stabilité de l'assemblage et la sécurité au desserrage.

Ces expressions sont entachées d'une certaine erreur due aux différentes approximations réalisées. Toutefois, il est facile d'écrire les expressions exactes et de montrer que l'erreur totale introduite reste dans tous les cas inférieure à 1% [4]. Celle-ci est tout à fait négligeable par rapport aux dispersions dues aux variations du coefficient de frottement et à l'imprécision des moyens de serrage.

2.4 Incertitude sur la valeur de la précontrainte installée Q

Lors du serrage initial, on trouve deux causes importantes d'erreur [5] :

- l'incertitude sur les valeurs du coefficient de frottement f (tableau 7) ; pour les pièces assemblées en acier, on pourra utiliser les mêmes valeurs pour f et pour f_2 ;
- l'incertitude sur le couple de serrage appliqué (tableau 8).

Cela va se traduire, pour les moyens de serrage classiques, par une dispersion importante sur la valeur installée de la précontrainte Q (la valeur installée correspond à la valeur qui existe réellement dans l'assemblage).

Exemple : pour une vis HM de 20 mm de diamètre, phosphatée, huilée, serrée avec une clé dynamométrique réglée pour donner un couple moyen $C_m = 370 \text{ N} \cdot \text{m}$, on obtient :

$$76\,618 \text{ N} < Q < 111\,511 \text{ N}$$

soit une dispersion de $\pm 19\%$ autour de la valeur moyenne de Q .

Cet exemple montre bien que **l'amélioration de la précision du serrage est un des problèmes fondamentaux de la mise en œuvre des assemblages boulonnés modernes.**

Les coefficients de frottement dépendent essentiellement des états de surface, des revêtements (généralement anticorrosion) et des conditions de lubrification. Il est très difficile de les fixer *a priori* et, chaque fois que cela est possible, il convient de les mesurer dans les conditions réelles de mise en œuvre.

Tableau 7 – Coefficient de frottement f pour quelques modes de finition et de lubrification du couple vis/écrou [5]

Traitement de surface		Coefficient de frottement		
Vis	Écrou	Non huilé	Huilé	Graissé au MoS ₂
Phosphatée	néant	0,14 à 0,21	0,14 à 0,17	0,10 à 0,11
Électrozinguée (8 µm)	néant	0,13 à 0,18	0,13 à 0,17	
Électrozinguée (8 µm)	Électrozingué (5 µm)	0,13 à 0,18	0,14 à 0,19	
Cadmiée (7 µm)	néant	0,08 à 0,12	0,08 à 0,11	
Cadmiée (7 µm)	Cadmié (7 µm)	0,08 à 0,12	0,10 à 0,15	

Tableau 8 – Ordre de grandeur des dispersions de couple obtenues en fabrication avec des moyens de serrage traditionnels [5]

Moyen de serrage	Incertitude sur le couple
Clé dynamométrique dans les deux tiers supérieurs de l'échelle	± 10 %
Visseuses rotatives avec étalonnage	± 15 %
Clé à choc avec étalonnage spécifique et adaptation de rigidité	± 25 %
Clé à fourche ou clé à choc sans étalonnage spécifique (clé à main)	± 40 %

Tableau 9 – Valeurs usuelles des coefficients de frottement

Coefficients de frottement f, f_2	Matériaux et revêtements	Lubrification
0,06 à 0,10	Métal glacé Phosphaté	Lubrifiants solides MoS ₂ , graphite, PTFE sous forme de vernis
0,08 à 0,16	Couche galvanisée Mince couche de zinc lamellaire	Graisses au MoS ₂ ou au graphite Huile EP (extrême pression)
0,14 à 0,24	Métal brut Usinage fin Phosphaté Couche galvanisée	Condition de livraison : légèrement huilé
0,20 à 0,35	Surface grenailée et galvanisation à chaud	Sans
0,30 à 0,43	Couche galvanisée Peinture	

Le tableau 9 donne des valeurs usuelles en fonction de différents états des matériaux et des revêtements et pour des conditions de lubrification classiques. Les lubrifiants qui résistent aux extrêmes pressions sont les mieux adaptés. Toutefois, le problème n'est pas forcément d'avoir un coefficient de frottement très faible mais d'avoir un ensemble matériaux/lubrifiant qui donne une faible dispersion du coefficient de frottement.

D'une manière pratique, on globalise l'incertitude sur le coefficient de frottement et l'incertitude sur le moyen de serrage en

utilisation industrielle dans un seul coefficient de serrage α_s tel que :

$$Q_{\max} = \alpha_s Q_{\min} \quad (8)$$

avec Q_{\min} précontrainte de montage minimale exigée,
 Q_{\max} précontrainte maximale possible au montage.

Le tableau 10 permet de choisir la méthode de serrage convenable ainsi que les outils de serrage appropriés dont dépend le coefficient α_s .

On règle l'outil de serrage pour une précontrainte moyenne :

$$Q_m = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2} \quad (9)$$

3. Résistance statique d'un boulon

3.1 État de contrainte dans la vis

Comme nous l'avons déjà mentionné, la répartition des contraintes dans la vis est particulièrement perturbée par de nombreuses variations de formes. Les points les plus sensibles sont situés au raccordement tête-fût, au raccordement fût-partie filetée et dans la liaison vis-écrou [10] et figure 11.

Compte tenu de la géométrie des vis normalisées, le point le plus critique se situe toujours au niveau du premier filet en prise (figure 12) ; c'est la conséquence de la répartition non uniforme de la charge entre les filets de la vis. On estime que le premier filet engagé dans l'écrou, pour un écrou normal, supporte environ 34 % de la charge totale (cf. figure 23) ; cette concentration d'effort est essentiellement due à deux phénomènes :

- l'existence du jeu qui entraîne un contact « progressif » du filet de l'écrou avec celui de la vis ;
- le fait qu'au niveau du premier filet on ait les déformations relatives les plus grandes (allongement maximal de la vis et compression maximale de l'écrou).

Au point le plus chargé du pied du premier filet, on a un état complexe de contrainte (traction, flexion, cisaillement). Certains auteurs préconisent d'en tenir compte en introduisant un coefficient de majoration de la contrainte nominale de tension compris entre 4 et 5 pour un filet ISO à pas gros.

Nous ne pensons pas qu'un calcul tenant compte d'un hypothétique coefficient de surcontrainte soit judicieux. En effet, les simulations par éléments finis [11] montrent que le gradient de contrainte à fond de filet est très grand (cf. figure 19). On atteint donc la plastification pour des charges faibles, mais celle-ci reste très localisée et seul un calcul par la mécanique linéaire de la rupture pourrait donner satisfaction.

Tableau 10 – Valeur du coefficient d’incertitude de serrage α_s d’après [2]

Valeur du coefficient d’incertitude de serrage α_s	Dispersion $\frac{\alpha_s - 1}{\alpha_s + 1} = \frac{\Delta Q}{2Q_m}$	Procédé de serrage	Observations (1)
1,05 à 1,2	± 2 % à ± 10 %	Mesure de l’allongement par ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrage nécessaire • Visserie de précision • Réservé aux laboratoires d’essais
1,1 à 1,5	± 5 % à ± 20 %	Mesure mécanique de l’allongement	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance précise de la souplesse de la vis nécessaire • La précision dépend de la longueur de vis
1,2 à 1,4	± 9 % à ± 17 %	Serrage à la limite d’élasticité, motorisé ou manuel	<ul style="list-style-type: none"> • Réservé à des vis admettant une grande déformation plastique • Précision donnée par la dispersion de la limite d’élasticité du lot de vis
1,2 à 1,4	± 9 % à ± 17 %	Serrage à l’angle, motorisé ou manuel	<ul style="list-style-type: none"> • Étalonnage nécessaire • Précision plus grande pour les assemblages longs (grand angle de rotation)
1,2 à 1,6	± 9 % à ± 23 %	Serrage hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> • Étalonnage et contrôle de la pression <ul style="list-style-type: none"> – valeurs plus faibles pour vis longues ($l_s/d < 5$) ; – valeurs plus grandes pour vis courtes ($l_s < 2$).
1,4 à 1,6	± 17 % à ± 23 %	Serrage au couple par clé dynamométrique, clé à signal ou visseuse de précision avec mesure dynamique du couple	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination du couple de serrage moyen par essais : <ul style="list-style-type: none"> – valeurs faibles pour assemblages raides ; – valeurs élevées pour assemblages souples.
1,6 à 2,0	± 23 % à ± 33 %	Serrage au couple par clé dynamométrique à déclenchement, clé à signal ou visseuse à mesure dynamique du couple	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation du couple par estimation des coefficients de frottement (tableau 9)
1,7 à 2,5	± 26 % à ± 43 %	Serrage commandé par le couple de la visseuse	<ul style="list-style-type: none"> • Application du couple de serrage recommandé comme réglage de la visseuse
2,5 à 4	± 43 % à ± 60 %	Clé à choc ou visseuse à impulsions	

(1) l_s = longueur de serrage.

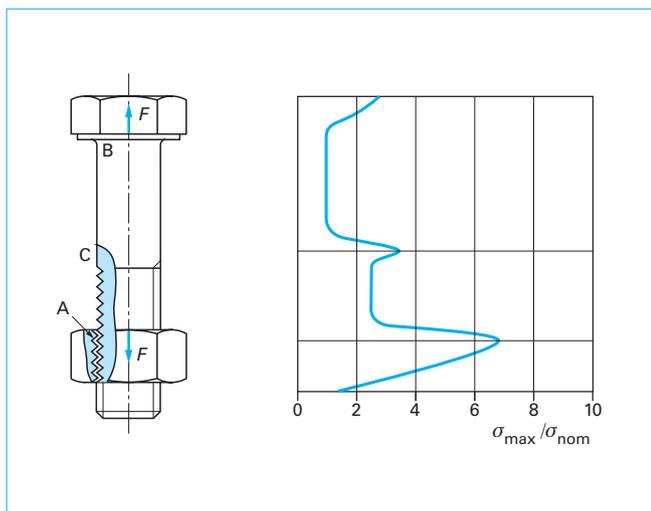


Figure 11 – Répartition de contrainte dans un boulon [10]

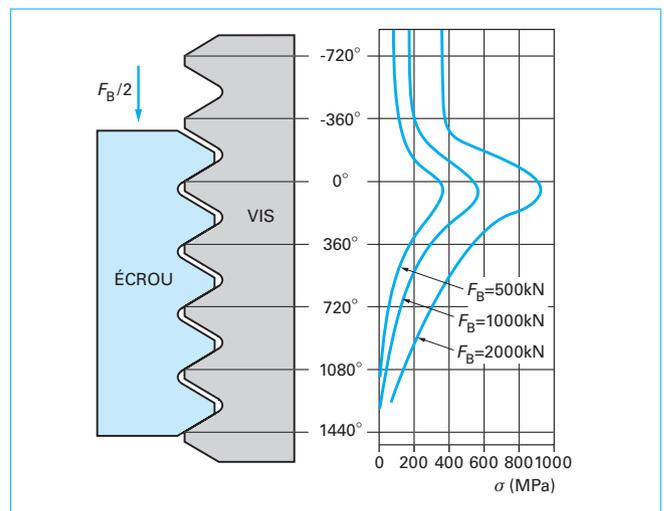


Figure 12 – Répartition de la charge entre les filets de l’écrou et de la vis [15]

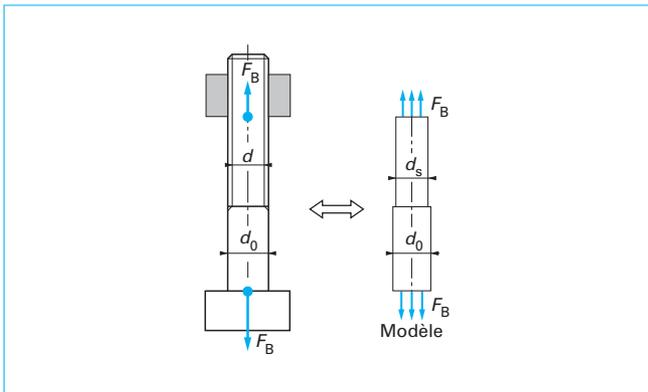


Figure 13 – Notion de vis de « même résistance »

En fait, pour un changement statique, ces déformations plastiques très localisées ne modifient pas le comportement élastique global de la pièce.

Il n'en est pas de même en fatigue où la zone plastifiée à chaque cycle de chargement va entraîner l'initiation d'une fissure. Les ruptures en fatigue se produiront donc toujours dans le premier filet en prise et pour des variations de contrainte nominale faible.

3.2 Résistance des vis

Compte tenu des remarques précédentes, le calcul s'appuie sur l'essai à charge d'épreuve. On remplace donc l'ensemble complexe qu'est le boulon par une pièce de résistance équivalente composée de deux parties cylindriques l'une de diamètre d_s (diamètre de la section résistante A_s) pour la partie filetée et l'autre de section d_0 pour la partie lisse de la tige (figure 13).

3.2.1 Traction axiale

Dans le cas simple où l'on a seulement de la traction axiale, le dimensionnement se réduit à vérifier :

$$\sigma_{t \max} = \frac{F_{B \max}}{A_s} \leq 0,9 R_{e \min} \quad (10)$$

avec $\sigma_{t \max}$ contrainte maximale de tension,
 $F_{B \max}$ effort maximal de tension,
 A_s section résistante,
 $R_{e \min}$ limite élastique minimale de la classe de qualité.

Exemple : pour un boulon de classe 8.8, de diamètre nominal $d = 12$ mm, on a $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$ (tableau 1), et $R_{e \min} = 640$ MPa (tableau 3), soit $F_{B \max} \leq 0,9 \times 640 \times 84,3 = 48\,557$ MPa.

On retrouve ici la charge d'épreuve définie par la norme.

Remarque : dans certains cas, pour des boulons spéciaux allégés, le diamètre d_0 est inférieur à d_s . C'est alors ce diamètre que l'on doit utiliser pour le calcul de la contrainte maximale de tension.

3.2.2 Traction et torsion combinées

C'est le type de sollicitation à laquelle est soumise la vis lorsque la mise sous tension est réalisée à l'aide d'une clé.

On calcule alors la contrainte équivalente par application du critère de von Mises en considérant que la tige cylindrique A_s est soumise à une tension F_B et à un moment de torsion M_B . On a :

$$\sigma_t = \frac{F_B}{A_s} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{16 M_B}{\pi d_s^3} \quad (11)$$

avec d_s diamètre de la section A_s ,
 et la contrainte normale équivalente de von Mises :

$$\sigma_e = [\sigma_t^2 + 3\tau^2]^{1/2} \quad (12)$$

De la même manière que précédemment, on peut dire que la contrainte normale équivalente maximale que peut supporter le boulon sans se déformer globalement de façon permanente est égale à $0,9 R_{e \min}$.

On écrit donc :

$$\sigma_e \leq 0,9 R_{e \min} \quad (13)$$

Remarques

- 1) On peut discuter du calcul de la contrainte de von Mises à partir d'une contrainte de torsion calculée sur une tige de diamètre d_s . On montre facilement, en calculant les contraintes sur le noyau (d_3), et en les ramenant pour la comparaison au diamètre d_s que l'erreur commise sur τ est de l'ordre de 2 %, ce qui, compte tenu des grandeurs relatives entre les termes de tension et de torsion, fait que l'erreur commise sur σ_e est tout à fait négligeable.
- 2) À la mise en précontrainte, lorsque la vis est seulement soumise à l'effort de précontrainte Q et au moment de torsion induit par le couple de serrage ($M_B = C_1$), pour un coefficient de frottement moyen $f \approx 0,13$ et pour des vis à pas gros, on a :

$$\sigma_e \approx 1,23 \sigma_t$$

Dans ce cas simple, on peut donc obtenir un dimensionnement approché rapide en écrivant :

$$\sigma_t = \frac{Q}{A_s} \leq 0,73 R_{e \min} \quad (14)$$

Cette approximation est particulièrement commode lorsqu'on recherche à la fois le diamètre et le nombre de vis en fonction de l'effort total de serrage de l'assemblage.

3.2.3 Traction, torsion et flexion combinées

C'est pratiquement la situation que l'on retrouve dans tous les assemblages, car il est très rare que les efforts puissent être appliqués suivant l'axe du boulon.

On garde le même principe de calcul qui a l'avantage d'être simple mais, comme nous le verrons ultérieurement dans le dossier [BM 5 562], la grande difficulté est d'évaluer correctement le moment de flexion tout le long de la vis induit par la déformation de flexion des pièces.

On écrit donc :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t = \frac{F_B}{A_s} ; \quad \sigma_f = \frac{32 M_{FB}}{\pi d_s^3} ; \quad \tau = \frac{16 M_B}{\pi d_s^3} \\ \text{et} \quad \sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 3\tau^2} \leq 0,9 R_{e \min} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Compte tenu de la difficulté qu'il y a pour calculer un moment de flexion réaliste, un essai est imposé par la norme ISO 8981 ; c'est l'essai dit de traction avec cale biaisée. Dans cet essai, la vis doit satisfaire aux exigences minimales de résistance à la rupture de sa

classe de qualité, sa tête étant appuyée sur un plan incliné (10°), ce qui introduit un fort moment de flexion dans la tige au voisinage de la tête et une importante déformation plastique.

Nous pensons que cet essai, qui garantit le risque d'arrachement de la tête dans les conditions extrêmes d'utilisation, ne simule pas correctement l'introduction d'un moment de flexion dans la tige dû à la déformation des pièces.

Une contrainte de flexion élémentaire diminuera toujours la résistance d'un boulon et on devra l'éviter, dans la mesure du possible, par un dessin judicieux des pièces (cf. dossier [BM 5 562]).

3.3 Résistance à l'arrachement des filets

Comme nous l'avons vu au paragraphe 1.2, pour les écrous, le problème est réglé par la norme. Mais il reste tous les cas de vis assemblées avec des pièces en matériaux très différents de celui de la vis.

La méthode de calcul que nous proposons d'adopter est basée sur les résultats obtenus lors des recherches sur les assemblages vis-écrou menées dans plusieurs pays sous la responsabilité du sous-comité SC1 de l'ISO/TC2 et dont un résumé des résultats des essais et une présentation de la méthode de calcul sont donnés dans [13]. C'est avec cette méthode qu'ont été déterminées les hauteurs normalisées des écrous. Elle a l'avantage de présenter les calculs de vérification de la résistance des filets sous une forme systématique bien adaptée aux calculs industriels. Toutefois, elle ne traite que des assemblages pour lesquels les deux pièces sont en acier, et son utilisation pour d'autres couples de matériaux est plus incertaine.

Si on examine le problème de la ruine d'un assemblage vis-écrou, on met en évidence trois types de ruptures possibles (figure 14) :

1. Arrachement des filets de l'écrou.
2. Arrachement des filets de la vis.
3. Rupture de la vis.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour des raisons évidentes de sécurité, les assemblages doivent être dimensionnés pour que, lors d'une surcharge, ce soit **toujours** la rupture de la vis qui se produise.

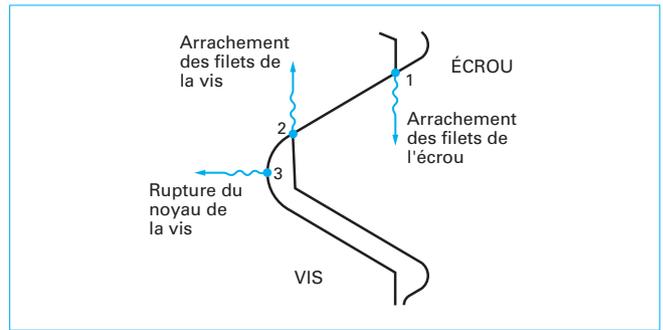


Figure 14 – Modes de rupture d'un assemblage vis-écrou

La méthode proposée dans [13] permet d'estimer les charges d'arrachement des filets de la vis et celles des filets de l'écrou à partir de la constatation expérimentale que, sous une charge croissante, les filets se plastifient successivement jusqu'à la rupture quasi simultanée de tous par cisaillement (figure 15).

Le calcul consiste donc essentiellement à déterminer avec la meilleure précision possible la section cisailée, qui est fortement dépendante de deux facteurs :

- la « dilatation » de l'écrou sous l'effet des composantes radiales de la charge appliquée sur les filets prise en compte par un coefficient C_1 ;
- la modification de l'inclinaison du flanc des filets, due à la déformation en flexion élastoplastique des filets en contact, prise en compte par des coefficients C_2 (pour la vis) et C_3 (pour l'écrou).

La figure 16 illustre ce phénomène.

Si le filet de la vis a une résistance bien plus grande que celui de l'écrou, ce dernier s'adapte au filet de la vis, le profil est conservé et la rupture va se produire par cisaillement du filet de l'écrou (figure 16a). À l'inverse, si le filet de l'écrou est bien plus résistant que celui de la vis, c'est le filet de la vis qui s'adapte au filet de l'écrou et la rupture se produit par cisaillement du filet de la vis (figure 16b). Si l'écrou et la vis ont des résistances voisines, il y a déformation des deux filets et la direction du chargement est modifiée (figure 16c). En fait, la dilatation de l'écrou augmente et la section cisailée diminue.

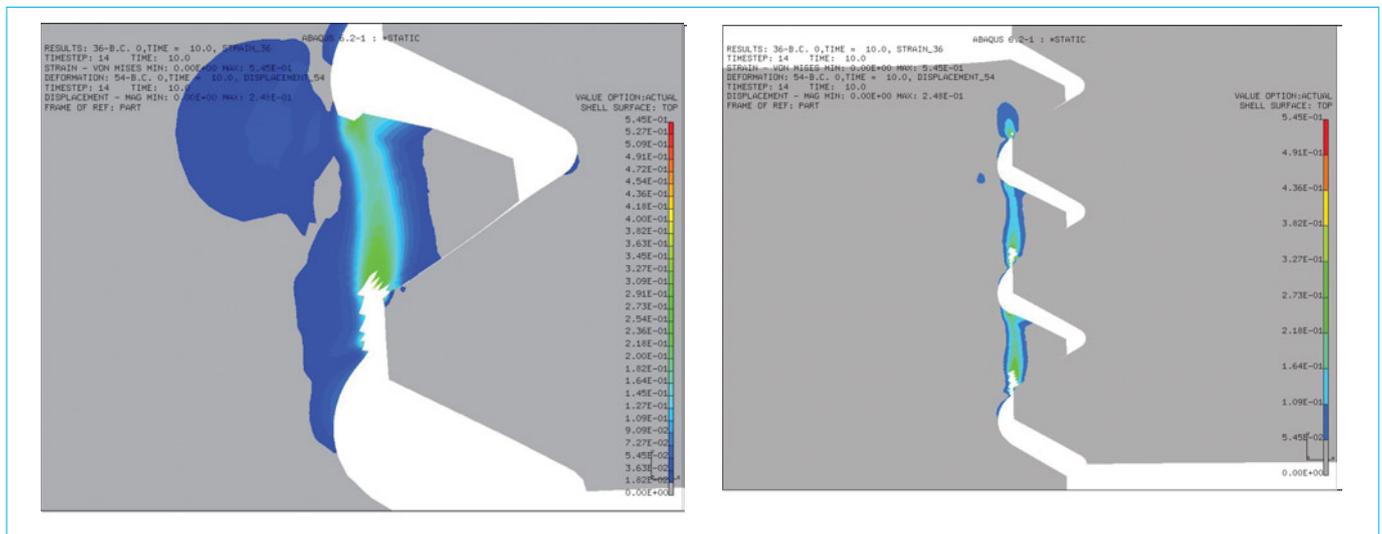


Figure 15 – Évolution de l'endommagement sur les filets. Représentation de l'arrachement d'après [12]

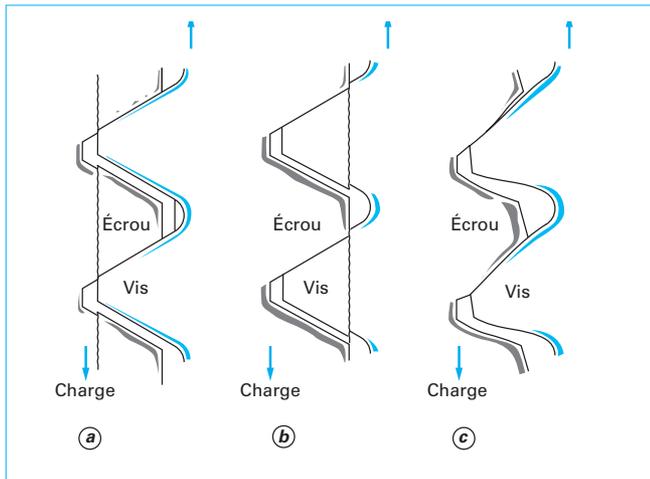


Figure 16 – Influence de la résistance relative des filets vis-écrou (paramètre R_s) sur la forme des filets sous charge

Ce phénomène est pris en compte par le paramètre :

$$R_s = \frac{\tau_{me} A_{se}}{\tau_{mv} A_{sv}} \quad (16)$$

avec τ_{me} résistance au cisaillement du matériau de l'écrou,
 τ_{mv} résistance au cisaillement du matériau de la vis,
 A_{se} section cisailée théorique de l'écrou,
 A_{sv} section cisailée théorique de la vis.

Et, en fonction des paramètres caractéristiques du filetage ISO (figure 1) et de la longueur utile du filetage en prise L_u , on a :

$$A_{sv} = \frac{L_u}{P} \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \tan 30^\circ \right] \pi D_1 \quad (17)$$

$$A_{se} = \frac{L_u}{P} \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \tan 30^\circ \right] \pi d \quad (18)$$

On définit alors deux charges d'arrachement.

■ Charge d'arrachement des filets de la vis

$$F_{av} = \tau_{mv} A_{sv} C_1 C_2 \quad (19)$$

avec C_1 : facteur de réduction de résistance due à la dilatation de l'écrou :

$$C_1 = -\left(\frac{D_{ext}}{d}\right)^2 + 3,8\left(\frac{D_{ext}}{d}\right) - 2,61 \quad \text{et} \quad 1,4 \leq \frac{D_{ext}}{d} < 1,9 \quad (20)$$

$$C_1 = 1 \quad \text{pour} \quad \frac{D_{ext}}{d} \geq 1,9$$

et C_2 : facteur de réduction de résistance des filets de la vis due à la flexion des filets.

Pour $R_s \leq 1$: $C_2 = 0,897$

Pour $1 < R_s < 2,2$:

$$C_2 = 5,594 - 13,682 R_s + 14,107 R_s^2 - 6,057 R_s^3 + 0,9353 R_s^4 \quad (21)$$

■ Charge d'arrachement des filets de l'écrou

$$F_{ae} = \tau_{me} A_{se} C_1 C_3 \quad (22)$$

avec C_3 : facteur de réduction de résistance des filets de l'écrou due à la flexion des filets ;

$$\text{Pour } 0,4 < R_s < 1 : C_3 = 0,728 + 1,769 R_s - 2,896 R_s^2 + 1,296 R_s^3 \quad (23)$$

$$\text{Pour } R_s \geq 1 : C_3 = 0,897$$

L'application de ces expressions à la vérification de l'arrachement des filets de la vis et les vérifications expérimentales de [12] permettent de montrer que quel que soit le matériau de l'écrou associé, **pour une longueur utile d'engagement des filets de la vis, $L_u \geq 0,7d$, il n'y a jamais arrachement des filets avant la rupture de la vis.**

Donc, si l'on vérifie cette condition simple, il suffit, pour dimensionner l'assemblage, de calculer la longueur L_u à l'arrachement des filets de l'écrou pour laquelle la charge à l'arrachement est égale à la charge de rupture de la vis.

Soit :

$$L_{u \min} = \frac{R_{mv} A_s P}{C_1 C_3 \tau_{me} \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \tan 30^\circ \right] \pi d} \quad (24)$$

Les formules précédentes conviennent bien pour deux matériaux identiques (vis acier – écrou acier). Pour d'autres associations de matériaux, comme vis acier – taraudage alliage léger ou titane, le coefficient C_1 ne peut pas être représentatif de la dilatation réelle de l'écrou pour des épaisseurs faibles ou moyennes de celui-ci. On peut montrer que deux paramètres non négligeables sont absents de la définition de C_1 : celui liant résistance de la matière et module

d'élasticité $\left(\frac{\tau_{me}}{E_e}\right)$ et le coefficient de frottement f qui modifie for-

tement la direction des efforts de contact. Nous pensons donc qu'il convient d'être prudent dans l'utilisation de ces expressions.

Pour tenir compte de la partie de formation du filetage, Thomala [16] a proposé d'ajouter une longueur corrective de $0,8 P$.

Nous pensons, au vu des résultats expérimentaux de [12], qu'ajouter à $L_{u \min}$ une longueur de $1 P$ tout en tenant compte des tolérances sur les différentes grandeurs présente toutes les garanties de sécurité.

On obtient donc la formule pratique suivante :

$$L_{uP} = \frac{R_{mv \max} A_s P}{C_1 C_3 \tau_{me \min} \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \tan 30^\circ \right] \pi d} + P \quad (25)$$

avec $L_u \geq \max(L_{uP}, 0,7d)$

Exemple

1) On recherche la longueur d'implantation minimale (L_u) pour une vis M12 classe 10.9 dans un alliage léger de fonderie de $\tau_{me \min} = 175$ MPa dans un bossage de $\varnothing = 30$ mm :

$$R_s = \frac{\tau_{me \min} A_{se}}{0,6 R_{mv \min} A_{sv}} = 0,41 \rightarrow C_3 = 1,06$$

$$\frac{D_{ext}}{d} = \frac{30}{12} > 1,9 \rightarrow C_1 = 1$$

$$R_{mv \max} = 1\,200 \text{ MPa (mini de la classe de qualité supérieure)}$$

$$L_{u \min} = L_{uP} = 18,25 \text{ mm}$$

2) Implantation de la même vis dans une pièce en acier de $D_{ext} = 30$ mm et de $R_{me \min} = 1\,000$ MPa :

$$R_s = \frac{R_{me} A_{se}}{R_{mv} A_{sv}} > 1 \rightarrow L_{u \min} = 0,7 \times 12 = 8,4 \text{ mm}$$

3.4 Contrainte maximale sous tête de vis ou sous écrou

Les contraintes élevées sous la tête de vis ou sous l'écrou peuvent entraîner, au serrage ou en service, une déformation plastique de la zone de contact (matage) entraînant une perte de serrage de l'assemblage.

Ce problème est souvent négligé ; pourtant il est la cause de nombreux desserrages avec, souvent comme conséquence, une rupture en fatigue de la vis.

Comme les surfaces de contact sont de faible largeur, on peut admettre que la pression est répartie uniformément (figure 17).

On calcule alors la pression maximale de contact :

$$p_{c \max} = \frac{F_{B \max}}{A_{c \min}} \quad (26)$$

avec $F_{B \max}$ effort maximal de tension dans la vis,
 $A_{c \min}$ surface de contact minimale.

On aura :

$$A_{c \min} = \frac{\pi}{4} (d_{w \min}^2 - d_{i \max}^2) \quad (27)$$

avec $d_{w \min}$ donné par le tableau 4,
 $d_{i \max}$ diamètre intérieur maximal de la zone de contact.

■ Sous la tête de vis, on a :

d_i = diamètre extérieur du chanfrein de la pièce associée avec
 $d_{i \min} \geq d_{a \max}$.

■ Sous l'écrou, on a :

$$d_{i \max} = \text{Max}(d_{a \max}, D_{t \max}) \text{ tableau 4}$$

Vérifier qu'il n'y a pas matage consiste à vérifier que :

$$p_{c \max} \leq p_m$$

avec p_m pression de matage du matériau.

Actuellement, il n'y a pas de données expérimentales sûres permettant de fixer les valeurs de p_m .

On peut, avec une bonne sécurité, prendre :

$$p_m = \frac{R_{ec \min} + R_{mc \min}}{2} \quad (28)$$

avec $R_{ec \min}$ limite élastique minimale en compression du matériau,

$R_{mc \min}$ résistance à la rupture minimale en compression du matériau.

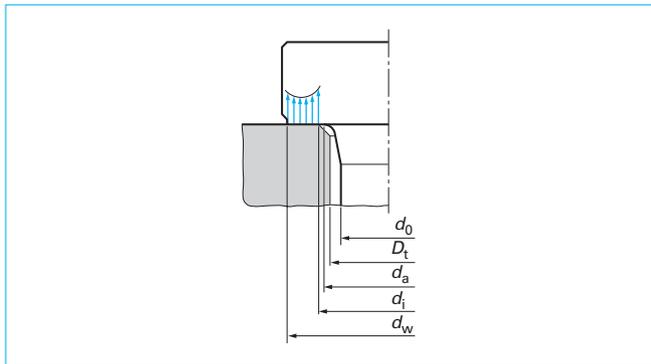


Figure 17 - Définition de la zone de contact sous tête

Tableau 11 – Caractéristiques mécaniques en compression des fontes et des aciers frittés

Nature	Nuance	$R_{mc \min}$ (MPa)	$R_{ec \min}$ (MPa)
Fonte grise	FGL 200	720	350
	FGL 250	840	450
Fonte à graphite sphéroïdal	FGS 400.12	700	280
	FGS 500.7	800	340
	FGS 600.3	870	380
	FGS 700.2	1 000	430
Acier fritté	F10 U3.64	280	150
	F50 U3.66	420	290
	F80 U3.68	530	380

Pour les matériaux isotropes (aciers, alliages légers, etc.), on peut prendre $R_{ec} = R_{e0,2}$ et $R_{mc} = R_m$. Pour les matériaux comme les fontes ou les matériaux frittés où les valeurs de résistance en compression sont bien plus élevées que celles obtenues par l'essai de traction, on peut utiliser les données du tableau 11.

Exemple : une vis M12 à tête hexagonale de classe 10.9 supporte un effort maximal en service $F_{B \max} = 60\,700$ MPa (ce qui correspond à un chargement axial à 80 % de $R_{e \min}$). La pièce assemblée est en alliage d'aluminium AS7G état Y33 de $R_{mc \min} = 280$ MPa et de $R_{ec \min} = 190$ MPa. On se propose de vérifier le risque de matage sous tête.

• On a (tableau 4) :

$$A_{c \min} = \frac{\pi}{4} (d_{w \min}^2 - d_{i \max}^2)$$

avec $d_{w \min} = 16,63$ mm et $d_{i \max} = 14,3$ mm (on doit également vérifier que $d_{i \min} > d_{a \max} = 13,7$ mm),

soit

$$A_{c \min} = 56,60 \text{ mm}^2$$

et

$$p_{c \max} = \frac{60\,700}{56,60} = 1\,072 \text{ MPa} \geq \frac{280 + 190}{2} = 235 \text{ MPa} = p_m$$

Dans tous les cas, on aura un matage important et l'assemblage ne peut fonctionner.

• On utilise une vis hexagonale à embase (tableau 4) de $d_{w \min} = 23,8$ mm.

On a :

$$A_{c \min} = 284,3 \text{ mm}^2$$

et

$$p_{c \max} = \frac{60\,700}{284,3} = 213,5 \text{ MPa} < p_m = 235 \text{ MPa}$$

Cette solution est tout à fait acceptable.

4. Résistance à la fatigue d'un boulon

Cette caractéristique fondamentale pour le dimensionnement de la plupart des assemblages boulonnés de construction mécanique est obtenue à partir d'essais réalisés sur vis entières équipées de leurs écrous.

Les conditions d'essais sont parfaitement définies par la norme NF ISO 3800 relative aux essais de fatigue sous charge axiale. Toutefois, aucune spécification de contrainte alternée admissible n'est imposée et, pour les calculs de vérification, on doit se référer aux résultats d'essais publiés [9].

Pour un nombre de sollicitations supérieur à 2×10^6 cycles, ces données semblent suffisantes ; pour un nombre de cycles inférieur, on doit procéder à ses propres essais et établir une courbe de Wöhler (figure 18) probabilisée correspondant à la contrainte moyenne installée (en général comprise entre 0,5 et 0,8 R_{emin} de la classe de qualité).

Comme nous pouvons le constater sur la figure 19, sur le premier filet en prise, on a un effet d'entaille important, auquel s'ajoute une « concentration d'effort ». La contrainte locale en fond du premier filet en prise est bien plus importante que la contrainte nominale (de 4 à 10 fois selon les cas). Le facteur $\Delta\sigma_{max}$ (variation de la contrainte maximale) qui caractérise l'amorce de fissure en fatigue [6] [8] est donc grand :

$$\Delta\sigma_{max} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}}$$

avec ΔK variation du facteur d'intensité de contrainte,
 ρ rayon de courbure à fond de filet.

Cela explique que :

- toutes les ruptures de fatigue se produisent au niveau du premier filet en prise (au point où $\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}}$ est maximal) ;
- l'utilisation d'un pas fin n'apporte en général aucune amélioration notable à la tenue en fatigue (dans la plupart des cas, on a une diminution de la résistance apparente de la vis) ;
- les contraintes alternées admissibles (calculées à partir de la section A_s) sont beaucoup plus petites (40 à 60 MPa), que les limites de fatigue (σ_D) obtenues pour le même matériau sur des éprouvettes lisses [7].

D'autre part, on peut constater à l'analyse des essais que :

- la contrainte alternée admissible σ_A dépend peu de la contrainte moyenne σ_m ;
- la contrainte alternée admissible σ_A est pratiquement indépendante de la classe de qualité ; en pratique, pour des boulons de classes 8.8, 9.8, 10.9, 12.9 roulés à froid et traités thermiquement, une amplitude de contrainte dynamique de 50 MPa peut être considérée, en première approximation, comme une valeur à ne pas dépasser ;
- la contrainte alternée admissible σ_A varie de façon sensible avec le diamètre des vis.

En l'absence de résultats de mesures effectuées sur un lot de boulons conforme à ceux qui vont être utilisés en service, on peut se référer aux valeurs préconisées par VDI [2]. Ces résultats ont été obtenus à partir de courbes de Wöhler probabilisées à 0,5 et affectées d'un facteur minorant de 0,85 (pour obtenir un domaine de tenue en fatigue considéré « à faible risque »).

■ Pour les vis à filet roulé traitées thermiquement après roulage (vis RT) et pour un nombre de cycles $N_c \geq 2 \times 10^6$ (durée de vie considérée comme infinie) :

$$\sigma_{A(RT)} = 0,855 \left(\frac{150}{d} + 45 \right) \quad (29)$$

avec $\sigma_{A(RT)}$ en MPa et d en mm.

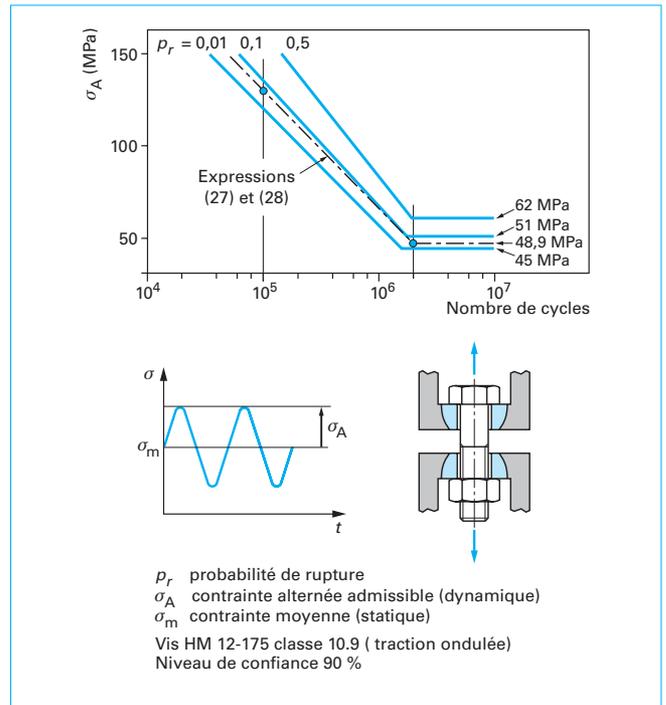


Figure 18 - Exemples de courbes d'isoprobabilité de Wöhler obtenues sur un lot de boulons ($\sigma_m \approx 0,7 R_e$ de la classe de qualité) [9]

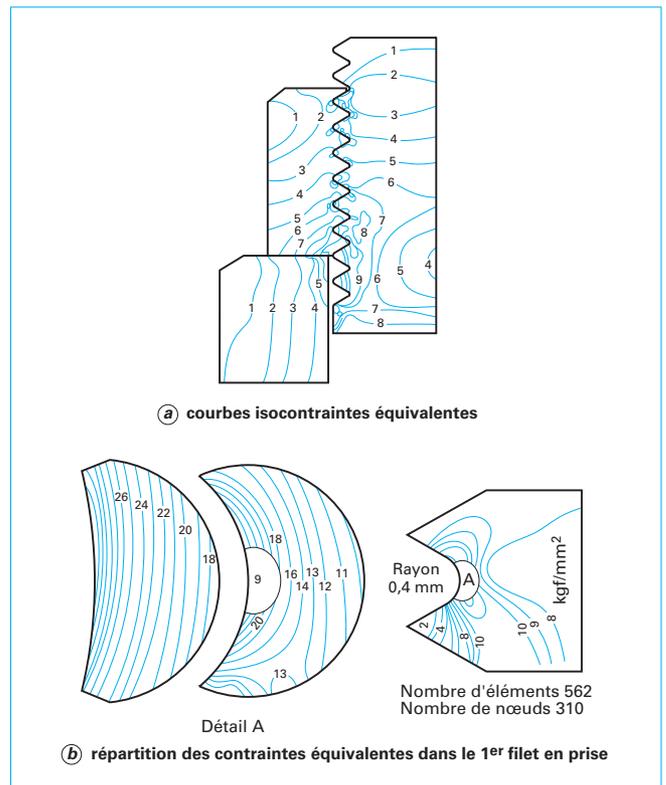


Figure 19 - Contrainte dans l'ensemble vis-écrou (d'après [11])

Pour un nombre de cycles plus faible tel que : $10^4 < N_c < 2 \times 10^6$, on peut (par approximation de la courbe de Wöhler) obtenir la contrainte admissible à N_c cycles :

$$\sigma_{AN(RT)} = \sigma_{A(RT)} \left(\frac{N_D}{N_c} \right)^{1/3} \quad (30)$$

avec N_D nombre de cycles pour lequel la courbe de Wöhler atteint son minimum.

On comprend que l'on doit utiliser avec prudence cette expression qui, si elle traduit bien la pente de la courbe, est tributaire du choix de la valeur de N_c . Sur la figure 18, on a tracé cette courbe théorique à partir de $N_c = 2 \times 10^6$; on peut remarquer qu'elle s'adapte assez bien aux prévisions de σ_{AN} pour une probabilité de défaillance $p_r = 0,1$.

■ Pour les vis spéciales où le filet est roulé après traitement thermique (vis TR), on obtient une résistance à la fatigue plus élevée du fait des contraintes résiduelles de compression en surface de la vis dues au roulage.

On a alors :

$$\sigma_{A(TR)} = \left(2 - \frac{\sigma_m}{R_{e(0,2)min}} \right) \sigma_{A(RT)} \quad (31)$$

Et, pour des nombres de cycles : $10^4 < N_c < 2 \times 10^6$:

$$\sigma_{AN(TR)} = \sigma_{A(RT)} \left(\frac{N_D}{N_c} \right)^{1/3} \quad (32)$$

● Remarques concernant ces expressions

Il y a de nombreuses causes à la dispersion importante des résultats des essais de fatigue réalisés sur la boulonnerie. En plus des dispersions inhérentes aux essais de fatigue sur éprouvettes, les deux causes principales sont :

- l'état réel du matériau qui, pour une classe de qualité donnée, peut varier considérablement d'une fabrication à une autre ;
- la précision dimensionnelle et géométrique des pièces qui influe fortement sur la répartition des efforts dans l'assemblage vis-écrou.

Les valeurs données par les expressions précédentes sont des valeurs moyennes avec une probabilité de défaillance $p_r \leq 0,1$ (figure 18).

■ Pour la visserie standard, traitée après roulage

En comparant les résultats des essais aux expressions (29) (30), on peut constater que, pour les valeurs moyennes ou faibles de précontrainte, elles sont un peu conservatives en ne prenant pas en compte l'augmentation de σ_A admissible lorsque σ_m diminue et un peu optimistes pour l'estimation de σ_{AN} .

Nous proposons d'utiliser la formulation suivante qui tient compte d'une augmentation de 20 % de σ_A lorsque σ_m varie dans un domaine $0 < \frac{\sigma_m}{R_{e\min}} < 1$ et d'une pente légèrement plus faible de la courbe de Wöhler théorique en utilisant un exposant de 0,3. D'autre part, nous proposons de prendre $N_D = 10^6$, ce qui dans tous les cas est légèrement conservatif (figures 20 et 21) :

$$\sigma_{A(RT)} = 0,85 \left(\frac{150}{d} + 45 \right) \left(1,2 - 0,2 \frac{\sigma_m}{R_{e\min}} \right) \quad (33)$$

$$\sigma_{AN(RT)} = \sigma_{A(RT)} \left(\frac{10^6}{N_c} \right)^{0,3} \quad (34)$$

Pour une probabilité de risque de rupture $p_r < 0,01$, il suffit de remplacer le coefficient 0,85 par 0,73.

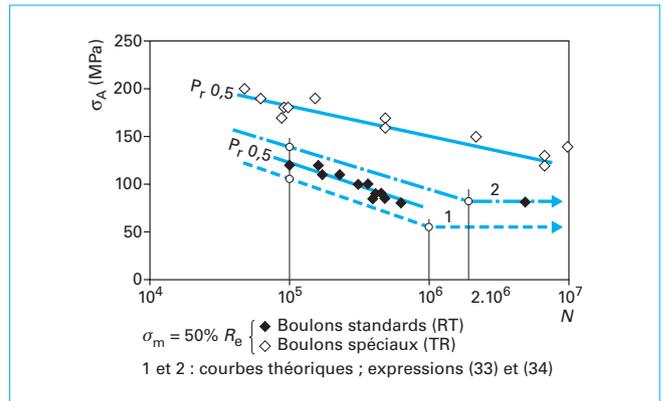


Figure 20 – Comparaison entre les résultats d'essais en fatigue pour des boulons M10 classe 8.8 en 42 CrMo4 « standards » (RT) et « spéciaux » (TR) pour une précontrainte de 50 % R_e

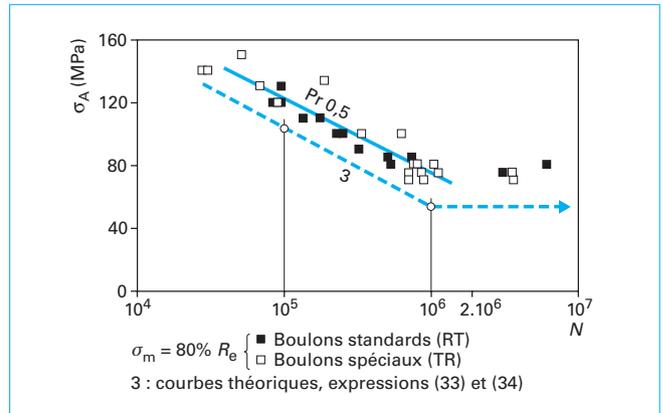


Figure 21 – Comparaison entre les résultats d'essais en fatigue pour des boulons M10 classe 8.8 en 42 CrMo4 « standards » (RT) et « spéciaux » (TR) pour une précontrainte de 80 % R_e

Notons que la faible variation de σ_A admissible en fonction de σ_m s'explique par le très fort gradient de contrainte en fond de premier filet en prise (figure 19). Cette situation fait que la grandeur plastifiée cycliquement et qui est caractéristique de la durée d'amorçage des fissures de fatigue est peu sensible à la variation de grandeur de la contrainte maximale.

■ Pour la visserie spéciale, roulée après traitement thermique

Les formules peuvent être utilisées ; elles traduisent bien le phénomène mis en évidence par les figures 20, 21 pour des vis en 42 CrMo4, c'est-à-dire que, pour une contrainte moyenne faible (50 % de $R_{e\min}$), la contrainte σ_A peut être supérieure à deux fois celle d'une vis standard alors que, pour une contrainte moyenne forte (80 % de $R_{e\min}$), σ_A admissible retrouve sensiblement le niveau obtenu pour une vis standard [14].

L'explication du phénomène est la suivante : le roulage à froid du filet des vis se fait avec de grandes déformations plastiques, ce qui entraîne, sur une faible épaisseur à fond de filet, d'importantes contraintes résiduelles de compression.

Lorsque le roulage précède le traitement thermique (cas des boulons standards), la mise à température d'austénisation (850 °C) permet la relaxation totale des contraintes résiduelles. Les caractéristiques en fatigue correspondent, à l'effet géométrique près, aux caractéristiques en fatigue de l'acier considéré trempé-revenu.

Par contre, lorsque le roulage à froid a lieu après la phase de traitement thermique, les boulons sont le siège, dans la partie déformée plastiquement, d'importantes contraintes résiduelles. Par la suite, lorsque ces boulons sont précontraints au montage, la précontrainte va entraîner une nouvelle plastification du fond du premier filet en prise, ce qui va produire une relaxation d'autant plus importante des contraintes résiduelles que le niveau de précontrainte est plus élevé. Il est donc naturel que le gain en fatigue diminue lorsque la précontrainte augmente, jusqu'à s'annuler lorsque la zone en compression est totalement concernée par la plastification induite (sur l'exemple de la figure 21 pour 80 % de $R_{e\ min}$).

Cette particularité réduit l'intérêt des boulons (TR) qui ne seront utiles que pour des cas particuliers rares d'assemblages qui, pour une précontrainte minimale, induisent de fortes variations de charge dans la vis et, pour une précontrainte maximale, ont de faibles variations de charge dans la vis. Cela peut être le cas d'assemblages avec de fortes déformations de flexion pour lesquels le processus de serrage n'est pas bien maîtrisé (coefficient de serrage α_s grand).

5. Amélioration de la tenue en fatigue d'un boulon

Si l'on exclu le processus de fabrication analysé précédemment et qu'on se limite au boulon (RT) à filetage ISO à pas gros (utiliser un pas fin pour les diamètres usuels de construction mécanique n'est jamais une bonne solution), on voit qu'améliorer la tenue en fatigue d'un boulon consiste à réduire la concentration et le gradient de contrainte au premier filet en prise. Cela consiste essentiellement à mieux répartir l'effort entre vis et écrou.

On peut :

- réduire le jeu (figure 22) ;
- utiliser un écrou suspendu (figure 23) ;
- augmenter la hauteur d'écrou en utilisant un matériau plus déformable (par exemple alliage léger) [10].

Bien que très intéressantes, ces améliorations ont une efficacité réduite (gains de 20 à 30 % sur σ_A admissible). Comme on pourra le constater en consultant le dossier [BM 5 562], on améliore considérablement la tenue en fatigue d'un assemblage précontraint en diminuant la variation d'effort supporté par le boulon par l'application de règles de conception adaptées, avec une efficacité bien supérieure à celle obtenue par amélioration de la liaison vis-écrou, qu'il conviendrait, comme l'utilisation des vis (RT), d'utiliser en dernier recours.

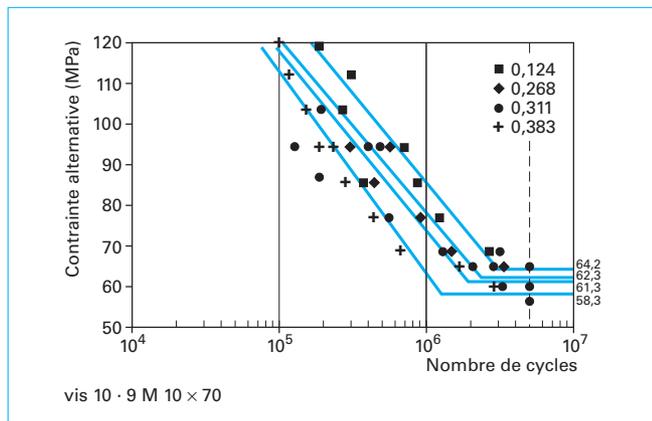


Figure 22 – Influence du jeu vis-écrou, vis 10.9 – écrou classe 9 (d'après [10])

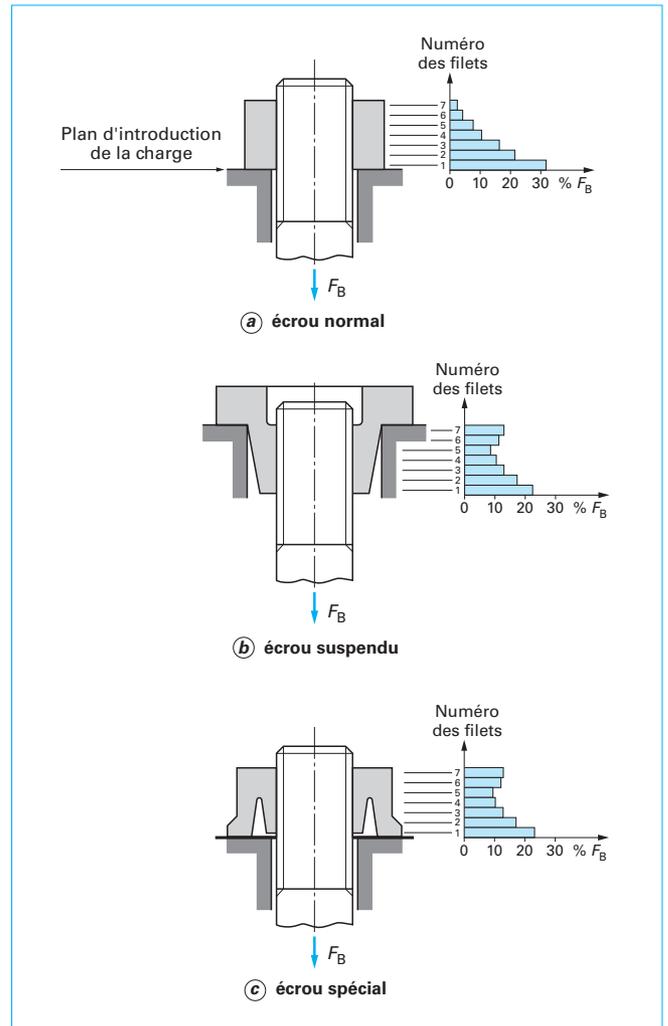


Figure 23 – Répartition de la charge entre les filets de l'écrou et de la vis pour trois type d'écrous différents

6. Conclusion

Pour les assemblages fortement chargés, il est recommandé d'utiliser des boulons de classes de qualité 8.8, 9.8, 10.9, 12.9.

Il est bon de garder en mémoire :

- que ces vis sont très résistantes sous sollicitations statiques ($R_m \approx 1\ 000$ MPa), ce qui permet d'installer des précontraintes élevées ;
- qu'elles sont très peu résistantes sous sollicitations de fatigue (40 à 60 MPa) et qu'il convient de concevoir et de dimensionner l'assemblage pour que les variations d'effort dans la vis soient faibles ;
- que l'incertitude sur la précontrainte installée est toujours grande (avec une clé dynamométrique, on a $Q_{\min} < Q_{\text{réel}} < 1,5 Q_{\max}$) et que le choix du procédé de serrage doit être réalisé dès l'étude.

Il ne sert à rien de choisir un procédé avec une incertitude faible, favorable au dimensionnement, si l'on n'est pas capable de garantir sa mise en œuvre au cours du montage sur le chantier.

Références bibliographiques

- [1] AFNOR (Association française de normalisation)
- [2] VDI 2230. – *Systematische Berechnung Hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen*. VDI/Richtlinien, févr. 2003.
- [3] AUBLIN (M.) et al. – *Systèmes mécaniques : théorie et dimensionnement*. Dunod Paris.
- [4] ALEMANY (B.) et ALBERT (B.). – *Boulons pré-contraints pour assemblages à haute rigidité*. Dunod Paris.
- [5] SAYETTAT (C.), FAURIE (J.P.) et PEYRET (M.). – *Assemblages boulonnés. Conception et montage*. Cetim (1980).
- [6] PILKEY (W.D.). – *Peterson's stress concentration factors*. John Wiley & Sons, inc (New York).
- [7] BRAND (A.). – *Calcul des pièces à la fatigue. Méthode du gradient*. Cetim (1980).
- [8] HENAFF (G.) et MOREL (F.). – *Fatigue des structures*. Ellipses Édition Paris.
- [9] BESSET (B.). – *Exploitation des essais de fatigue sur vis. Rapport d'étude*. Cetim 105200.
- [10] BESSET (B.) et SOUVIGNET (R.). – *Dimensionnement des filetages fortement chargés. Synthèse bibliographique*. Rapport d'étude Cetim 187881 (1994).
- [11] TANAKA (M.) et HONGO (K.). – *Stress analysis of threaded connections by finite element method*. Bult of JSME, vol. 24, n° 194, août 1981.
- [12] MARTINEZ-MARTINEZ (M.). – *Étude du comportement des assemblages filetés : calcul de l'arrachement des filetages*. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, n° 653, oct. 2002.
- [13] ALEXANDER (E.M.). – *Analysis and design of threaded assemblies*. Int. Automotive Eng. Congres. Detroit, n° 770420 (1977).
- [14] FARES (Y.). – *Dimensionnement en fatigue des assemblages boulonnés à l'aide de critères de fatigue multiaxiale*. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, n° 847, oct. 2006.
- [15] THOMALA (W.) et SCHNEIDER (W.). – *Spannungsanalyse im Gewindegrund eines schraubenmodells*. messtechnische Briefe (79).
- [16] THOMALA (W.). – *Zur Berechnung der erforderlichen Mutterhöhe bei schraubenverbindungen*. Konstruktion, 47 (1995).

Liste des mots clés

Boulon [BM 5 560]
Écrou [BM 5 560]
Filetage § 1

Fixation [BM 5 560]
Rondelle [BM 5 560]
Serrage § 2
Vis [BM 5 560]
Vis [BM 5 560]

Situation de l'article

N° de traité : xxx
N° de rubrique : xx
N° de sous-rubrique : xx
N° de volume : xx
N° de la fiche doc :

m1630

Anodisation de l'aluminium et de ses alliages

Date de publication : 10/12/2008

Par :

Jean Sylvestre SAFRANY
Alcan Centre de Recherches de Voreppe

Cet article fait partie de la base documentaire :

Méthodes de prévention et lutte contre la corrosion

Dans le pack : **Corrosion Vieillessement**

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 : 02/06/2015

Pour le compte : 7200034092 - // nc COMPTE INTERNE TI // 195.25.183.153

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

Anodisation de l'aluminium et de ses alliages

par **Jean Sylvestre SAFRANY**
Alcan Centre de Recherches de Voreppe

1. Surface de l'aluminium et de ses alliages	M 1 630v2 - 2
1.1 Notion d'oxyde naturel.....	— 2
1.2 Surface issue de la transformation du métal	— 2
2. Mécanisme de formation des couches anodiques	— 3
2.1 Anodisation de type barrière	— 3
2.2 Anodisation de type poreux.....	— 3
3. Principaux procédés et leurs applications	— 4
3.1 Anodisation barrière.....	— 4
3.2 Anodisation sulfurique	— 5
3.3 Anodisation dure	— 8
3.4 Anodisation chromique.....	— 11
3.5 Anodisation phosphorique	— 11
3.6 Combinaisons d'acides	— 12
3.7 Anodisation autocolorée	— 12
3.8 Autres procédés	— 13
4. Mise en œuvre industrielle d'une gamme d'anodisation	— 13
4.1 Préparations de surface.....	— 13
4.2 Technologie de l'anodisation.....	— 15
4.3 Traitements consécutifs à l'anodisation	— 17
4.4 Aspect environnemental	— 20
5. Principales propriétés usuelles et contrôle des couches anodiques	— 21
5.1 Adhérence	— 21
5.2 Épaisseur	— 22
5.3 Qualité de colmatage.....	— 22
5.4 Tests de corrosion accélérée	— 22
5.5 Résistance à l'abrasion, dureté.....	— 22
5.6 Masse volumique apparente	— 23
5.7 Propriétés optiques.....	— 23
5.8 Propriétés mécaniques.....	— 23
5.9 Propriétés électriques.....	— 23
5.10 Propriétés thermiques.....	— 23
Pour en savoir plus	Doc. M 1 630v2

Dans son principe, la découverte de l'oxydation anodique de l'aluminium et de ses alliages suit de près celle du métal lui-même.

Dès 1857, Buff découvre que l'aluminium forme un oxyde lorsqu'il est placé comme anode dans une cellule d'électrolyse. En 1911, De Saint-Martin propose les principes de base de l'anodisation sulfurique. En 1923, c'est au tour de Bengough et Stuart de développer l'anodisation chromique.

Par la suite, de nombreux perfectionnements des procédés de traitement anodique voient le jour, mettant à profit l'importante diversité offerte dans ce domaine ; la modification des électrolytes, des conditions opératoires et des alliages traités permet d'obtenir des propriétés de surface très variées.

En effet, si l'aluminium et ses alliages sont aujourd'hui largement utilisés pour leurs propriétés intrinsèques (légèreté, bonne tenue à la corrosion, conductibilité thermique ou électrique...), il convient de souligner que les traitements d'anodisation permettent d'y ajouter, en fonction des applications visées, des propriétés très spécifiques :

- renforcement important de la tenue à la corrosion ;
- amélioration de la dureté et de la résistance à l'abrasion ;
- diminution du coefficient de frottement ;
- isolation thermique ;
- isolation électrique ;
- possibilité de coloration ;
- base d'accrochage avant revêtement organique ou dépôt galvanique, etc.

C'est la raison pour laquelle les procédés d'anodisation sont aujourd'hui très répandus dans l'industrie pour des applications très diverses allant du transport au bâtiment, en passant par les loisirs, la décoration, les pièces mécaniques, les articles culinaires...

1. Surface de l'aluminium et de ses alliages

1.1 Notion d'oxyde naturel

L'aluminium, au contact de l'atmosphère, se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde mince, dont la partie externe est plus ou moins hydratée, suivant les conditions de température et d'humidité relative lors de sa formation. Cette couche, atteignant généralement 2 à 4 nm, joue un rôle important dans le bon comportement du métal vis-à-vis de la tenue à la corrosion, du fait de son renouvellement spontané.

Il convient toutefois de nuancer cette vision « idéale » de la protection du métal par son oxyde car, dans la réalité industrielle, de nombreux facteurs vont modifier la structure d'extrême surface de l'aluminium.

Dans la grande majorité des cas, on fait appel à des alliages d'aluminium, dans lesquels sont introduits des éléments d'addition. On retrouvera ces derniers dans la couche d'oxyde naturelle, à des concentrations parfois très différentes de celles à cœur du métal [1].

D'une manière générale, certains éléments, tels le magnésium, vont avoir tendance à renforcer le caractère protecteur de la couche, alors que d'autres, par exemple le cuivre, vont dégrader cette propriété [2].

1.2 Surface issue de la transformation du métal

L'aluminium utilisé industriellement est issu de procédés de transformations divers (filage, laminage, usinage, tréfilage, emboutissage...) laissant en surface des résidus, tels que les lubrifiants, qui vont parfois réagir chimiquement avec le métal.

Par ailleurs, l'aluminium peut subir un certain nombre de traitements thermiques qui, outre le renforcement de l'oxyde naturel, vont entraîner la ségrégation de certains éléments vers la surface du métal. C'est en particulier le cas du magnésium ([3] [4]).

En outre, le conditionnement des demi-produits, leur manipulation et leur stockage peuvent être à l'origine de nombreuses contaminations superficielles.

Il faut par conséquent se représenter la surface brute du métal, non pas en deux, mais en trois dimensions (figure 1), pour comprendre toute l'importance des préparations de surface (dégraissage, décapage), dont le rôle est multiple :

- éliminer les contaminations superficielles, organiques et salines ;
- éliminer les oxydes qui seront gênants vis-à-vis des opérations de finition ;
- se rapprocher en surface, si nécessaire, de la concentration à cœur du métal.

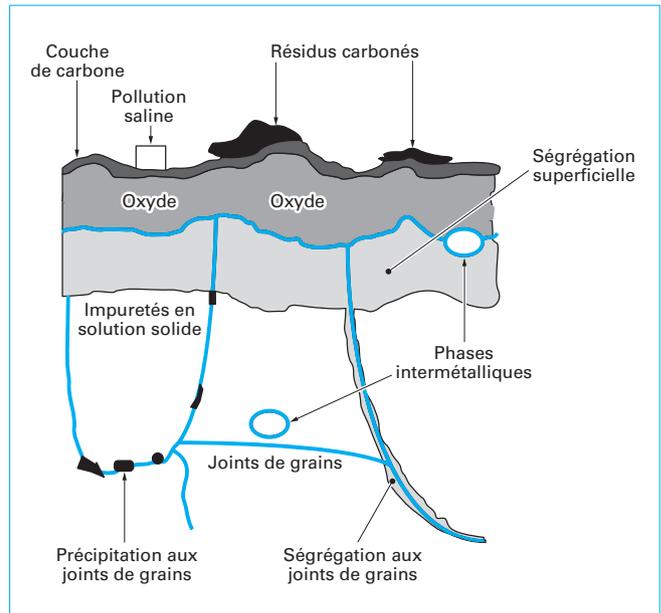
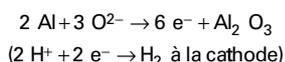


Figure 1 - Représentation schématique de la « surface » de l'aluminium

2. Mécanisme de formation des couches anodiques

L'électrolyse en milieu aqueux et sous courant continu produit normalement un dégagement gazeux aux deux électrodes (hydrogène à la cathode, oxygène à l'anode). En revanche, si l'on utilise de l'aluminium comme anode, aucun dégagement gazeux n'est observé sur celle-ci, alors que l'hydrogène est toujours visible à la cathode.

En première approximation, on peut décrire ce phénomène comme étant une combinaison entre l'aluminium dissous et l'oxygène naissant, selon la réaction :



Cependant, cette description ne peut être que partielle car elle ne suffit pas à expliquer les différences fondamentales de comportement que l'on observe en modifiant l'électrolyte et les conditions opératoires. En particulier, selon l'action dissolvante du milieu, on obtiendra des couches anodiques à **caractère barrière** ou à **caractère poreux**.

2.1 Anodisation de type barrière

Si l'on procède, à tension donnée, à une anodisation dans un milieu qui n'a pas d'action dissolvante sur le métal, ni sur son oxyde (solutions à base d'acide borique, d'acide tartrique, d'acide citrique, de tartrate d'ammonium, de carbonate de sodium, de phosphate de sodium...), on constate une chute rapide de l'intensité, qui tend vers une valeur nulle (figure 2). D'un point de vue pratique, ce type d'opération n'est possible que si le pH de la solution est compris entre 3,5 et 8,5.

Sous l'action du courant, les espèces Al^{3+} , O^{2-} et OH^- sont transportées à travers la couche, la croissance du film se réalisant à l'interface métal/oxyde, voire, en fonction du milieu utilisé, à l'interface oxyde/solution, avec incorporation dans la couche des anions issus de l'électrolyte ([5] [6] [7]).

Le caractère barrière de la couche formée tient au fait que celle-ci s'oppose rapidement au passage des électrons sous sa tension d'élaboration, au-delà de laquelle on provoque le claquage de l'oxyde [8]. Le processus d'oxydation est par conséquent non évolutif, d'où son appellation. Il convient de souligner que, en réalité, cette propriété barrière n'est valable que si l'alliage d'aluminium utilisé est de pureté élevée. Dans le cas contraire, le courant résiduel est non nul en raison des impuretés du métal qui provoquent des défauts dans l'oxyde [9].

La couche formée est compacte, exempte de porosités et relativement mince. En effet, il a été démontré que son **épaisseur finale** e (en nm) est fonction de la **tension d'anodisation** U (en V) [10] :

$$e \text{ (nm)} = 1,25 \text{ à } 1,4 U$$

2.2 Anodisation de type poreux

Dans le cas où l'électrolyte choisi possède une action dissolvante sur le métal ou sur son oxyde (milieu acide ou alcalin), le processus d'évolution de la couche anodique relève d'une compétition entre deux phénomènes :

- l'élaboration de l'oxyde sous l'action du courant électrique ;
- la dissolution chimique de la couche.

Il existe de nombreuses théories et modèles relatifs à l'initiation, à la croissance et à la morphologie des couches poreuses (voir notamment les références : [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]

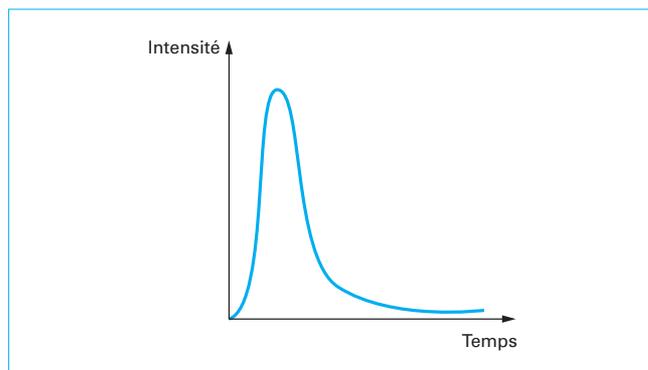


Figure 2 - Variation de l'intensité en fonction du temps

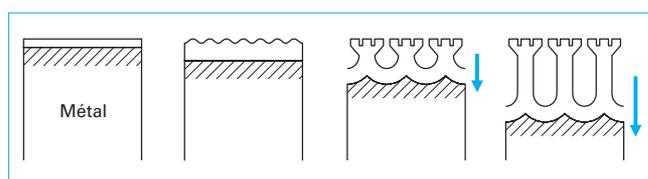


Figure 3 - Représentation schématique de l'initiation d'une couche poreuse

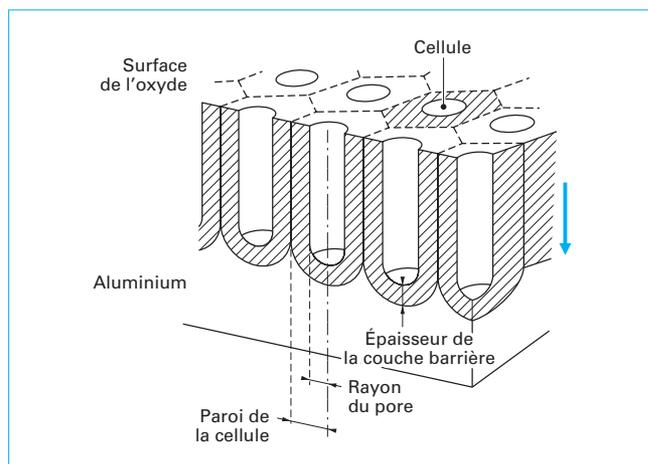


Figure 4 - Couche poreuse non colmatée

[20] [21] [22] [23] [24]). En intégrant les principaux modèles publiés (Keller, Murphy, école de Manchester...), on peut schématiser le processus comme suit : dès la mise sous tension, une **couche barrière** se forme à la surface ; cette couche possède des propriétés similaires à celles décrites au paragraphe 2.1 et sa formation se traduit par un pic initial de courant. Au moment où l'intensité décroît, la dissolution chimique de l'oxyde commence en de nombreux points. Pendant que l'oxyde croît sous l'action du courant, un processus transitoire voit la naissance dans l'alumine de nombreuses microporosités et irrégularités dont certaines seulement vont évoluer vers la structure poreuse finale (figure 3). La croissance poreuse prend par la suite un caractère permanent (sous tension constante) et aboutit à une structure hexagonale (figure 4).

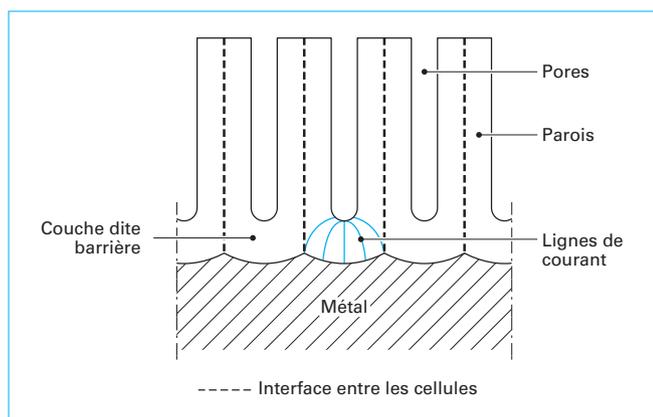


Figure 5 – Coupe schématique de la structure poreuse d'une couche d'oxyde

Tableau 1 – Épaisseur de la couche barrière pour différents oxydes anodiques

Nature de l'électrolyte	Épaisseur de la couche barrière (nm/V)
Acide sulfurique 15 % (en masse) à 10 °C	1,00
Acide oxalique 2 % (en masse) à 24 °C	1,18
Acide phosphorique 4 % (en masse) à 24 °C	1,19
Acide chromique 3 % (en masse) à 38 °C	1,25

La couche obtenue est composée d'une **partie barrière**, qui fait l'interface avec le métal et par laquelle transite le courant (il s'agit donc du front de croissance de la couche), et d'une **partie poreuse** (figure 5). La dissolution chimique, qui se poursuit lors du processus, concerne la surface de l'oxyde ainsi que les parois des pores. À cet égard, la température du bain joue un rôle prépondérant.

L'épaisseur de la couche barrière, mais également des parois de pore, sont fonction de la tension d'élaboration et de l'électrolyte utilisé. Les tableaux 1 et 2 présentent les principales caractéristiques des couches anodiques obtenues dans différents milieux.

On constate, en particulier, que la modification des conditions opératoires conduit à des structures variables des couches anodiques, ce qui est de première importance car les propriétés macroscopiques (tenue à la corrosion, résistance à la rayure...) s'en trouveront affectées.

Par ailleurs, il est généralement admis que l'oxyde formé est anhydre et amorphe, ce qui est néanmoins discuté par certains auteurs, notamment en raison de l'incorporation dans la couche des anions issus de l'électrolyte [25]. **Cette contamination, variable selon le milieu considéré [26], influence également la structure et les propriétés des couches.**

Même si les épaisseurs obtenues par anodisation sont considérablement plus élevées que l'épaisseur moyenne de l'oxyde naturel, il n'est pas possible de poursuivre le processus de croissance indéfiniment. En effet, la résistance électrique de la couche augmente progressivement avec son épaisseur, d'où ralen-

Tableau 2 – Densité surfacique des pores de diverses couches anodiques

Conditions d'anodisation		Nombre de pores (en 10 ⁹ /cm ²)
Électrolyte	Tension (V)	
Acide sulfurique 15 % (en masse) à 10 °C	15	76
	20	52
	30	28
Acide oxalique 2 % (en masse) à 25 °C	20	35
	40	11
	60	6
Acide chromique 3 % (en masse) à 50 °C	20	22
	40	8
	60	4
Acide phosphorique 4 % (en masse) à 25 °C	20	19
	40	8
	60	4

tissement de sa formation sous l'action du courant. Un équilibre finit par s'établir entre la formation de la couche et sa dissolution chimique par le bain. Les épaisseurs maximales varient selon les électrolytes utilisés, l'anodisation en milieu sulfurique étant un cas particulier qui permet, dans certaines conditions, d'atteindre plusieurs dizaines de micromètres.

3. Principaux procédés et leurs applications

3.1 Anodisation barrière

Ce procédé n'est réservé industriellement qu'à l'aluminium de haute pureté. Une application particulière a été proposée dans le domaine de l'optique par Hass et Bradford [27], consistant à anodiser en milieu barrière de l'aluminium déposé sous vide en couche alternée avec de l'oxyde de titane, le tout sur un substrat en verre. Moyennant un choix judicieux de la tension d'anodisation et des épaisseurs déposées, il est en effet possible d'améliorer significativement la réflectivité du métal par la combinaison des indices de réfraction.

Néanmoins, l'application industrielle principale de l'anodisation barrière se trouve aujourd'hui dans la fabrication de feuilles pour condensateurs électrolytiques. Dans un premier temps, l'aluminium, généralement pur à 99,99 %, est gravé par un procédé électrochimique pour augmenter sa surface spécifique (dont dépend directement la capacité du condensateur). Par la suite, le diélectrique est formé par une opération d'oxydation anodique réalisée en milieu barrière (le plus fréquemment de l'acide borique ou du tartrate d'ammonium). L'oxyde formé se développe sur la totalité de la surface de la feuille gravée (figure 6). Par ailleurs, la tension de formation est conditionnée par l'utilisation finale du condensateur.

Il est important de préciser que le procédé d'anodisation barrière requiert, pour le montage du bain, une eau déminéralisée d'excellente qualité, l'ion chlorure, entre autres, étant particulièrement néfaste [28].

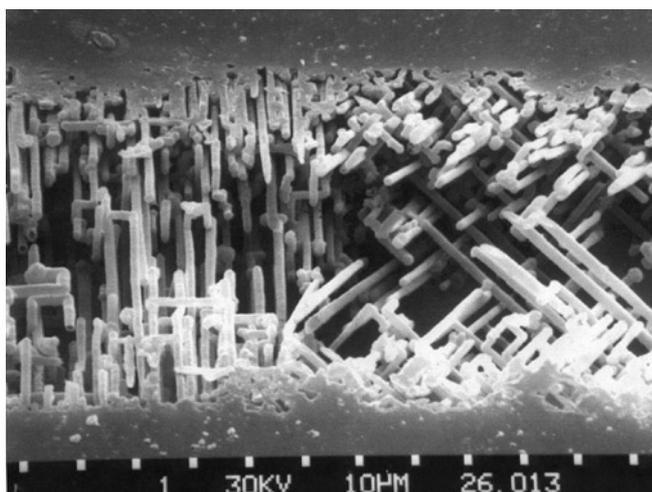


Figure 6 – Feuille gravée pour condensateur

3.2 Anodisation sulfurique

Brevetée pour la première fois en Angleterre en 1927, l'anodisation en milieu sulfurique est aujourd'hui la plus répandue industriellement, essentiellement pour trois raisons :

- le faible coût de l'électrolyte ;
- le large domaine d'utilisation du procédé ;
- la maîtrise aisée des paramètres de traitement.

Ceci ne doit pas faire oublier que dans chaque domaine considéré, les conditions opératoires sont précisément définies (figure 7). Selon la fonction recherchée, on classe l'anodisation sulfurique en trois grandes catégories :

- l'anodisation de décoration et pour application optique (réflecteurs) ;
- l'anodisation de protection (en particulier dans le domaine de l'architecture) ;
- l'anodisation dure (§ 3.3).

3.2.1 Anodisation de décoration et pour application optique

■ L'oxydation anodique de décoration doit pouvoir permettre d'utiliser la porosité de l'oxyde pour éventuellement colorer le métal (§ 4.3.1. et § 4.3.2), mais aussi de pérenniser l'aspect obtenu (résistance à la rayure, tenue à la corrosion en environnement peu agressif...). On en trouve les principales applications dans le mobilier, la décoration intérieure, les articles pour cosmétique (bouchons sur flacons de parfum, tubes de mascara ou de rouge à lèvres...), les articles fantaisie (stylos, briquets), la décoration automobile, etc.

Les couches, d'épaisseur comprise entre 5 et 10 μm , sont élaborées en règle générale sur du métal qui aura subi un traitement décoratif préalable (brillantage ou satinage).

■ En ce qui concerne l'application optique, la couche anodique a pour objectif de protéger l'aluminium tout en préservant au maximum les propriétés de réflectivité obtenues auparavant par un brillantage chimique ou électrolytique (§ 4.1.3.). Pour cette raison, les épaisseurs sont limitées à quelques micromètres.

À noter que cette application, tout comme pour certains produits de décoration, **nécessite des alliages spécifiquement développés et transformés** (laminage brillant) pour optimiser leur aptitude aux procédés de brillantage et d'anodisation (transparence de la couche).

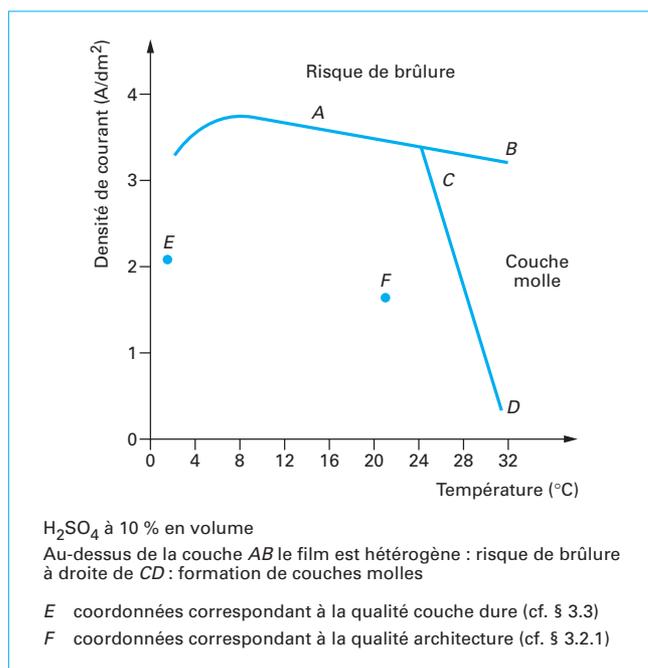


Figure 7 – Points de fonctionnement en anodisation sulfurique

■ Dans ces deux domaines, l'oxydation anodique peut être pratiquée en statique, en faisant passer la pièce de cuve en cuve, ou en dynamique, la bande aluminium étant traitée au défilé dans les différentes étapes successives (§ 4.2.2). Dans ce dernier cas, le métal est destiné à être mis en forme après anodisation, ce qui réserve son utilisation à des produits où la déformation est peu sévère.

3.2.2 Anodisation de protection

Le domaine privilégié de l'anodisation de protection est l'architecture (menuiserie métallique en alliage de la série 6000 ou bardage de façade en alliage 5005). Cependant, plus généralement, ce traitement reste valable, moyennant un choix d'alliage approprié, dès que l'on souhaite conserver l'aspect de la pièce traitée et surtout lui conférer une résistance à la corrosion dans des milieux plus ou moins agressifs.

■ Les conditions d'obtention des couches de qualité « architecture » sont très précises et font l'objet d'un label de qualité (label Qualanod [29]) lorsque l'anodisation est rigoureusement effectuée dans les conditions opératoires indiquées dans l'encadré 1.

Encadré 1 – Conditions d'obtention des couches qualité architecture (label Qualanod)

- Concentration en acide sulfurique : 200 ± 20 g/L.
- Densité de courant : $1,5 \pm 0,2$ A/dm^2 .
- Température de l'électrolyte : $20 \pm 1,5$ $^{\circ}\text{C}$ (la température doit être homogène dans la cuve).
- Teneur en aluminium dissous : maximum 20 g/L, de préférence régulé entre 5 et 15 g/L.
- Dans ces conditions, la vitesse moyenne d'élaboration de la couche est d'environ 0,45 $\mu\text{m/min}$.

Précisons que ces recommandations concernent également la technologie utilisée (contacts électriques, montages, régulation de tension, électrodes...), les procédures de colmatage (§ 4.3.3) ainsi que la nature et la fréquence des contrôles qu'il convient d'effectuer. Les épaisseurs visées sont fonction de l'utilisation des pièces et peuvent varier d'un pays à l'autre.

Exemple

En France, les épaisseurs vont de 15 µm à 20 µm.

Il est important de noter que l'épaisseur d'oxyde est une condition nécessaire mais non suffisante pour garantir aux couches traitées une bonne tenue à la corrosion. Il est en effet indispensable d'effectuer les préparations de surface (§ 4.1), les opérations de rinçage (§ 4.2.4) et le colmatage (§ 4.3.4) de manière rigoureuse.

■ Pour l'application bâtiment sur les profilés en aluminium, on rencontre typiquement la gamme opératoire suivante (traitement en statique) :

- montage des pièces ;
- dégraissage lessiviel ;
- rinçage(s) ;
- satinage alcalin ;
- rinçages ;
- neutralisation ;
- rinçages ;
- anodisation ;
- rinçages ;
- coloration électrolytique (optionnel) ;
- rinçages (rinçage final en eau déminéralisée) ;
- colmatage à chaud ;
- démontage des pièces.

Tout comme pour l'anodisation de décoration, le traitement destiné à la protection se pratique parfois au défilé, avec cependant la nécessité d'adapter les conditions d'anodisation (densité de courant plus élevée) pour obtenir une productivité satisfaisante. Par ailleurs, il est nécessaire de prendre garde aux phénomènes de microfissuration (*faiencage*) des couches épaisses, dus à l'enroulement du métal sur des rouleaux à trop faible rayon de courbure. Ce défaut sera réductible ou non en fonction du milieu auquel le métal anodisé sera exposé [30].

3.2.3 Autres applications de l'anodisation sulfurique

En dehors des fonctions de décoration ou de protection obtenue par anodisation sulfurique, d'autres propriétés des couches peuvent être utilisées.

■ Aptitude à l'adhérence des revêtements organiques des couches non colmatées

C'est le cas notamment de l'anodisation sulfurique utilisée dans le bâtiment au Japon en préparation avant vernissage ou dépôt électrophorétique. Ce dernier remplace le colmatage en phase aqueuse tel qu'il est pratiqué en France [31], avec un aspect final qui peut être brillant, mat, ou coloré [32]. Pour cette application l'épaisseur de l'oxyde est d'environ 10 µm.

Il faut cependant préciser que les couches élaborées en milieu sulfurique sont sensibles à l'hydratation qui est nuisible à l'adhérence des revêtements organiques. Ceci impose un contrôle rigoureux des conditions de stockage et une minimisation du temps avant enduction du métal anodisé.

■ Propriétés d'isolation électrique

On en trouve par exemple l'utilisation sur le fil employé dans les bobinages pour transformateurs [33], l'anodisation ayant pour avantage de résister à de plus hautes températures que les vernis. On rencontre également des applications sur les tambours de photocopieuses, l'oxyde agissant comme isolant entre l'aluminium et la couche organique photosensible [34].

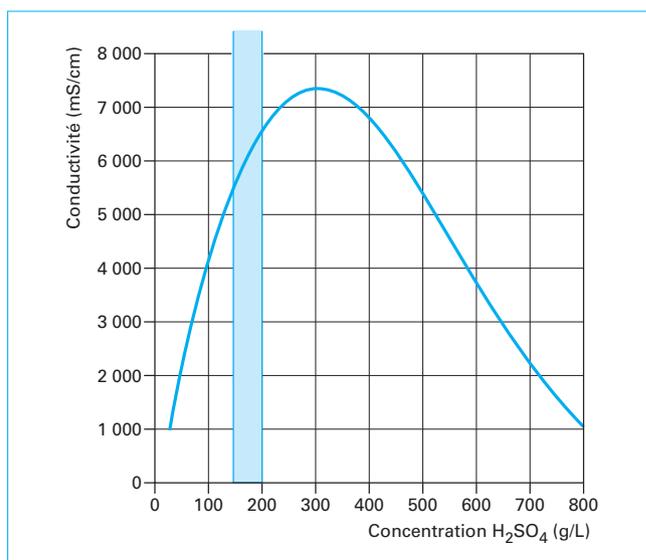


Figure 8 – Conductivité d'une solution d'acide sulfurique en fonction de sa concentration

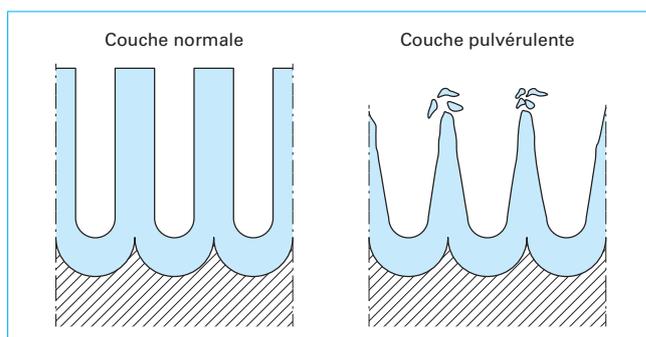


Figure 9 – Phénomène de pulvérisation

3.2.4 Paramètres d'anodisation

■ L'influence des paramètres d'anodisation peut être considérable sur les propriétés finales des couches, il est par conséquent important d'en comprendre les principaux effets.

- La **concentration en acide sulfurique** est située entre 180 et 200 g/L pour trouver le meilleur compromis entre la conductivité du bain (figure 8) et la dissolution chimique de l'oxyde. Des concentrations trop élevées conduisent à une attaque excessive de la couche, alors que des concentrations trop basses nécessitent une tension d'anodisation plus importante.

- La **température du bain** joue un rôle fondamental sur la structure de l'oxyde. La réaction chimique de dissolution variant de façon exponentielle avec la température, une augmentation de cette dernière conduit à une attaque importante de la couche en surface, voire au phénomène de « pulvérisation », poudre blanche à la superficie de l'oxyde traduisant une fragilisation importante de l'oxyde (figure 9). Dans le domaine de concentration cité précédemment, il ne faut pas dépasser 21 °C (qualité architecture). L'anodisation à température inférieure à 18 °C est possible, mais requiert une tension plus élevée.

- La **densité de courant**, qui conditionne la vitesse d'élaboration de la couche, ne peut pas être augmentée indéfiniment. En effet,

l'effet Joule qui en résulte au fond des pores, lieu de passage du courant, conduit à une élévation locale de la température, d'où dissolution accélérée de l'oxyde. À l'extrême, on peut provoquer le phénomène de « brûlure », c'est-à-dire la mise à nu du métal et l'arrêt du processus d'anodisation (la répartition des lignes de courant étant totalement déséquilibrée en raison de la présence simultanée d'une surface résistive et d'une surface conductrice).

Exemple

Dans les domaines de concentration et de température relatifs à l'anodisation pour l'architecture, il ne faut pas dépasser $1,5 \text{ A/dm}^2$ (traitement en statique).

- **L'agitation du bain** doit assurer une bonne homogénéité de la concentration en acide et de la température, sous peine de voir apparaître les défauts précédemment cités.

■ **Plusieurs variantes de l'anodisation sulfurique** sont également à mentionner.

- **L'anodisation sous courant alternatif** : il est possible d'anodiser l'aluminium en milieu sulfurique sous courant alternatif (50 Hz). Bien que l'efficacité globale soit inférieure à l'anodisation sous courant continu (l'anodisation n'intervient que pendant la moitié du cycle), les propriétés des couches sont différentes. Une étude comparative exhaustive [35] a permis d'en dresser la liste, dans laquelle on peut citer plus particulièrement :

- la plus grande transparence des films élaborés sous courant alternatif, qui dépend des alliages traités, mais qui est plus imputable à l'épaisseur moindre de l'oxyde qu'à ses caractéristiques intrinsèques ;

- la meilleure aptitude à la coloration chimique, quoiqu'une anodisation en courant continu sous faible tension produise les mêmes effets ;

- la porosité des couches, légèrement plus élevée sous courant alternatif ;

- la couleur jaunâtre de l'oxyde, qui diminue au colmatage mais s'intensifie si du cuivre ou du fer sont présents dans le bain ;

- la moindre résistance à l'abrasion et à la corrosion par rapport à des couches de même épaisseur élaborées sous courant continu et supérieures à $6 \mu\text{m}$. Cette différence a tendance à s'atténuer si l'anodisation en courant alternatif est effectuée à température plus élevée et à densité de courant plus faible.

Par ailleurs, il est possible d'augmenter significativement l'épaisseur des couches par ajout d'agents oxydants (sulfate ferrique par exemple) ou de colorer l'oxyde en incorporant dans le bain certains cations métalliques ([36] [37]).

- **L'anodisation sous courant pulsé** : sous cette appellation sont regroupées différentes formes de signaux (combinaison de courant continu avec du courant alternatif mono ou triphasé, courant alternatif partiellement redressé, signaux pulsés rectangulaires avec temps mort, etc.). Quelques études spécifiques ont été effectuées ([38] [39] [40] [41]), montrant que certaines propriétés des couches sont modifiées (couleur, aptitude au colmatage, vitesse d'édification...). Les applications industrielles se trouvent aujourd'hui essentiellement dans l'anodisation dure (§ 3.3), et, plus récemment, dans de nouveaux procédés de coloration électrolytique (§ 4.3.2).

- **Les additifs à l'acide sulfurique** : de nombreux additifs ont été étudiés pour améliorer les propriétés des couches ou augmenter la productivité du procédé. On peut citer, entre autres :

- l'acide oxalique, qui permet d'obtenir, sur des couches élaborées à 30°C , une dureté équivalente à celles produites à 20°C dans l'acide sulfurique seul, les concentrations relatives étant de 10 à 40 g/L en acide oxalique pour 200 à 250 g/L en acide sulfurique ([42] [43]). L'adjonction d'acide oxalique permet en outre d'améliorer la résistance à l'abrasion des couches [44], ce qui explique par ailleurs son utilisation en anodisation dure ;
- l'acide glycolique et le glycérol sont également mentionnés dans la littérature [45] comme limitant la dissolution de la couche.

À noter que ces additifs peuvent être combinés.

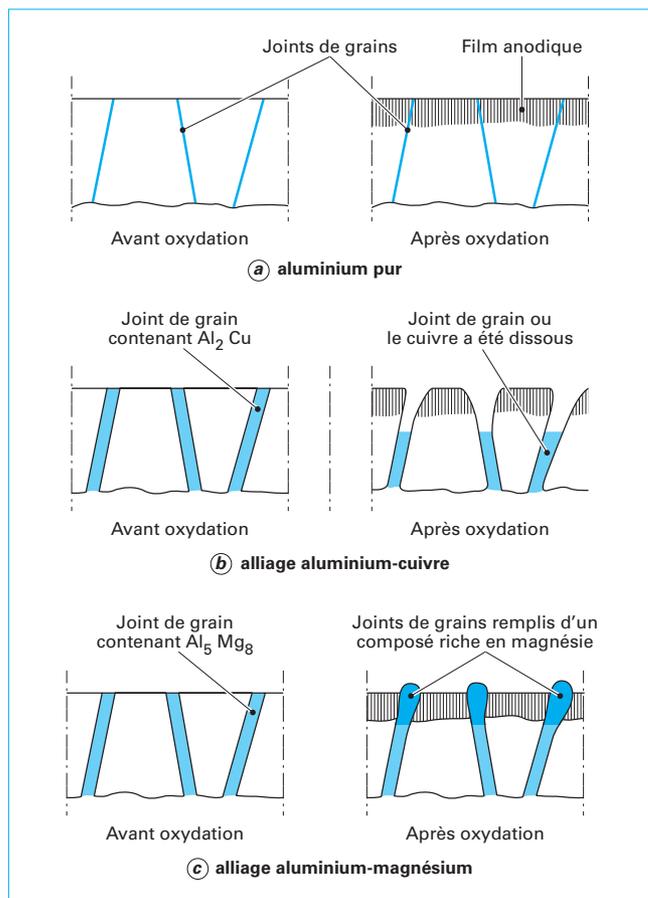


Figure 10 - Exemples de comportement d'alliages d'aluminium à l'anodisation sulfurique

3.2.5 Aptitude des alliages à l'anodisation sulfurique

3.2.5.1 Rôle des constituants de l'alliage

Des différences notables existent quant à l'aptitude à l'anodisation sulfurique des divers alliages d'aluminium. Le rôle des constituants de l'alliage sera différent selon que :

- les **éléments d'addition sont en solution solide** ; si cette dernière est homogène, les constituants se comporteront à l'anodisation selon leurs propriétés propres. Par exemple, le cuivre, le zinc et le magnésium altéreront peu l'aspect des couches pour peu qu'ils soient effectivement en solution solide ;

- les **éléments d'addition ne sont pas en solution solide**, mais sous forme métallique (par exemple le silicium) ou sous forme de combinaisons métalliques présentes dans le grain ou aux joints de grains. Non seulement la nature, mais aussi la taille, la forme et la répartition de ces précipités influenceront les propriétés de couches. Deux cas se présentent :

- le précipité est oxydé ou dissous plus rapidement que la matrice (exemple : CuAl_2) ; les couches formées présentent une porosité élevée et offrent une protection médiocre contre la corrosion,
- le précipité est moins réactif que la matrice, voire inerte (exemple : Al_5Mg_8) ; il se retrouve incorporé dans la couche, provoquant sa coloration plus ou moins marquée selon l'épaisseur de l'oxyde et la concentration en précipité (figure 10).

Des études assez poussées ont été réalisées pour connaître le comportement de ces composés intermétalliques à l'anodisation, mais également lors des traitements préparatoires (en particulier le décapage) (voir les références [46] [47] [48] [49] [50]). **Il ne faut pas oublier en effet que l'aspect final de la pièce dépend en grande partie de la préparation de surface.**

3.2.5.2 Classement des aptitudes à l'anodisation

D'une façon générale, on classe l'aptitude des alliages d'aluminium à l'anodisation sulfurique en deux familles (**alliages de corroyage** et **alliages de moulage**).

■ Alliages de corroyage

- **Alliages de la série 1000 (aluminium faiblement chargé)** : ils sont propices à l'anodisation de décoration et de protection. Les couches sont d'autant plus transparentes que le métal est pur. Vis-à-vis de l'aspect, les éléments les plus défavorables sont le fer et le silicium, même à de faibles teneurs.

- **Alliages de la série 2000 (aluminium-cuivre)** : l'utilisation de l'anodisation sulfurique est à éviter sur ces nuances. En effet, le cuivre se dissout dans l'électrolyte, ce qui conduit à la formation de couches poreuses et faiblement protectrices contre la corrosion (un colmatage adapté peut légèrement améliorer cette propriété, § 4.3.3). Par ailleurs, l'épaisseur de l'oxyde est limitée, la tenue à l'abrasion et la micro-dureté (mesuré sur coupe micrographique) sont dégradées [101].

- **Alliages de la série 3000 (aluminium-manganèse)** : l'anodisation de protection donne de bons résultats, mais au-delà de 1 %, voire moins pour les couches épaisses, le manganèse provoque la coloration de la couche en gris-brun, ce qui la rend peu apte à l'anodisation de décoration.

- **Alliages de la série 5000 (aluminium-magnésium)** : ces alliages sont faciles à anodiser et conviennent particulièrement bien à l'anodisation de protection. Pour des teneurs en magnésium allant jusqu'à 3 %, les couches sont relativement claires (l'indice de réfraction de l'oxyde de magnésium étant très proche de celui de l'oxyde d'aluminium), ce qui autorise l'emploi de certaines nuances à l'anodisation de décoration après brillantage. Pour des teneurs plus élevées, la couche prend un aspect grisâtre, voire jaunâtre si le métal contient également de faibles teneurs en manganèse ou en chrome.

- **Alliages de la série 6000 (aluminium-magnésium-silicium)** : les anodisations de protection et de décoration (sur métal satiné) se prêtent bien à ces alliages, couramment utilisés dans le bâtiment pour la menuiserie métallique. Des traitements d'homogénéisation adaptés permettent d'obtenir une structure métallurgique très régulière, en particulier vis-à-vis de la taille et de la répartition des précipités. Ces derniers influencent directement l'aspect final du métal après satinage (aspect mat) et anodisation.

- **Alliages de la série 7000 (aluminium-zinc)** : ces alliages, à hautes caractéristiques mécaniques, sont utilisés notamment dans le domaine aéronautique. Ceux qui contiennent du cuivre en quantité significative (par exemple l'alliage 7075) posent quelques problèmes d'aptitude à l'anodisation sulfurique (similaires à ceux rencontrés pour les alliages de la série 2000). En revanche, au sein de cette famille, ce n'est pas le cas des nuances contenant peu de cuivre, par exemple l'alliage 7020.

■ Alliages de moulage

Pour ces alliages, l'élément d'addition le plus fréquent est le silicium. Pour des teneurs supérieures à 5 %, les couches anodiques prennent des teintes grisâtres d'autant plus prononcées que la teneur en Si est élevée et que leur épaisseur est importante. Ceci peut éventuellement être mis à profit pour des propriétés d'aspect.

L'aptitude à l'anodisation de protection dépendra de la teneur en silicium (les alliages très chargés du type AlSi12 ou AlSi10Cu2 étant peu favorables), mais également des autres constituants de l'alliage, en particulier le cuivre, dont la présence en quantité

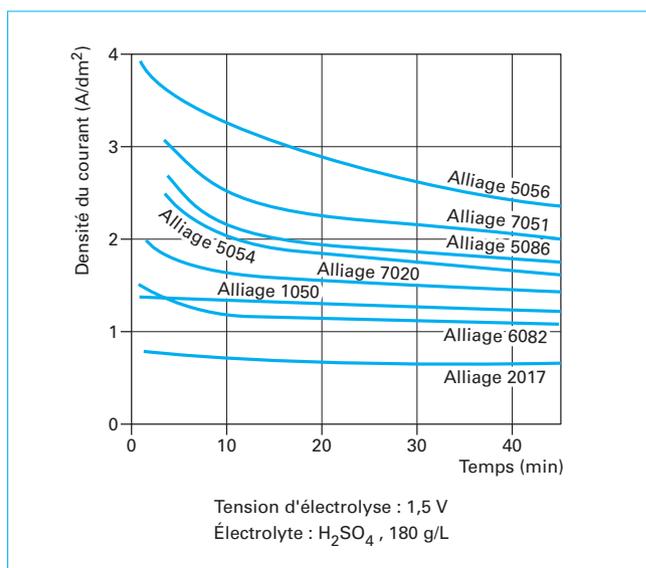


Figure 11 – Variation de la densité de courant en fonction du temps pour différents alliages

importante est néfaste quant aux propriétés protectrices de l'oxyde anodique ; c'est par exemple le cas des nuances AlCu8Si ou AlCu10Mg. En revanche, les alliages de moulage contenant du magnésium, s'ils sont difficiles à élaborer, s'anodisent très bien (AlMg6, AlMg10...).

Sauf sur les alliages de pureté élevée, il n'est pas possible d'obtenir des couches transparentes sur les pièces moulées, ce qui n'interdit pas l'emploi d'anodisation colorée sur certaines nuances (exemple : AlMg5).

Le procédé de moulage aura également une influence sur l'aptitude à l'anodisation de par les défauts de surface qu'il sera susceptible de créer (porosités, retassures, ségrégations grossières...).

3.2.5.3 Commentaires

Que l'on ait affaire aux alliages de corroyages ou aux alliages de moulage, deux points importants sont à signaler :

- lorsque l'anodisation est effectuée à tension constante, les densités de courant, donc les vitesses d'élaboration, sont variables d'une nuance à l'autre (figure 11) ;

- à densité de courant fixée, c'est la tension d'anodisation qui pourra différer (tableau 3).

Enfin, il faut souligner que la composition du métal n'est qu'un facteur parmi d'autres influençant son aptitude à l'anodisation sulfurique. L'aluminium subit en particulier des transformations et traitements thermiques qui sont à même de modifier sa structure (taille et orientation des grains, nature et répartition des composés intermétalliques...) et donc sa réponse à l'oxydation anodique. Il est d'ailleurs fréquent que la gamme de transformation des alliages soit optimisée à cet effet.

Inversement, à composition identique, des variations même minimes dans les conditions de transformation peuvent conduire à des modifications d'aspect du métal anodisé.

3.3 Anodisation dure

L'anodisation dure est un cas particulier de l'anodisation sulfurique car, dans la grande majorité des cas, l'acide sulfurique est utilisé comme électrolyte de base, en combinaison ou non avec d'autres produits.

Tableau 3 – Tension initiale d'anodisation pour différents alliages d'aluminium

Identification de l'alliage	Tension initiale (en V)	
Densité de courant (A/dm^2)	1,0	1,5
Alliages de corroyage		
1199	13,0	15,4
1050 A	12,8	15,4
5754	12,2	14,6
5056 A	11,2	13,6
3003	13,6	16,8
3034	13,0	16,0
2117	14,2	16,6
2017 A	15,4	17,0
2024	15,6	18,4
6060	13,4	14,8
7049 A	12,8	14,8
Alliages de moulage		
AlSi4Mg	15,8	18,0
AlSi7Mg	17,4	19,0
AlSi10Mg	20,0	23,0
AlSi13		23,4
AlSi2Cu	16,2	18,0
AlSi5Cu3	15,0	18,4
AlSi10Cu4	12,2	17,4
AlCu5MgTi	18,6	20,8
AlCu8Si	5,2	5,8
AlMg3Ti	12,4	14,2
AlMg6	12,4	13,6
AlMg10	8,2	8,4

■ Ce qui caractérise en premier lieu ce traitement, c'est la faible température du bain (généralement -5 à $0^\circ C$) qui autorise l'emploi de densités de courant plus élevées (typiquement $3 A/dm^2$). Les conséquences en sont les suivantes :

- la faible température de l'électrolyte minimise la dissolution de l'oxyde, ce qui permet d'atteindre des épaisseurs plus importantes qu'en anodisation conventionnelle, à savoir de 25 à $100 \mu m$;
- la dissolution des précipités est également diminuée, d'où leur incorporation plus importante dans l'oxyde ; ce dernier présente par conséquent une coloration plus marquée que pour l'anodisation pratiquée à $20^\circ C$;

**Figure 12 – Tête de piston traitée par anodisation dure**

- la porosité de l'oxyde est plus faible car la tension d'élaboration (qui, à densité de courant constante, augmente au cours du processus) a une incidence directe sur la morphologie de la couche (§ 2.2). Il en résulte, pour les couches ainsi formées, une augmentation de la dureté et de la résistance à l'abrasion, cette dernière étant parfois supérieure au chromage dur ou à l'acier carbonitruré [51]. Notons que l'on ne peut augmenter indéfiniment la tension pour des raisons technologiques (capacité du redresseur) ou sous peine de provoquer la brûlure de la couche (voir description du phénomène au § 3.2.4).

■ Les procédés d'anodisation dure sont nombreux, utilisant l'acide sulfurique à diverses concentrations avec ou sans additifs (amélioration de la dureté, traitements des alliages au cuivre, etc.). Par ailleurs, quelques traitements sont effectués à l'aide de formes de courant variées : la superposition de courant alternatif et continu, ou l'emploi de courants pulsés [52] permettent d'accélérer le processus, tout comme l'utilisation judicieuse de l'agitation forcée qui autorise, dans certaines applications, l'augmentation considérable des densités de courant [53].

■ Sur la plupart des alliages, l'anodisation s'accompagne d'un gonflement de l'oxyde qui se traduit par une surépaisseur par rapport à la cote initiale (que l'on estime à 30% de l'épaisseur totale de l'oxyde). Ce phénomène est particulièrement visible en anodisation dure, compte tenu des épaisseurs visées, et doit être pris en compte lorsque les tolérances dimensionnelles des pièces sont serrées. Il est parfois nécessaire de rectifier la couche après anodisation.

Le tableau 4 [54] présente quelques procédés industriels d'anodisation dure et leurs principales caractéristiques.

■ Les applications industrielles de ces procédés sont nombreuses. En particulier, on met à profit les caractéristiques suivantes :

- la résistance à l'abrasion, l'aptitude au frottement : pistons de frein automobile, pièces de boîte automatique, corps de vérins, corps de pompe, guide-fil, ustensiles culinaires, glissières de rack pour équipement électronique, pales de turbine, bords d'attaque de pales d'hélicoptères... ;
- la résistance électrique : enroulement électrique, corps de disjoncteur, pièces de moteur électrique, équipements radar, rhéostats, contacteurs... ;
- l'isolation thermique : têtes de pistons (figure 12), tuyères de fusée, boucliers thermiques...

Tableau 4 – Procédés d'anodisation dure à base d'acide sulfurique [55]

N°	Électrolyte	Référence	Domaine de température (°C)	Forme de courant	Domaine de tension (V)	Domaine de densité de courant (A/dm ²)	Caractéristiques générales
1	H ₂ SO ₄ 0,5 à 2,5 % (en volume)	<i>Csokan</i>	- 10 à - 5	Continu	20 à 100	2 à 10	Couche rugueuse
2	H ₂ SO ₄ 10 ± 2 % (en volume)	<i>Alumilite</i>	0 à 5	Continu	15 à 70	1,5 à 3	Ne convient pas pour les alliages au Cu
3	H ₂ SO ₄ 15 ± 1 % (en volume) + solution saturée en CO ₂	<i>MHC</i>	0 à 5	Continu	15 à 80	1,5 à 3,6	Ne convient pas pour les alliages au Cu
4	H ₂ SO ₄ 20 ± 2 % (en volume)	<i>MOD</i>	0 à 10	Continu	15 à 120	1,5 à 4,8	Convient pour les alliages au Cu
5	H ₂ SO ₄ 7 à 20 % (en volume) + 10 à 20 g/L d'acide oxalique ou d'acide glyoxylique	<i>Alumilite 226</i> <i>Duranodic 100</i>	- 5 à 10	Continu	20 à 100	1,5 à 3,6	Couches plus dures
6	H ₂ SO ₄ 10 à 20 % (en volume) + 10 à 50 mL/L « Sanfran », contenant de l'acide mellitique	<i>Sandford</i>	- 5 à 0	Continu	15 à 70	1,5 à 4,8	Convient pour les alliages au Cu
7	H ₂ SO ₄ 10 à 20 % (en volume) + 2,5 à 10 % (en volume) glycérol et/ou de triéthanolamine		0 à 10	Continu	20 à 100	1,5 à 3,6	Très lisse
8	H ₂ SO ₄ 10 à 20 % (en volume) + 5 à 50 mL/L HNO ₃	<i>Acorn</i>	- 10 à - 5	Continu	20 à 120	1,5 à 4,8	Croissance rapide de l'oxyde Convient pour les alliages au Cu
9	Idem 1 à 8	<i>Hardas</i>	- 5 à 0	Continu + alternatif	10 à 90	1,5 à 5 (cc) 0,5 à 2,5 (ca)	Croissance rapide de l'oxyde Films très épais
10	Idem 1 à 8	<i>HDA</i> (puissance constante)	- 5 à 10 (le plus souvent 10 °C)	(1)	(1)	(1)	Croissance rapide de l'oxyde
11	Idem 1 à 8 (souvent acide sulfurique + acide oxalique)	<i>Sandford</i> (plus basse tension)	- 5 à 0	Continu + alternatif	24	1 à 5	Épaisseur uniforme
12	Idem 1 à 4		- 5 à 20 (le plus souvent 10 °C)	Alternatif	20 à 70	1 à 10	Croissance rapide sur la plupart des alliages

(1) Procédé à puissance constante : le produit $j \times U$ [avec j (en A/dm²) densité de courant et U (en V) tension d'anodisation] reste constant dans la fourchette 60 à 360 W/dm².

ca courant alternatif.
cc courant continu.

3.4 Anodisation chromique

L'acide chromique fut l'un des premiers électrolytes testés en anodisation, le procédé Bengough-Stuart datant de 1923. L'anodisation chromique a connu un développement parallèle à l'anodisation sulfurique car les couches obtenues, tout en permettant la protection contre la corrosion du métal, possèdent des caractéristiques spécifiques :

- elles sont d'épaisseur moindre que les couches sulfuriques, ce qui minimise les problèmes de tolérance sur les cotes ;
- elles ont une moindre incidence sur les caractéristiques mécaniques des pièces traitées (§ 5.8) ;
- elles ont un meilleur coefficient de frottement, mais une moins bonne résistance à l'abrasion.

Par ailleurs, l'anodisation chromique permet l'accrochage de revêtements organiques (peintures, colles).

■ Dans ses **principales applications industrielles**, le bain contient entre 30 et 50 g/L d'anhydride chromique (CrO_3) et travaille à des températures plus élevées que l'anodisation sulfurique, typiquement 40 à 50 °C. Le processus s'effectue suivant des cycles de tension particuliers tels que celui représenté sur la figure 13 (cycle Bengough-Stuart). Différentes variantes existent en ce qui concerne la température de l'électrolyte, sa concentration, l'utilisation d'additifs, ou le cycle de tension.

Les couches obtenues sont de faible épaisseur (2 à 7 µm suivant les alliages et les applications), et présentent une structure plus ramifiée et plus poreuse que les couches sulfuriques (figure 14).

■ Le **principal débouché de ce traitement**, notamment en Europe, est l'industrie aéronautique, le plus souvent sur des alliages à hautes caractéristiques mécaniques (séries 2000 et 7000). L'acide chromique présente en effet l'avantage, en particulier par rapport à l'acide sulfurique, de ne pas attaquer le métal en cas de rétention de produit sur les pièces de forme complexe, fréquemment rencontrées dans ce domaine.

L'oxyde anodique, dont l'épaisseur avoisine 3 µm pour ces applications, peut être colmaté, ce qui lui confère intrinsèquement de bonnes propriétés en terme de tenue à la corrosion, mais le fragilise lorsqu'une peinture est appliquée [55]. Pour cette raison, lorsque le métal anodisé est susceptible d'être peint ou collé, on évite le colmatage ou, pour assurer un compromis entre protection contre la corrosion et adhérence, on réalise un semi-colmatage à l'eau bouillante, éventuellement additionnée de bichromate de potassium [56]. Les pratiques à cet égard diffèrent suivant les constructeurs aéronautiques et les conditions d'utilisation des pièces.

La présence de chrome hexavalent dans les bains et les contraintes sévères que cela impose en terme de rejet (effluents aqueux et gazeux) n'empêchent pas l'anodisation chromique d'être encore largement utilisée par les constructeurs aéronautiques européens, même si des solutions alternatives sont à l'étude ([57] [58] [59]). En outre, les sites industriels modernes utilisent des procédés de purification et de régénération des bains, de recyclage de l'eau de rinçage et de lavage efficace des effluents gazeux [60].

3.5 Anodisation phosphorique

L'emploi d'acide phosphorique en tant qu'électrolyte d'anodisation conduit, en raison de son pouvoir de dissolution élevé, à la formation de couches minces et très poreuses (figure 15).

Les applications industrielles de ce procédé, dont les conditions d'élaboration de l'oxyde peuvent varier sensiblement, sont les suivantes.

■ L'une des premières applications proposée pour l'anodisation phosphorique consistait à **préparer la surface de l'aluminium avant dépôt galvanique** ([61] [62]), mais, à ce jour, aucun développement

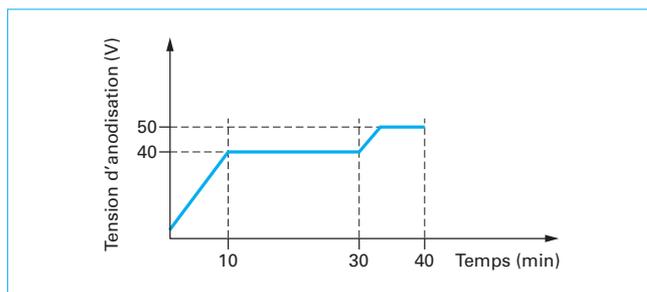


Figure 13 - Exemple de cycle de tension utilisé en anodisation chromique (cycle Bengough-Stuart)

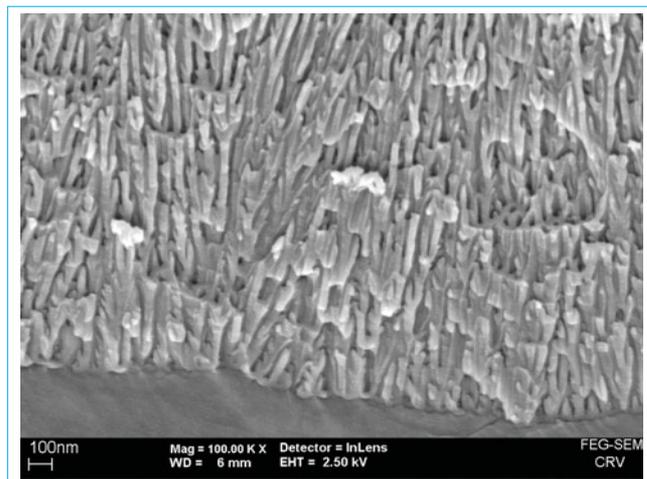


Figure 14 - Micro-fractographie d'une couche anodique chromique

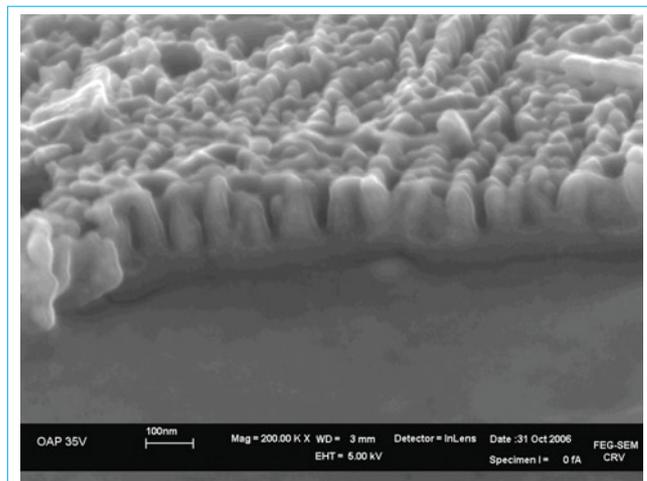


Figure 15 - Micro-fractographie d'une couche phosphorique mince

industriel significatif n'est à signaler. En effet le coût important de cette opération et des investissements correspondants rendent cette technique peu compétitive face à des traitements purement chimiques (procédé d'immersion au zincate par exemple).

■ L'aptitude des couches phosphoriques à recevoir un revêtement organique est utilisée entre autres pour le métal destiné à la fabrication de boîtes ou de plaques lithographiques (avant dépôt de vernis photosensible). L'anodisation permet en effet, dans certaines conditions, le nettoyage de la surface (la vitesse de dissolution de la couche est alors égale à celle de formation), ou l'obtention rapide d'une couche poreuse mince (quelques dizaines de nanomètres) qui favorise l'adhérence ([63] [64]).

■ L'un des domaines majeurs de l'anodisation phosphorique est l'aéronautique, principalement aux États-Unis. Ce traitement, breveté par Boeing, a été en effet privilégié pour se substituer à l'anodisation chromique dans la préparation de surface du métal avant collage structural ou avant peinture ([65] [66] [67] [68]). Parmi d'autres préparations de surface, l'anodisation phosphorique assure en effet une excellente durabilité [69], que l'on explique généralement par l'incorporation dans la couche de l'ion phosphate dont la propriété est d'inhiber les réactions d'hydratation de l'oxyde à l'interface métal-revêtement. Les couches sont plus épaisses que dans le domaine cité précédemment puisqu'elles atteignent de 400 à 800 nm, pour des temps de traitement d'environ 20 à 25 min, une concentration en acide phosphorique de 10 % en masse, une température d'électrolyte de 25 °C et une tension d'anodisation de 10 V (spécifications Boeing pour le collage).

Toutes ces applications font l'objet de diverses variantes quant aux conditions opératoires du processus :

- concentration en acide phosphorique ;
- température du bain ;
- temps de traitement ;
- utilisation de courant continu ou alternatif ;
- densité de courant ou tension ;
- présence d'additifs.

Les paramètres sont adaptés en fonction de la propriété recherchée, de l'alliage traité et des contraintes technologiques (traitement en statique ou au défilé).

3.6 Combinaisons d'acides

3.6.1 Anodisation sulfurique-borique

L'anodisation phosphorique non peinte, en tant que procédé de substitution à l'anodisation chromique dans le domaine aéronautique, ne permet pas de répondre à certaines spécifications vis-à-vis de la tenue à la corrosion, notamment dans l'aéronautique militaire américaine (MIL-A-8625 Type 1).

C'est la raison pour laquelle un autre procédé a vu le jour, également breveté par la société Boeing [70]. L'électrolyte est constitué d'un mélange d'acide sulfurique (3 à 5 % en masse) et d'acide borique (0,5 à 1 % en masse), et travaille entre 20 et 25 °C, sous une densité de courant inférieure à 1 A/dm² et une tension d'environ 15 V. Ceci permet d'obtenir des couches de 1 à 3 µm, qui peuvent être colmatées, et dont les performances revendiquées sont au moins équivalentes à celles obtenues en anodisation chromique (tenue à la corrosion, adhérence des revêtements) ([71] [72]).

3.6.2 Anodisation sulfurique-tartrique

Le principe de combinaison acide fort/acide faible a également été développé par la société Alenia [102] sous la forme d'un mélange acide sulfurique – acide tartrique, une composition typique étant respectivement de 45 g/L et 80 g/L. Sous une température de 30 à 35 °C, la tension est augmentée progressivement à 15 V et, pour une durée d'environ 25 min, la couche obtenue est de l'ordre de 5 µm.

Tableau 5 – Liste (non exhaustive) de quelques procédés d'autocoloration

Dénomination	Société	Nature de l'électrolyte
Acadai	ISML (Italie)	Acide maléique + acide sulfurique
Alcanodox	Alcan (Canada)	Acide oxalique
Duranodic 300	Alcoa (États-Unis)	Acide sulfophtalique + acide maléique + acide sulfurique
Eurocolor 300	Pechiney (France)	Acide sulfomaléique
Kalcolor	Kaiser (États-Unis)	Acide sulfosalicylique + acide sulfurique
Permalux	Alusuisse (Suisse)	Acide maléique + acide sulfurique
Reynocolor	Reynolds (États-Unis)	Acide sulfophtalique + acide sulfurique
Sumitone	Sumitomo Light Metal (Japon)	Acide naphthalène disulfonique
Toyocolor	Toyo Chemical Ind. (Japon)	Acide maléique + acide sulfurique
Veroxal	VAW (Allemagne)	Acide maléique + acide sulfurique

L'avantage environnemental que procure cette formulation par rapport à l'anodisation chromique utilisée dans l'industrie aéronautique est mis en avant, ainsi que le raccourcissement du cycle d'anodisation.

3.6.3 Mélange acide sulfurique – acide phosphorique

Il s'agit d'un brevet Airbus [103] pour une concentration à peu près équivalente de ces deux composés (environ 100 g/L), une température d'utilisation de 27 °C et une montée progressive en tension jusqu'à 15-20 V (maintenue environ 15 min).

3.6.4 Procédé duplex

Proposé par Airbus plus récemment [104], il consiste à réaliser une première oxydation anodique dans un mélange sulfurique – phosphorique tel que cité § 3.6.3. La partie externe de la couche qui en résulte (rappelons que le front de croissance se situe à l'interface métal/oxyde), joue le rôle de promoteur d'adhérence.

Dans un deuxième temps, une anodisation en milieu sulfurique/tartrique (§ 3.6.2) permet un renforcement du caractère barrière de la couche (partie interne) et améliore la tenue à la corrosion.

3.7 Anodisation autocolorée

L'utilisation de l'aluminium dans le domaine architectural a contribué au développement de nombreux procédés destinés à le colorer de façon durable. La caractéristique principale de l'anodisation autocolorée est l'utilisation comme électrolyte d'acides organiques, souvent en combinaison, éventuellement additionnés d'acide sulfurique. Le domaine est vaste car de nombreux procédés ont été développés et brevetés par différentes sociétés (voir liste non exhaustive sur le tableau 5).

■ Cependant, même si les variantes sont nombreuses, l'anodisation autocolorée possède les **caractéristiques** suivantes.

- Bien que la température des bains soit proche de la température ambiante, les solutions employées ont un faible pouvoir de dissolution sur la couche d'oxyde. Les constituants de l'alliage se trouvent par conséquent incorporés dans l'oxyde et lui confèrent une couleur plus ou moins marquée suivant le substrat (d'où l'appellation d'« autocoloration »).

Exemple

Le procédé utilisant le mélange acide sulphophtalique/acide sulfurique (procédé *Duranodic 300*, Alcoa) donne les résultats suivants [73] :

- jaune terne sur l'alliage 1100 ;
- jaune pâle sur l'alliage 5052-H34 ;
- noir sur l'alliage 6061-T6 ;
- bronze sur l'alliage 6063-T5 ;
- noir sur l'alliage 7075-T6.

- Les densités de courant sont plus élevées qu'en anodisation sulfurique (jusqu'à 3 A/dm²) et, facteur important, la tension augmente significativement au cours du traitement (de 30 à 40 V jusqu'à plus de 100 V en 30 à 40 min de traitement suivant les procédés et les alliages concernés). À cet égard, la chaleur de réaction qui résulte de l'opération nécessite des systèmes de réfrigération adaptés. Il est clair par ailleurs que le coût énergétique de l'autocoloration est plus élevé que celui de l'anodisation sulfurique standard.

- En raison des conditions opératoires particulières, notamment vis-à-vis de la tension d'élaboration, les couches obtenues, quoique poreuses, sont plus compactes qu'en anodisation sulfurique. Elles s'apparentent d'ailleurs à celles obtenues en anodisation dure (§ 3.3) et, bien que leur épaisseur ne puisse dépasser 30 µm, possèdent d'excellentes propriétés de dureté et de résistance à l'abrasion.

■ La possibilité de colorer l'aluminium directement au cours de l'anodisation explique le **succès de ce procédé dans l'architecture**, en particulier aux États-Unis. Cependant, l'autocoloration a aujourd'hui progressivement cédé la place à **d'autres techniques de coloration** (coloration électrolytique pour le bâtiment, § 4.3.2), et ce pour plusieurs raisons :

- le coût des bains est plus élevé que pour l'anodisation sulfurique ou l'anodisation dure ;
- le coût énergétique est également plus important ;
- le procédé est très sensible à la nature mais également à la structure du métal traité. En effet, à même composition, on peut observer sur deux pièces des variations notables en terme de teinte, pour peu qu'elles aient subi des transformations ou des traitements thermiques différents (ce phénomène est d'ailleurs détectable au cours même du processus en suivant, à densité de courant donnée, l'évolution de la tension). Il est donc indispensable de maîtriser parfaitement la composition et la transformation du métal si l'on souhaite obtenir une bonne reproductibilité des couleurs.

Néanmoins, pour certaines applications particulières, l'autocoloration peut être une solution intéressante, en mettant par exemple à profit la dureté des couches, parfois supérieure à l'anodisation dure.

3.8 Autres procédés

Il n'est pas possible de traiter dans ce document l'ensemble des procédés d'anodisation étudiés et mis au point depuis des décennies. Nous en citons cependant deux.

■ Anodisation en milieu oxalique [74]

De moins en moins pratiquée aujourd'hui, car plus coûteuse que son homologue sulfurique, l'anodisation oxalique a surtout été employée au Japon et en Allemagne sous l'appellation *Eloxal*.

L'acide oxalique possède un faible pouvoir de dissolution sur l'oxyde, ce qui permet d'obtenir des couches épaisses et dures. On retrouve d'ailleurs fréquemment ce produit comme additif pour renforcer la dureté des films (§ 3.2.4).

L'oxyde obtenu prend des teintes variables selon les alliages traités : jaunâtres sur les alliages des séries 1000 et 5000, bleuâtres sur les nuances 2000, grises sur les alliages au silicium. L'utilisation de courant alternatif permet par ailleurs l'obtention de couches allant du bronze jusqu'au marron.

Signalons au passage une **application particulière, le procédé *Ematal*** qui utilise, en combinaison avec l'acide oxalique, de l'acide borique, de l'acide citrique, de l'acétate de cobalt et de l'oxalate double de titane et de potassium [75]. Le film obtenu, qui peut aller jusqu'à 30 µm, possède un aspect gris, opaque (il peut cacher l'aspect du métal sous-jacent), rappelant celui de la porcelaine.

Cependant, le coût de ce procédé ne peut le réserver qu'à des applications techniques particulières, où le prix de revient de la pièce traitée intervient peu.

■ Anodisation en milieu alcalin

Des études ont été menées pour étudier la possibilité d'anodiser l'aluminium en milieu alcalin (ce qui est possible compte tenu du caractère amphotère du métal). Les couches obtenues semblent par contre avoir une structure différente. Par exemple en milieu soude + peroxyde d'hydrogène l'oxyde possède une couche barrière, mais au lieu de la morphologie colonnaire classique obtenue en milieu acide, les couches présentent des macroporosités liées à la dissolution élevée des précipités en milieu alcalin [76].

Dans le cadre du développement de nouvelles générations de procédés « propres », et sans effet notable sur la tenue à la fatigue du matériau, on peut signaler par ailleurs l'anodisation en milieu borax [77].

4. Mise en œuvre industrielle d'une gamme d'anodisation

4.1 Préparations de surface

L'anodisation, comme tout procédé de finition, requiert un certain nombre d'opérations préliminaires :

- pour rendre la surface propice au traitement ;
- pour conférer au métal un aspect décoratif (brillant ou mat).

4.1.1 Dégraissage

Le dégraissage est une opération incontournable dans toute gamme de traitement de surface, l'anodisation n'échappant pas à la règle. De sa bonne exécution dépend en effet la réussite du traitement final.

En ce qui concerne l'aluminium et ses alliages, deux types de dégraissage sont principalement rencontrés.

■ Dégraissage aux solvants

Industriellement, les solvants à base d'hydrocarbures (white-spirit, kérosène...) ainsi que les alcools et cétones sont rarement employés du fait de leur inflammabilité.

En revanche, les solvants chlorés ou chlorofluorés sont plus fréquemment utilisés car ils sont ininflammables. Le dégraissage peut s'effectuer manuellement, au trempé ou en phase vapeur.

Néanmoins ces dégraissants sont à utiliser avec précaution en raison des problèmes de toxicité et d'environnement que certains d'entre eux peuvent induire, la législation devenant de plus en plus sévère à cet égard [78].

Par ailleurs, quelques composés sont susceptibles de réagir, en présence d'aluminium qui agit comme catalyseur (c'est le cas, par exemple, du trichloréthylène) pour former de l'acide chlorhydrique, source potentielle de problèmes de corrosion [79].

■ Dégraissage en milieu aqueux

Il utilise des molécules tensioactives pour éliminer le film gras et le maintenir en solution (détergence, émulsification) [80]. Pour simplifier, on peut classer les principales familles de dégraissant comme suit.

- **Dégraissage en milieu alcalin** : les solutions fortement alcalines (pH supérieur à 11) ont une action décapante sur le métal, que l'on inhibe généralement par des additifs tels que le silicate de sodium, le borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)... Les lessives moins basiques (pH inférieur à 10), donc moins agressives, peuvent ne pas contenir ces inhibiteurs. La plupart des solutions sont à base de soude ou de potasse, de carbonate et bicarbonate de sodium, d'ortho ou pyrophosphate de sodium. En plus des composés tensioactifs, ces lessives contiennent également des agents complexants dont l'action est de minimiser l'effet néfaste de la dureté de l'eau.

- **Dégraissage en milieu acide** : les bains sont souvent à base d'acide phosphorique ou d'acide sulfurique. Lorsque l'on souhaite augmenter le pouvoir décapant du bain, des dérivés fluorés peuvent être ajoutés. De nombreuses combinaisons sont possibles entre différents produits acides (sulfurique, phosphorique, nitrique, fluorhydrique, etc.).

■ D'une façon générale, le **choix du dégraissant** doit tenir compte de l'alliage traité, de l'état de surface de la pièce à dégraisser et de l'application finale. L'opération de dégraissage n'est en effet pas neutre vis-à-vis du métal :

- elle exige un rinçage rigoureux des pièces qui, en sortie du bain de dégraissage, sont recouvertes d'une pellicule de tensioactifs ;
- certains composés peuvent subsister en surface et nuire aux opérations ultérieures (certaines lessives fortement silicatées peuvent par exemple gêner l'anodisation).

Le meilleur choix résultera d'un dialogue entre le façonnier et les fournisseurs de bains (voir [Doc. M 1 630v2]), qui offrent aujourd'hui une large diversité de produits.

4.1.2 Décapage. Satinage. Usinage chimique

Bien que certains bains de dégraissage aient également une action décapante sur l'aluminium, il est fréquemment nécessaire d'enlever une quantité significative de métal, pour éliminer les oxydes superficiels et se rapprocher de la concentration à cœur de l'alliage.

Pour ce faire, on utilise des **bains de décapage**, que l'on peut, en ce qui concerne les alliages d'aluminium, classer en différentes catégories.

■ Décapage alcalin

Les bains, qui travaillent aux alentours de 50 °C, sont en général à base de soude. Le décapage donne lieu à la réaction :



Notons au passage que le **dégagement d'hydrogène accentué, par effet mécanique, le décrochage des souillures superficielles.**

Encadré 2 – Satinage et usinage chimique

- Le **satinage**, utilisé dans le domaine du bâtiment, a pour rôle supplémentaire de conférer à la surface un aspect décoratif. Il utilise parfois des bains dont la viscosité est spécialement calculée pour que l'aluminium produit par la réaction chimique soit éliminé par l'entraînement dû aux pièces. La concentration en aluminium reste alors constante en solution, d'où l'appellation de « bains permanents » ou « *long life* ».

- L'**usinage chimique**, utilisé dans l'aéronautique lorsque les procédés d'usinage conventionnels ne peuvent être employés. Le principe reste celui du décapage alcalin, mais les concentrations en soude sont élevées (100 g/L), ainsi que la température du bain (100 °C). Par ailleurs, des additifs spécifiques sont ajoutés pour réguler la vitesse d'attaque, très importante dans ces solutions (3 à 4 mm/h).

Les solutions contiennent également des agents complexants qui évitent la précipitation de l'alumine (entartrage des parois et des éléments chauffants), des agents séquestrants et des oxydants permettant d'éviter l'action des métaux lourds en solution. Deux cas particuliers utilisant le principe du décapage alcalin sont signalés dans l'encadré 2.

Pour assurer une opération reproductible, le décapage en milieu alcalin requiert la surveillance et le contrôle des paramètres suivants :

- concentration en soude ;
- concentration en aluminium ;
- température (la réaction est exothermique et nécessite le refroidissement du bain) ;
- concentration en additifs.

Le décapage alcalin laisse en surface de l'aluminium une surface souillée (des hydroxydes d'aluminium et des éléments d'addition) qui prend parfois une couleur sombre. Il est indispensable, avant de continuer la gamme d'anodisation, de procéder à une dissolution de ces composés (*neutralisation* ou *blanchiment*) qui s'effectue en général en milieu acide oxydant, comme l'acide nitrique (ou nitrique/fluorhydrique pour les alliages chargés en silicium) ou l'acide sulfurique additionné d'un oxydant.

■ Décapage acide

Comme pour les bains de dégraissage, il existe dans le commerce de nombreuses combinaisons d'acides (H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 , HF, CrO_3 ...). Signalons cependant que lorsque l'on souhaite une attaque importante du métal en milieu acide, on peut provoquer une attaque préférentielle aux joints de grains et une diminution des caractéristiques mécaniques de l'aluminium.

Un **cas particulier est à mentionner**, qui concerne le mélange acide sulfurique/acide chromique. Ce décapage, utilisé à 60 °C, est fréquemment employé en préparation avant anodisation dans le **domaine aéronautique**.

4.1.3 Brillantage chimique ou brillantage électrolytique

À l'inverse du satinage dont l'objet est de conférer une surface mate décorative à l'aluminium, les traitements de brillantage ont pour objectif de niveler la rugosité du métal et, par conséquent, de lui donner un aspect brillant pour des motifs esthétiques ou pour améliorer ses propriétés optiques (§ 3.2.1 anodisation de décoration et pour application optique).

En dehors des traitements mécaniques qui seront évoqués au paragraphe 4.1.4, il existe deux grands procédés de brillantage.

■ Brillantage chimique

Il s'effectue souvent dans des milieux acides concentrés, à haute température et fait intervenir des mécanismes complexes :

- la diffusion des ions dans la couche visqueuse à l'interface métal/solution ;
- des phénomènes de micropiles galvaniques entre les constituants de l'alliage ;
- l'intervention de métaux lourds (le cuivre par exemple) ajoutés en solution.

Il en résulte une vitesse de dissolution plus élevée pour les aspérités du métal que pour les creux, d'où un effet de nivellement.

■ Brillantage électrolytique

Il fait intervenir les mêmes effets de couche visqueuse, tout en y ajoutant la dissolution par effet de pointe sur les aspérités. On peut assimiler ce type de traitement à une anodisation où la vitesse de formation de l'oxyde est identique à celle de sa dissolution.

■ En fonction des propriétés recherchées et de l'alliage traité (toutes les nuances ne sont pas aptes au brillantage), on choisira le **traitement adapté** parmi les nombreuses variantes mises au point depuis des décennies.

Il faut préciser, par ailleurs, que certains traitements de brillantage laissent en surface du métal une couche d'oxyde qui peut être rédhibitoire vis-à-vis de l'anodisation. On procède alors à une opération supplémentaire de désoxydation, par exemple dans un mélange constitué d'acide phosphorique et d'acide chromique, dont la caractéristique est de dissoudre l'oxyde sans attaquer le métal.

4.1.4 Traitements mécaniques

Vis-à-vis de l'anodisation, les traitements préparatoires mécaniques jouent essentiellement un rôle décoratif. On en distingue deux catégories.

■ Polissage mécanique

Obtenu par des opérations de bufflage, de tamponnage et d'avivage (utilisant fréquemment des pâtes abrasives), il permet de diminuer la rugosité du métal et de lui conférer un aspect brillant. Il convient cependant de rester prudent vis-à-vis de ces traitements lorsque l'on souhaite réaliser une finition de type anodisation :

- tous les alliages ne sont pas équivalents quant à leur aptitude au polissage mécanique (par exemple les alliages chargés en cuivre se polissent bien, mais se ternissent rapidement) ;
- certains défauts peuvent être masqués par le traitement mécanique, mais réapparaître au cours de la gamme d'anodisation (exemple : le défaut de *fluage de surface* sur les alliages peu chargés, figure 16) ;
- la structure métallurgique peut être perturbée en surface (**couche de Beilby**), ce qui se révèle lors des traitements d'oxydation anodique.

Après ce type de traitement, on procède souvent, avant anodisation, à une opération complémentaire du brillantage chimique ou électrolytique (§ 4.1.3).

■ Satinage et matification de surface

• Le **satinage** ou, plus généralement, la **matification de surface** sont obtenus par des opérations de **brossage** ou par **jet abrasif** (corrindon, microbilles de verre, etc.) Il est important de prendre en compte les matériaux utilisés lors de ces opérations si une anodisation est prévue en traitement de finition.

Exemple

Le brossage par des matériaux métalliques différents de l'aluminium (cuivre, fer...), de par les risques de corrosion galvanique qu'ils sont susceptibles de provoquer, nécessite un décapage approprié avant oxydation anodique.

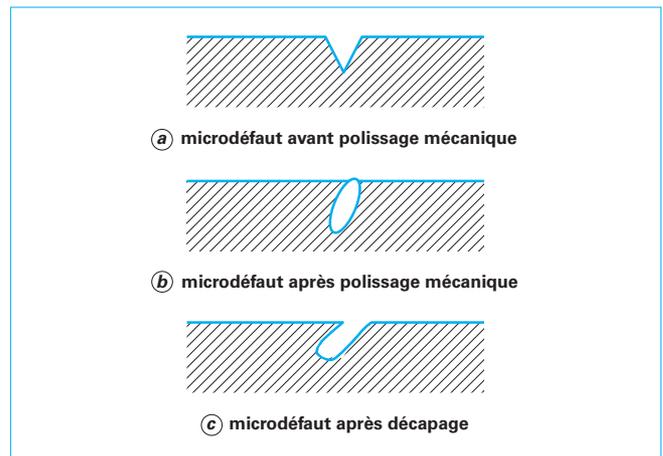


Figure 16 - Défaut de fluage de surface révélé au cours de la gamme d'anodisation

- D'autres traitements mécaniques à vocation décorative sont possibles sur les alliages d'aluminium (bouchonnage, chenillage...), mais ils doivent respecter les mêmes précautions.

4.2 Technologie de l'anodisation

4.2.1 Anodisation en statique

Le principe consiste à traiter une pièce en la plaçant successivement dans une série de cuves affectées aux préparations de surface, à l'anodisation et aux traitements post-anodiques (coloration, colmatage), chaque opération étant suivie d'un ou plusieurs rinçages.

Aujourd'hui, de nombreuses chaînes d'anodisation travaillent en mode automatique, les pièces étant accrochées à des barres porte-montages qui sont saisies et déposées dans les différentes cuves par des robots.

Le choix des matériaux constituant les cuves prendra en compte les produits chimiques utilisés, mais également les conditions opératoires (en particulier la température). Leur taille dépendra, bien évidemment, des pièces à traiter et de la productivité requise.

De même que pour l'ensemble des traitements de surface, les cuves d'une chaîne d'anodisation doivent être placées sous rétention et munies de dispositifs de captage des vapeurs, dont le débit requis est fonction :

- du produit chimique considéré et de son caractère toxique ou polluant ;
- de la température et de la concentration du bain ;
- de la surface du bain et de la géométrie de la cuve (rapport longueur sur largeur) ;
- de facteurs divers tels que la présence de courants d'air, la position de la cuve contre un mur, etc.

Des études théoriques existent dans ce domaine [81] et des guides pratiques ont été édités à l'usage du concepteur pour choisir, dimensionner et optimiser ces installations de captage [82].

■ Les **montages** auxquels sont accrochées les pièces à anodiser sont importants pour la réussite de l'opération. Ils doivent permettre l'amenée de courant durable sur la pièce (en particulier on doit prendre garde à ne pas perdre le contact électrique pendant le transport de cette dernière), en évitant une surchauffe locale au niveau des points de contact pendant les traitements électrolytiques. Leur conception dépend de la forme de la pièce à traiter et doit, par ailleurs, prendre en compte les zones de contact qui ne seront pas anodisées.

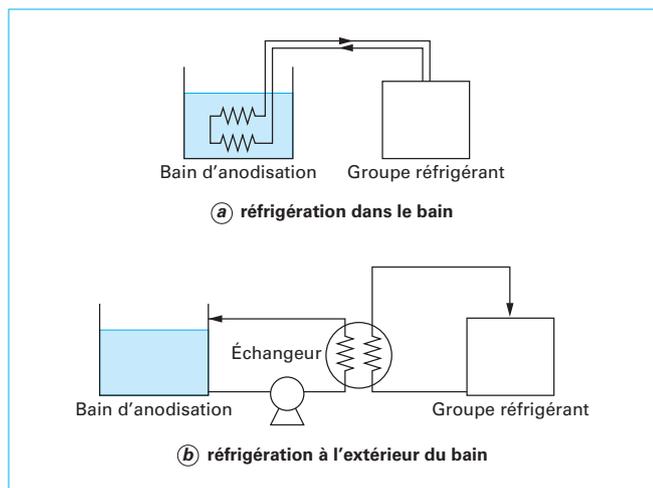


Figure 17 – Modes de réfrigération d'un bain d'anodisation

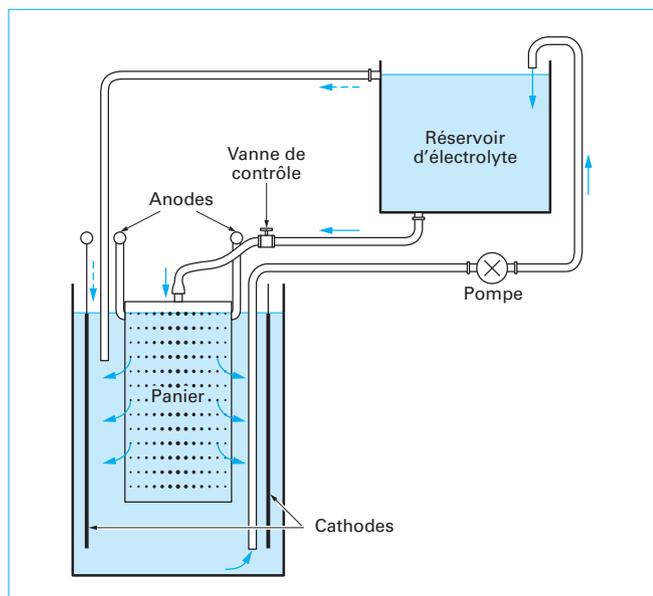


Figure 18 – Anodisation « en vrac »

Les professionnels de l'anodisation utilisent le plus souvent des montages en aluminium (fréquemment des alliages de la série 6 000), qu'il convient de décaper, généralement dans la soude, avant réutilisation. En effet, la couche d'oxyde formée sur le montage au cours du processus risque de provoquer un défaut de contact réhibitoire si elle n'est pas éliminée correctement. On rencontre également des montages en titane, plus coûteux, dont le principal attrait est d'être réutilisables sans décapage, car l'oxyde de titane formé au cours du traitement est suffisamment mince pour conserver le contact électrique. Cependant, ces montages sont à employer avec précaution :

- la conductivité du titane n'est pas aussi élevée que celle de l'aluminium ;
- ces montages ne sont pas adaptés à l'élaboration de couches épaisses (plus de 15 μm) ;
- ils ne conviennent pas aux procédés utilisant des tensions élevées.

■ **Le choix des cathodes** est aussi important. Même si, dans certains cas, la cuve peut servir de cathode elle-même, la plupart des installations utilisent des contre-électrodes distinctes pour des raisons de flexibilité. Les matériaux sont en plomb, en acier inoxydable (anodisation chromique), en graphite (souvent utilisé dans les procédés en continu (§ 4.2.2) ou en aluminium : plaques en 1 050 ou 1 200, profilés en 6 063, la dissolution chimique de ce dernier dans l'électrolyte restant faible pendant les périodes d'inactivité.

Il peut être nécessaire, en fonction de la géométrie de la pièce, de faire appel à des électrodes auxiliaires, par exemple pour anodiser l'intérieur d'un corps creux.

■ **L'agitation**, paramètre qui ne doit pas être négligé (§ 3.2.4) est effectuée par de l'air surpressé ou comprimé, avec l'obligation dans ce cas d'utiliser un air propre et déshuilé. L'air est injecté en fond de cuve par des tuyaux percés en PVC [poly(chlorure de vinyle)] ou en polypropylène.

■ La **réfrigération** peut s'effectuer dans la solution elle-même (le liquide réfrigérant circule dans un serpentin plongé dans le bain) ou à l'extérieur de la cuve, en faisant circuler l'électrolyte dans un échangeur situé à proximité (figure 17).

■ Le choix du **redresseur** dépend du procédé d'anodisation. De faibles tensions (15 à 25 V) sont suffisantes pour l'anodisation sulfurique de décoration ou de protection, alors que l'anodisation dure ou autocolorée requiert des tensions plus élevées (jusqu'à 100 V, voire au-delà pour certains alliages).

• **En pratique**, on rencontre deux modes de fonctionnement :

– l'**anodisation à intensité contrôlée**, qui nécessite la connaissance de la surface de la pièce et fait l'hypothèse que, sur cette dernière, la densité de courant est uniforme. Si cette valeur est trop difficile à calculer, on peut utiliser au préalable une pièce témoin du **même alliage** et de surface parfaitement connue. En appliquant la densité de courant souhaitée, donc l'intensité, on lit la tension après quelques minutes d'anodisation, ce qui sert de repère pour la pièce à traiter ultérieurement ;

– l'**anodisation à voltage contrôlé**, utilisée par exemple en oxydation anodique chromique (§ 3.4). Il faut prendre garde cependant de ne pas extrapoler une valeur de tension d'anodisation d'un alliage à l'autre (§ 3.2.5).

Dans tous les cas, la qualité du signal redressé est importante (si l'anodisation est effectuée sous courant continu bien entendu).

Exemple

Le traitement de petites charges par un redresseur trop puissant peut conduire à un taux d'ondulation résiduelle néfaste à la qualité protectrice de la couche.

• Deux **cas particuliers** sont à signaler dans le domaine de l'anodisation en statique :

– l'**anodisation en vrac** de petites pièces est impossible à réaliser avec les tonneaux tels que ceux employés en galvanoplastie (la rotation lente du tonneau empêche un contact électrique fixe sur les pièces). Il est néanmoins possible de traiter de nombreuses petites pièces à l'aide de paniers cylindriques percés (figure 18), dans lesquels les pièces, si leur forme le permet, sont maintenues serrées les unes contre les autres par un couvercle. L'électrolyte est mis en circulation forcée à l'intérieur du dispositif. Il faut cependant s'attendre à un taux de déchets non négligeable avec ce type de technologie, le courant ne se distribuant pas uniformément sur toutes les pièces. Le plus souvent, seule une coloration permettra de révéler les pièces défectueuses ;

– l'**anodisation in situ** permet, par des outillages adaptés, le traitement localisé ou la réparation de pièces. Cette technique est notamment utilisée dans le domaine aéronautique ([83] [84]).

4.2.2 Anodisation au défilé

Dans le cas où l'on souhaite anodiser une bande ou du fil en aluminium, on parlera de **traitement au défilé**. Le métal passe successivement dans une série de cuves où il subit, en défilement, les opérations classiques d'une gamme d'anodisation.

La figure 19 schématise les différentes façons de procéder à l'amenée de courant sur une bande anodisée au défilé.

La caractéristique principale de ces procédés, par rapport à l'anodisation statique, est l'utilisation de densités de courant élevées, indispensables pour assurer la rentabilité de l'opération.

Il n'est pas rare en effet d'employer plusieurs dizaines d'ampères par décimètre carré là où l'anodisation en statique se limite à $1,5 \text{ A/dm}^2$ (anodisation de protection), l'agitation forcée du bain jouant à cet égard un rôle fondamental pour l'évacuation de la chaleur.

4.2.3 Contrôle des bains

Outre le contrôle de l'acidité (libre), l'anodisation nécessite la mesure du taux d'aluminium dissous dans le bain. Suivant l'électrolyte, différentes méthodes de titrage existent et doivent être mises en œuvre périodiquement pour garantir un bon fonctionnement du bain.

Par ailleurs, certaines impuretés doivent être évitées dans les solutions d'anodisation, entre autres :

- l'huile ou la graisse issues d'un mauvais dégraissage ou de l'air comprimé mal déshuilé donneront des taches sur la surface anodisée ;

- les ions chlorures sont à proscrire pour l'ensemble des procédés d'anodisation car ils sont susceptibles de provoquer des phénomènes de corrosion pendant le traitement lui-même. On estime que leur concentration ne doit pas dépasser 200 ppm (en masse) en anodisation sulfurique ;

- les ions sulfates peuvent être néfastes en anodisation chromique (diminution de la durée de vie du bain).

Pour éviter d'introduire des impuretés dans les solutions d'oxydation anodique, il est hautement souhaitable d'utiliser de l'eau désionisée pour le montage des bains.

4.2.4 Qualité des rinçages

Les rinçages ne doivent pas être négligés lors d'une gamme d'anodisation. Sans utiliser une consommation d'eau excessive (coût, réglementation, § 4.4), les rinçages doivent permettre :

- d'interrompre les réactions chimiques sur la pièce ;
- d'éviter l'entraînement de composés polluants d'un bain à l'autre.

De même, leur composition doit être particulièrement surveillée.

Exemple

La **présence de chlorures** dans les rinçages peut également provoquer des défauts de corrosion, d'autant qu'on laisse volontiers les pièces plus longtemps dans ces bains sous prétexte qu'ils sont « inertes ».

Le rinçage précédant le colmatage, compte tenu de la sensibilité de ce bain aux impuretés (§ 4.3.4) sera effectué de préférence en eau déminéralisée.

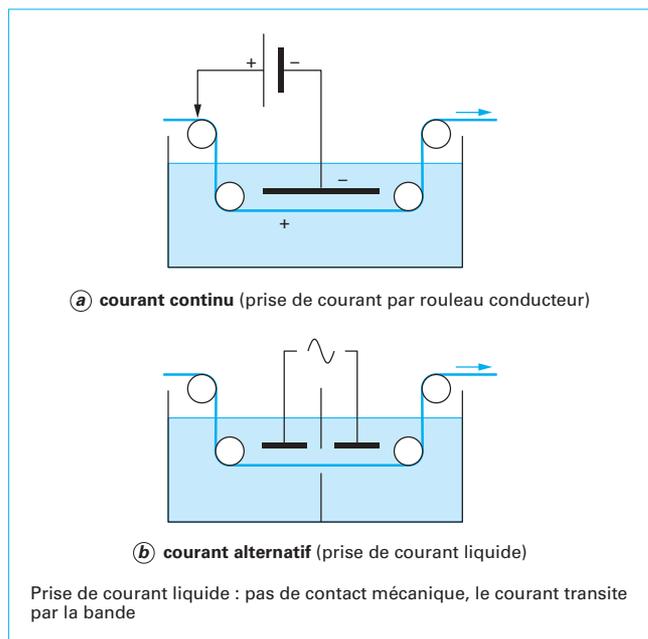


Figure 19 – Principe de l'amenée du courant sur la cuve d'oxydation dans l'anodisation au défilé

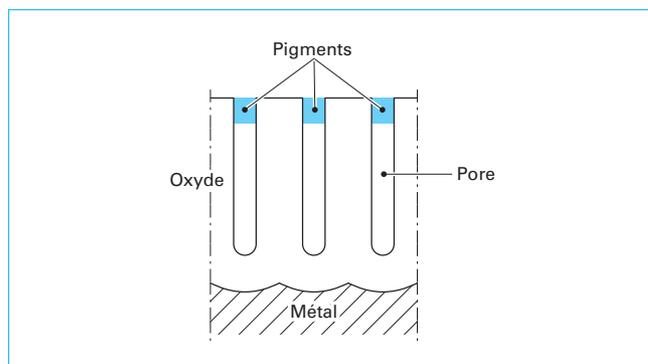


Figure 20 – Principe de la coloration chimique

4.3 Traitements consécutifs à l'anodisation

4.3.1 Coloration chimique

Les couches anodiques, de par leur porosité, sont susceptibles d'absorber des colorants (figure 20) qui leur confèrent des aspects décoratifs remarquables (voir applications citées au § 3.2.1). Il est indispensable, pour cela que l'oxyde soit de bonne qualité, c'est-à-dire que :

- sa porosité et son épaisseur permettent l'absorption des colorants (une couche trop mince ne sera pas propice aux nuances foncées) ;

- sa structure soit régulière, donc que les conditions d'anodisation soient rigoureuses (agitation du bain, température...) faute de quoi les teintes ne seront pas uniformes ;

- l'oxyde anodique soit bien rincé avant l'opération de coloration.

Deux familles de colorants chimiques sont utilisées.

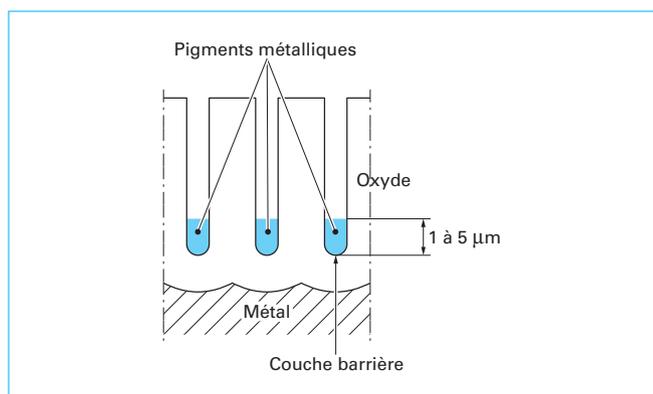


Figure 21 – Principe de la coloration électrolytique

■ Les colorants organiques, dont il existe une multitude de variétés, permettent d'obtenir des teintes très diverses. L'opération s'effectue en général par immersion, mais il est également possible, pour certains produits, de colorer l'aluminium manuellement au chiffon. Le contrôle du bain est essentiel (pH, température, concentration, durée d'immersion...) vis-à-vis de la reproductibilité des teintes.

Les colorants étant absorbés par capillarité (il faut se souvenir en effet qu'un pore, pour une couche de quelques micromètres, représente véritablement un tube capillaire), la coloration ne concerne que la partie supérieure de la couche, ce qui explique le problème principal de ce type de coloration, à savoir la tenue à la lumière (en particulier aux ultraviolets) et aux intempéries.

Cette propriété peut varier d'un colorant à l'autre, certains sont même inadaptés si l'on souhaite pérenniser l'aspect du métal dans des conditions d'exposition sévères.

Différentes classes de résistance à la lumière ont été établies par les fabricants de colorants (voir [Doc. M 1 630v2]), qu'il convient de consulter au cas par cas en fonction de l'utilisation finale de la pièce. Outre la nature du colorant sélectionné, la qualité du colmatage joue également un rôle prépondérant quant à cette propriété d'usage.

■ Les colorants minéraux sont en général des oxydes métalliques qui précipitent dans les pores de la couche anodique et possèdent un comportement plus stable que les colorants organiques. On utilise en particulier le ferri-oxalate d'ammonium (souvent appelé *Alunor*) qui permet d'obtenir des colorations champagne-or suivant la concentration en colorant (1 à 50 g/L) et les durées d'immersion (1 à 5 min). La température du bain est comprise entre 55 et 70 °C.

■ On peut également mentionner certains procédés utilisant la sublichromie, c'est-à-dire le transfert par sublimation de pigments dans la couche poreuse, techniques qui permettent d'obtenir des motifs décoratifs très variés sur le métal anodisé. Il est possible également d'imprégner les couches anodiques à l'aide d'encre et d'utiliser les techniques de sérigraphie.

4.3.2 Coloration électrolytique

La coloration électrolytique diffère fondamentalement dans son mécanisme de la coloration chimique. Certes, on utilise à nouveau l'extrême porosité des couches anodiques, mais la coloration s'effectue par électrolyse, en réduisant un ou plusieurs cations métalliques en solution :



Tableau 6 – Liste (non exhaustive) de procédés de coloration électrolytique

Nom du procédé	Société	Métal utilisé dans le bain
Almecolor	Henkel (Allemagne)	Sn
Anolok	Alcan (Canada)	Ni, Co
Carmitol	ISML (Italie)	Ni, Co
Colinal	Alusuisse (Suisse)	Ni + Co ou Sn
Colorox	Gartner (Allemagne)	Sn
Elektrocolor	Langbein-Pfanhauer (Allemagne)	Ni ou Sn-Ni
Endacolor	Endasa (Espagne)	Sn-Ni
Eurocolor	Pechiney (France)	Ni ou Ni-Sn
lonkol	longraf (Espagne)	Ni-Sn
Koral	Italtecno (Italie)	Cu
Korundacolor	Korundalwerk (Allemagne)	Sn
Metacolor	Metachemie (Allemagne)	Sn ou Sn-Ni
Metoxal	VAW (Allemagne)	Sn
NB-Colorprocess	Nippon Aluminium (Japon)	Ni
Oxicolor	Riedel (Allemagne)	Ni ou Sn-Ni
Sallox	Italtecno (Italie)	Sn
Summaldic	Sumitomo (Japon)	Ni (courant continu)
Trucolor	Reynolds Metals (États-Unis)	Sn
Unicol	NKK (Japon)	Ni

Cette réaction électrochimique ne peut se faire que par la couche barrière (figures 21 et 5), compte tenu du caractère isolant de la partie supérieure de la couche.

La coloration qui en résulte est due à la diffraction de la lumière sur les particules métalliques déposées au fond des pores, et dont l'espacement est régulier (si la couche présente une structure poreuse suffisamment régulière), le phénomène étant comparable à la coloration que provoquent les composés intermétalliques pour les couches élaborées en autocoloration (§ 3.7).

■ Dans la pratique industrielle, les sels de nickel, de cobalt ou d'étain seuls ou en mélange sont majoritairement utilisés. Par ailleurs dans la plupart des procédés, l'électrolyse est alimentée en courant alternatif en utilisant l'effet « redresseur » de la couche barrière, car dans l'électrolyte utilisé la couche ne se redissout pas pendant la phase anodique.

À titre indicatif, le tableau 6 mentionne (liste non exhaustive) les principaux procédés développés par de nombreuses sociétés.

En raison du faible nombre de cations utilisés industriellement (principalement pour des raisons de coût), les couleurs disponibles sont relativement peu variées. En modifiant les paramètres d'électrolyse (temps, quantité de métal déposée dans les porosités), on obtient en effet, avec les procédés « classiques », des teintes allant du bronze clair au noir.

En revanche, du fait que les particules déposées sont situées au fond des pores, la couche colmatée offre une excellente durabilité quant à la tenue des couleurs aux ultraviolets et aux intempéries. C'est la raison pour laquelle ce procédé s'est largement répandu dans le domaine architectural (menuiserie métallique, bardages de façade...) depuis de nombreuses années.

■ **D'autres cations** (cuivre, argent, or...) peuvent élargir le spectre des couleurs disponibles, mais ces dernières années ont surtout vu le développement de **nouveaux procédés de coloration électrolytique** :

- la coloration interférentielle, dont le principe consiste à effectuer une double anodisation (d'abord en milieu sulfurique, puis en milieu phosphorique), ce qui modifie la structure des pores en les élargissant à la base [85]. La coloration électrolytique qui suit, en sel de nickel, est tout à fait classique et permet d'obtenir des colorations variées (bleu-gris, vert, jaune et rouge) et durables [86] ;

- d'autres technologies font intervenir à la place de l'acide phosphorique, une deuxième solution d'anodisation à base d'acide sulfurique et d'additifs, mais utilisent surtout la forme de courant dans cette deuxième étape pour modifier la structure de l'oxyde au voisinage de la couche barrière. Les couleurs obtenues après coloration électrolytique standard vont du gris au vert, voire au rouge, suivant les conditions opératoires ([87] [88]) ;

- la modification de la couche barrière peut également intervenir, après une anodisation sulfurique classique, dans le bain de coloration lui-même, en faisant intervenir également des formes de courant complexes (on notera que le même bain peut également servir pour une électrocoloration conventionnelle). Le choix de la forme de courant, de la température d'anodisation et du temps de traitement permettent d'atteindre une gamme de couleur variée ([89] [90]).

Il faut également mentionner qu'il est possible de combiner les différentes méthodes de coloration, par exemple de compléter une coloration électrolytique par une imprégnation de colorant organique.

4.3.3 Imprégnations

Certaines propriétés des couches anodiques peuvent être améliorées en imprégnant ces dernières avec différentes substances. C'est en particulier le cas des pièces soumises à frottement qui, après anodisation (souvent une anodisation dure non colmatée), peuvent être imprégnées :

- de lubrifiants liquides : lanoline, huile, cires... ;
- de lubrifiants solides : bisulfure de molybdène, PTFE (polytétrafluoroéthylène)...

4.3.4 Colmatage

Le colmatage représente l'opération finale dans une gamme d'anodisation dans la mesure où cette dernière est utilisée pour la protection du métal.

Exemple

Il n'est pas nécessaire d'effectuer un colmatage si l'oxyde est destiné à recevoir un revêtement organique (peinture, vernis, colle, dépôt électrophorétique, § 3.2.3...) ou si une imprégnation (telle que décrite au § 4.3.3) a été réalisée.

En revanche, l'obturation des pores obtenus lors du processus d'anodisation est indispensable pour garantir au métal traité de

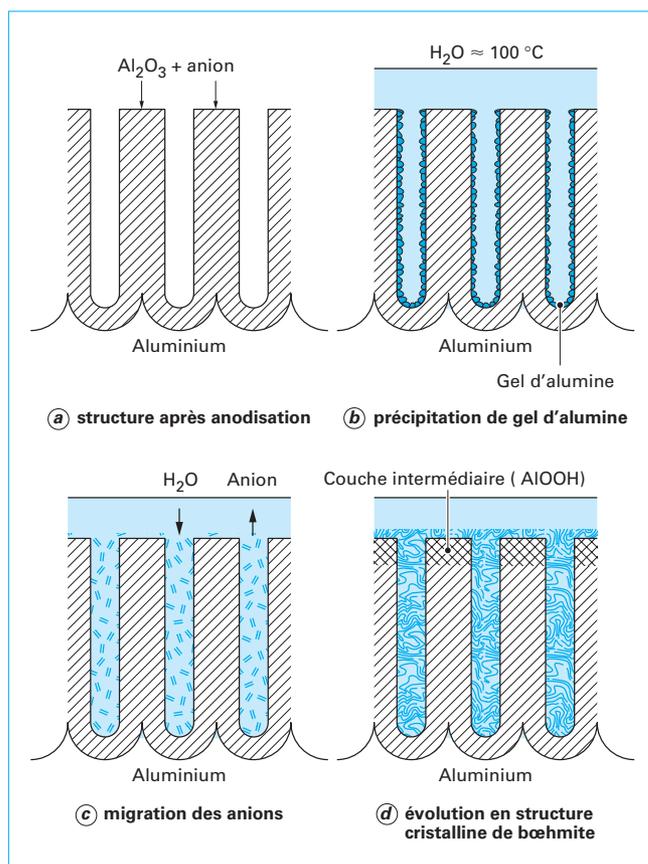


Figure 22 - Mécanisme de colmatage à l'eau bouillante d'une couche anodique

bonnes propriétés de tenue à la corrosion et permettre, le cas échéant, l'emprisonnement des colorants. Le colmatage doit par conséquent être effectué avec rigueur, car si l'opération est imparfaite, elle remet en cause la qualité finale de la couche anodique.

Le principe consiste à transformer l'alumine Al_2O_3 , formée lors de l'anodisation, en alumine monohydratée (on parle de **colmatage hydrothermal**), opération qui s'accompagne d'un gonflement de la couche et, par conséquent, de la fermeture des pores (figure 22).

On peut classer les procédés de colmatage comme suit.

■ Colmatage à l'eau bouillante (ou proche de l'ébullition)

Il s'effectue dans de l'eau déminéralisée dont la température minimale est de 96 °C et le pH compris entre 5,5 et 6,5. La qualité de l'eau utilisée est importante (sa résistivité doit être supérieure à 200 kΩ) pour la réussite de l'opération, certaines impuretés étant particulièrement néfastes à très faible teneur (tableau 7, [91]). On constatera notamment l'effet particulièrement nuisible des ions silicates, phosphates, fluorures et chlorures.

La cinétique de réaction est assez lente et le temps nécessaire pour effectuer un colmatage correct est estimé à 2 min/μm d'oxyde anodique.

À l'issue de l'opération, on observe parfois une fine pellicule blanche en extrême surface, que l'on nomme *poudrage de colmatage* (à ne pas confondre avec la pulvérulence décrite au § 3.2.4).

Tableau 7 – Effet de diverses impuretés de l'eau sur le colmatage de l'aluminium anodisé

Impureté	Effet sur le colmatage
Al ³⁺	Pas d'effet sur la qualité du colmatage, mais risque de précipitation d'hydroxyde d'aluminium à des concentrations relativement basses, ce qui peut affecter l'aspect de la pièce
Mg ²⁺	Effet discuté selon les auteurs (effet favorable au-dessus de 100 ppm en masse selon certains, défavorable au-delà de 5 ppm pour d'autres)
Ca ²⁺	Tend à produire du poudrage, pas d'autre effet signalé
Cu ²⁺	Nocif au-delà de 10 ppm en masse
Fe ²⁺	Nocif au-delà de 10 ppm en masse
F ⁻	Nocif au-delà de 20 à 30 ppm en masse
Cl ⁻	Diminue la résistance à la corrosion
SiO ₃	Empêche le colmatage au-delà de 10 ppm en masse
PO ₄ ⁻	Empêche le colmatage au-delà de 5 ppm en masse

Ce poudrage est dû à la formation de cristaux de boehmite en extrême surface de la couche (moins de 1 à 2 % du poids de cette dernière).

Le poudrage n'est pas synonyme de mauvais colmatage et il peut être éliminé par un essuyage appuyé. Cependant, pour prévenir ce phénomène, de nombreux additifs antipoudrants (composés organiques pour la plupart) sont aujourd'hui proposés par les fournisseurs de produits chimiques.

■ Colmatage à l'eau bouillante avec additifs

En dehors des agents antipoudrants, d'autres additifs peuvent être employés :

- les sels de nickel (sulfate ou acétate) ou de cobalt (acétate) permettent **d'accélérer la cinétique** de réaction [92]. C'est également le cas de la triéthanolamine (TEA) [93] ;
- le bichromate de potassium ou de sodium **améliore sensiblement la tenue à la corrosion** marine (en milieu légèrement alcalin) des couches anodiques, en particulier sur les alliages difficiles à anodiser (alliages au cuivre des séries 2000 et 7000). Les couches, qui prennent une coloration jaune-vert, demeurent cependant sensibles à l'attaque acide (atmosphères urbaines ou industrielles). De part la coloration résiduelle de la couche, le colmatage au bichromate de potassium n'est pas adapté aux applications décoratives ;
- pour renforcer la tenue à la corrosion, quelques solutions alternatives au bichromate de potassium sont mentionnées dans la littérature, utilisant des sels de cérium ou d'yttrium notamment en application aéronautique [105]. On cite également les ions molybdates (de sodium ou d'ammonium), éventuellement associés à des composés organiques ([106] [107]).

■ Colmatage à la vapeur

Développé principalement au Japon et en Allemagne pour l'anodisation oxalique (*Eloxal*), le colmatage à la vapeur d'eau (115 à 120 °C), bien que donnant d'excellents résultats, tend aujourd'hui à disparaître en raison de son coût élevé.

■ Colmatage à froid

Sous ce vocable sont désignés certains procédés qui relèvent plutôt d'une imprégnation des couches que d'une hydratation de

l'oxyde telle que décrite précédemment. En utilisant des sels de nickel et des fluorures, il est en effet possible d'obtenir les pores par des mécanismes de précipitation [94]. L'avantage principal réside dans la température des bains (30 à 35 °C), qui permet des gains énergétiques conséquents par rapport au colmatage hydro-thermal conventionnel, avec en outre une durée de colmatage réduite. En revanche, la conduite des bains est plus délicate.

L'utilisation de cette technique dans le domaine architectural varie selon les pays. Précisons par ailleurs qu'il est possible de réaliser un double colmatage (colmatage à froid suivi d'un colmatage à l'eau bouillante de courte durée) [95].

4.4 Aspect environnemental

4.4.1 Rappel succinct de la législation en vigueur

Les chaînes d'anodisation sont, comme toutes les installations de traitement de surface en France, soumises à la même réglementation concernant les rejets.

Le document de référence est **l'arrêté ministériel du 30 juin 2006**, qui prescrit :

- des normes concernant les rejets (eau, air) ;
- la gestion de l'eau ;
- l'aménagement des ateliers (notamment les rétentions) ;
- l'autosurveillance des rejets.

En ce qui concerne les normes relatives aux rejets aqueux, la réglementation prévoit des limites maximales de concentration pour certains éléments. Ces informations sont reprises dans le tableau 8.

Par ailleurs, la consommation en eau ne doit pas dépasser 8 L/m² traité et par fonction de rinçage.

Il est clair que, dans ces conditions, il est souhaitable d'optimiser la consommation en eau par une structure de rinçage adaptée (§ 4.4.2) et d'envisager les possibilités de recyclage et de régénération de l'eau et des bains de traitement (§ 4.4.3).

4.4.2 Minimisation des rejets par la structure de rinçage

Une installation de traitement de surface, et une ligne d'anodisation n'échappe pas à la règle, est une succession de réacteurs chimiques ou électrochimiques continus ou discontinus. Par conséquent, il est intéressant d'en avoir une vision « génie des procédés ». En particulier, la modélisation par bilans matières (en régime transitoire ou permanent) est une méthode qui permet de calculer et de contrôler les effluents, et de diminuer les consommations d'eau ([96] [97]).

D'une façon générale, la structure de rinçage optimale est celle du rinçage cascade à contre-courant (figure 23) car elle permet, en conservant une qualité de rinçage identique (concentration en élément polluant dans le dernier rinçage), une consommation d'eau bien moindre. En réalité, il n'est pas toujours possible d'employer une multitude de rinçages en cascade (place disponible, coût, concentration des effluents vers la station d'épuration) et l'on fait souvent appel à des combinaisons rinçages statiques-rinçages courants.

Pour calculer et optimiser ces structures, on pourra notamment s'aider d'ouvrages spécialisés [98].

4.4.3 Recyclage des bains sur une chaîne d'anodisation

Les procédés d'anodisation sont basés, pour la plupart, sur des solutions qui peuvent être traitées en station d'épuration par des moyens « classiques » : neutralisation, précipitation et séparation

Tableau 8 – Normes concernant les rejets aqueux (arrêté du 30 juin 2006)			
Métaux	Rejet direct ou rejet raccordé (en mg/l)		Condition sur le flux
Ag	0,5		Si le flux est supérieur à 1 g/j
Al	5,0		Si le flux est supérieur à 10 g/j
As	0,1		Si le flux est supérieur à 0,2 g/j
Cd	0,2		/
Cr VI	0,1		/
Cr III	2		Si le flux est supérieur à 4 g/j
Cu	2		Si le flux est supérieur à 4 g/j
Fe	5		Si le flux est supérieur à 10 g/j
Hg	0,05		/
Ni	2		Si le flux est supérieur à 4 g/j
Pb	0,5		/
Sn	2		Si le flux est supérieur à 4 g/j
Zn	3		Si le flux est supérieur à 6 g/j
	Rejet direct (en mg/l)	Rejet raccordé (en mg/l)	Condition sur le flux
MES	30	30	Si le flux est supérieur à 60 g/j
CN (aisément libérables)	0,1	0,1	/
F	15	15	Si le flux est supérieur à 30 g/j
Nitrites	20	/	Si le flux est supérieur à 40 g/j
Azote global	50	150	Si le flux est supérieur à 50 kg/j
P	10	/	Si le flux est supérieur à 20 g/j (direct)
	/	50	Si le flux est supérieur à 100 g/j (raccordé)
DCO	300	600	/
Indice hydrocarbure	5	5	Si le flux est supérieur à 10 g/j
AOX	5	5	Si le flux est supérieur à 10 g/j
Tributylphosphate	4	4	Si le flux est supérieur à 8 g/j

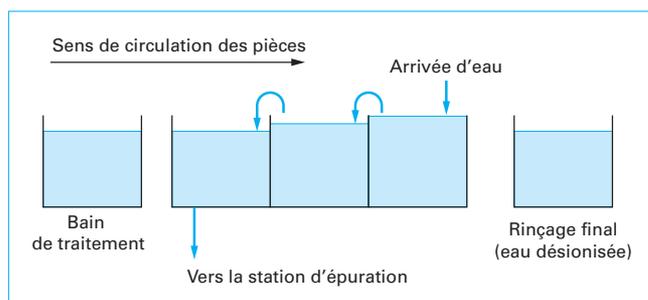


Figure 23 – Exemple de rinçage cascade à contre-courant (3 étapes)

des solides en suspension. Une approche alternative consiste à s'intéresser aux possibilités de recyclage ou de valorisation des bains.

On remarquera que, en fonction de la rentabilité du système, le recyclage de l'eau de rinçage est également envisageable, par exemple sur des résines échangeuses d'ion.

Différentes technologies sont proposées aujourd'hui, parmi lesquelles :

- les **résines échangeuses d'ion** qui permettent, après régénération, l'élimination de l'aluminium des bains d'anodisation et de brillantage. Cette technologie, largement utilisée pour la production d'eau déminéralisée, doit cependant être adaptée aux solutions acides concentrées. Des lits de résines plus courts, avec régénération à contre-courant, permettent un traitement direct sur les bains, sans dilution [99] ;

- la **dialyse**, qui utilise des membranes perméables aux acides mais non aux sels métalliques. Elle permet la régénération de l'acide et la séparation d'un concentré résiduel contenant les sels de métaux lourds ;

- l'**électrodialyse**, où une différence de potentiel assure la force motrice nécessaire pour le passage des ions à travers les membranes. En plaçant entre les électrodes des membranes alternativement perméables aux cations et aux anions, on récupère dans les différents compartiments successifs des solutions épurées ou concentrées ;

- l'**osmose inverse** qui sépare ions métalliques et non métalliques simples au moyen de membranes semi-perméables et sous l'action d'une pression qui contrebalance la pression osmotique « naturelle » des solutions situées de part et d'autre de la membrane ;

- l'**évaporation**, fréquemment utilisée pour concentrer la solution épurée et réutiliser l'eau évaporée ;

- la **crystallisation**, principalement utilisée en anodisation pour la récupération de l'alumine dans les bains de décapage alcalin.

5. Principales propriétés usuelles et contrôle des couches anodiques

5.1 Adhérence

Une couche anodique n'étant pas un revêtement, la notion d'adhérence, par comparaison aux revêtements organiques ou à la galvanoplastie possède ici peu de sens. Il faut donc éviter d'appliquer à l'anodisation les tests spécifiques aux revêtements. Le décollement de la couche d'oxyde du métal sous-jacent ne s'observe en effet que très rarement, par exemple lors des phénomènes de brûlure.

5.2 Épaisseur

On a vu, dans les différents procédés cités que les couches anodiques peuvent aller de quelques centaines de nanomètres (**couches barrières**) à une centaine de micromètres (**anodisation dure**). Il n'est pas toujours aisé de mesurer ces épaisseurs. Deux types de mesures sont possibles.

■ Mesures non destructives

Elles regroupent entre autres :

- la mesure optique par **microscopie interférentielle**, malheureusement limitée aux couches minces (de quelques dizaines de nanomètres à environ 3 µm) ;

- la mesure par **microscopie à coupe optique** (NF EN 12373-3), où l'on mesure l'écartement entre deux lignes lumineuses, l'une provenant d'un faisceau envoyé à 45° et se réfléchissant sur la face externe de la couche, l'autre provenant du même faisceau mais ayant subi une réflexion à l'interface métal/oxyde et deux réfractions dans la couche. L'écartement dépend de l'indice de réfraction de l'oxyde et de son épaisseur. Cette méthode n'est applicable que sur du métal suffisamment lisse et pour des couches relativement transparentes ;

- la mesure par **tension de claquage** (localement destructive). On admet généralement une épaisseur moyenne de 35 µm/V, mais il faut souligner que cette valeur peut varier de façon importante en fonction de l'alliage utilisé, de la nature de la couche, des conditions d'anodisation et de colmatage. Cette technique est donc à utiliser avec précaution ;

- la mesure par **courants de Foucault**, très répandue car relativement simple d'emploi. En particulier les appareils de mesure peuvent être amenés sur chantier et plusieurs mesures peuvent être effectuées rapidement à différents endroits d'une même pièce. Cette technique nécessite néanmoins un étalonnage préalable sur des échantillons témoins ;

- l'**ellipsométrie**, utilisant une source de lumière polarisée qui est réfléchiée avec une polarisation elliptique, fonction de l'indice de réfraction de la couche et de son épaisseur. Cette méthode est réservée aux couches très minces.

■ Méthodes destructives

- La **coupe micrographique** est la méthode la plus précise. Elle demande cependant une préparation d'échantillon et n'offre évidemment pas la souplesse des mesures par courants de Foucault (utilisation *in situ*, répartition de l'épaisseur d'oxyde sur une même pièce...).

- La **méthode gravimétrique** (NF EN 12373-2) : on immerge l'échantillon pendant 10 min dans la solution suivante :

- H₃PO₄ (d = 1,75) à 35 mL/L ;
- CrO₃ à 20 g/L ;
- Bain à l'ébullition.

Cette solution a pour particularité de ne dissoudre que l'oxyde sans attaquer le métal sous-jacent (sur la plupart des alliages). L'épaisseur moyenne de l'oxyde est déterminée par la perte de masse de l'échantillon. Cela nécessite bien entendu la connaissance de la surface traitée, ainsi que de la masse volumique de l'oxyde. Cette dernière peut varier significativement (§ 5.6), mais l'on prend généralement comme valeur de référence 2,4 g/cm³ pour les couches non colmatées et 2,6 g/cm³ pour les couches colmatées.

5.3 Qualité de colmatage

En pratique, la qualité de colmatage est évaluée par les méthodes suivantes :

- appréciation du pouvoir absorbant de la couche par essai à la **goutte de colorant** après attaque acide préalable (NF EN 12373-4). Cette méthode est très simple d'emploi, mais n'est pas toujours utilisable (sur les couches de couleur très sombre par exemple).

Par ailleurs, elle est sujette à des différences d'interprétation quant à la teinte résiduelle de la tache de colorant ;

- évaluation par **mesure de l'admittance** (ou de l'impédance, NF EN 12373-5). On mesure, par passage d'un courant alternatif, les propriétés électriques de la couche colmatée. Les recommandations Qualanod (§ 3.2.2) préconisent une admittance maximale de 400/e microsiemens, où e représente l'épaisseur de l'oxyde (en µm). Notons cependant que les propriétés électriques des couches peuvent être modifiées par la nature de l'électrolyte utilisé pour l'anodisation, les additifs de colmatage ou par le simple fait que la couche a subi une coloration ;

- la **méthode gravimétrique** (NF EN 12373-6) utilise le mélange phosphochromique [H₃PO₄ (d = 1,75) à 35 mL/L et CrO₃ à 20 g/L] à 38 °C pendant 15 min. La perte de masse observée ne doit pas dépasser une certaine valeur (généralement 30 mg/dm²). Cette méthode destructive, réservée au laboratoire de contrôle, est utilisée lorsque les techniques décrites précédemment ne peuvent être mises en œuvre.

5.4 Tests de corrosion accélérée

De nombreux tests de corrosion accélérée existent [brouillard salin, CASS (*Copper Acetic Salt Spray*) test, brouillard salin acétique, test Kesternich...], mais ne se corrélatent pas tous de façon acceptable avec le comportement réel des couches anodiques en milieu naturel, d'autant plus que les conditions d'exposition sont extrêmement variables : climat, milieu marin, milieu industriel, etc. Par contre, à l'aide de certaines méthodes, il peut être intéressant d'effectuer des études comparatives en particulier pour étudier l'influence des procédés de coloration électrolytique sur la tenue à la corrosion.

En tout état de cause, il est important d'effectuer les opérations d'anodisation et de colmatage de manière rigoureuse si l'on désire augmenter la tenue à la corrosion de l'aluminium anodisé.

Dans le cas contraire (couches minces mal colmatées), la mauvaise tenue de la couche est révélée par la plupart des tests.

5.5 Résistance à l'abrasion, dureté

■ On peut mesurer la **résistance à l'abrasion des couches anodiques** à l'aide d'appareils spéciaux utilisant des roues abrasives. Suivant les équipements, la surface abrasive peut s'enrichir en particules d'alumine au cours des différents cycles (abrasimètre de type « Taber »), ou au contraire être renouvelée à chaque cycle (abrasimètres de type « Erichsen » ou « Suga »). Le choix de la technique dépend de l'utilisation finale de la pièce mais, dans tous les cas, les mesures doivent impérativement se faire en comparaison avec des échantillons témoins anodisés en laboratoire dans des conditions précises.

Si une couche anodique dure possède une résistance à l'abrasion supérieure au chromage dur ou à l'acier carbonitruré (tout en ayant une dureté nettement inférieure), l'alliage considéré, les conditions d'anodisation, mais également le fait que la couche soit colmatée peuvent influencer significativement cette propriété [100].

Il existe par ailleurs des équipements employant un jet abrasif (NF EN 12373-10), la mesure consistant à évaluer la masse d'abrasif (généralement du carbure de silicium) nécessaire pour mettre le métal à nu. Cette méthode est délicate à mettre en œuvre car elle nécessite un contrôle rigoureux de la granulométrie de l'abrasif et de son taux d'humidité, du débit d'air, de son hygrométrie et de sa température, de l'usure interne de l'appareil, etc.

■ La **dureté d'une couche anodique** s'évalue sur coupe transversale et sous faible charge, typiquement 15 g. En effet, toute mesure par indentation perpendiculaire sera inexacte car fortement dépendante du comportement de l'alliage d'aluminium sous-jacent. Par ailleurs, la pointe diamant pyramidale traditionnelle nécessite des couches épaisses (supérieures à 20 μm) et n'est pas assez fine pour détecter des différences de dureté entre la surface de la couche et le voisinage de l'interface métal/oxyde. On utilisera de préférence le diamant Knoop, de forme mieux adaptée.

Les couches peuvent atteindre une dureté HV de 500 pour certains procédés d'anodisation dure.

5.6 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'une couche anodique intervient dans les méthodes gravimétriques de détermination d'épaisseur (§ 5.2). Les conditions d'élaboration de la couche ainsi que les différentes inclusions ou surporosités dues à l'alliage sous-jacent peuvent considérablement modifier la masse volumique apparente de l'oxyde : de 1,6 g/cm^3 (alliage chargé au cuivre) à 3,3 g/cm^3 (couche mince sur alliage pur), d'où quelques précautions d'emploi dans les calculs de perte de masse.

5.7 Propriétés optiques

Que la propriété recherchée soit la réflectivité spéculaire ou diffuse, la netteté de l'image ou la couleur de l'aluminium anodisé et la tenue de celle-ci aux intempéries, il existe dans le commerce une multitude d'appareils qu'il serait trop fastidieux de lister. En fait, suivant l'application industrielle visée et compte tenu du nombre de paramètres pouvant être mesurés, il est indispensable d'en déterminer le ou les plus pertinents en fonction du cahier des charges.

Dans le domaine de l'infrarouge (systèmes de chauffage, réflecteurs lasers, boucliers thermiques...), il faut préciser que, si l'état de surface est important, notamment vis-à-vis de la rugosité, la couche d'oxyde doit être minimisée car elle dégrade rapidement la réflectivité.

5.8 Propriétés mécaniques

D'une façon générale, les couches épaisses et/ou élaborées à froid supportent moins bien la déformation que les couches minces obtenues à température ambiante. Que la sollicitation soit mécanique (pliage, enroulement d'une bande...) ou thermique (choc thermique et dilatation différentielle entre le métal et son oxyde), on peut parfois observer un fendillement de la couche appelé *faïençage*. Pour les couches les plus fragiles (couches dures épaisses), le phénomène peut même apparaître lors du colmatage à l'eau bouillante.

Une méthode normalisée (NFA 91-413) permet d'évaluer la flexibilité d'une couche anodique au pliage sur un dispositif appelé « spirale d'Archimède » (figure 24).

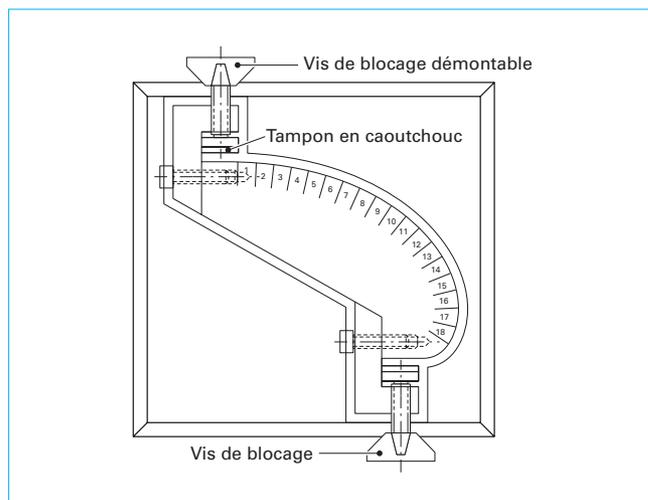


Figure 24 – Spirale d'Archimède

5.9 Propriétés électriques

Une couche anodique est un **isolant** tout à fait comparable aux matériaux traditionnels.

Exemple

À 20 °C, la résistance spécifique d'une couche anodique de 50 μm est de l'ordre de $4 \times 10^{15} \Omega/\text{cm}$, contre $3 \times 10^{14} \Omega/\text{cm}$ pour la porcelaine ou 5×10^{11} à $5 \times 10^{13} \Omega/\text{cm}$ pour le verre (voir § 3.3 en ce qui concerne les applications industrielles).

5.10 Propriétés thermiques

■ La **conductivité thermique** d'une couche anodique est beaucoup plus faible que celle du métal (environ 30 fois plus faible), ce qui en fait un traitement d'isolation thermique intéressant, en particulier pour les couches épaisses obtenues en anodisation dure (§ 3.3).

■ Le **coefficient d'émissivité** dans l'infrarouge est très faible sur l'aluminium nu (environ 0,04), mais l'anodisation permet de l'augmenter significativement : une couche sulfurique de 10 μm possède en effet un coefficient d'environ 0,8 (valeur que peut encore être augmentée par un traitement de coloration adapté : coloration noire électrolytique par exemple).

Exemple

Cette propriété peut être mise à profit en utilisant l'aluminium anodisé et coloré comme dissipateur de chaleur.

r1800

Capteurs de déplacement

Date de publication : 10/12/2002

Par :

Stéphane DURAND

Ingénieur de l'École nationale supérieure de mécanique et des microtechniques de Besançon,
Docteur de l'université de Franche-Comté, Maître de conférences à l'École nationale supérieure
d'ingénieurs du Mans

Cet article fait partie de la base documentaire :

Grandeurs mécaniques

Dans le pack : **Mesures mécaniques et dimensionnelles**

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 : 02/06/2015

Pour le compte : 7200034092 - // nc COMPTE INTERNE TI // 195.25.183.153

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

Capteurs de déplacement

par **Stéphane DURAND**

Ingénieur de l'École nationale supérieure de mécanique et des microtechniques de Besançon

Docteur de l'université de Franche-Comté

Maître de conférences à l'École nationale supérieure d'ingénieurs du Mans

1. Les différents types de déplacement et leur mesure	R 1 810 - 2
2. Classement des capteurs selon le principe de transduction utilisé.....	— 2
2.1 Types de classements possibles	— 2
2.2 Classement suivant le type de transduction utilisé	— 3
3. Capteurs à impédance électrique variable	— 3
3.1 Capteurs à résistance variable	— 3
3.2 Capteurs à inductance variable	— 6
3.3 Capteurs à capacité variable.....	— 8
4. Capteurs à couplage inductif variable.....	— 11
4.1 Transformateur différentiel	— 11
4.2 Microsyn.....	— 12
4.3 Potentiomètre inductif.....	— 13
4.4 Synchrodécteur.....	— 13
4.5 Resolver.....	— 14
4.6 Inductosyn.....	— 15
5. Capteurs numériques optiques	— 16
5.1 Codeurs optiques absolus	— 16
5.2 Codeurs optiques incrémentaux	— 17
6. Sources d'incertitude liées au positionnement des capteurs.....	— 18
7. Conclusion	— 20
Pour en savoir plus	Doc. R 1 800

Un déplacement peut être défini comme la variation, en fonction du temps, d'une position. Un système mécanique comporte six degrés de liberté : trois en translation et trois en rotation. Les capteurs de déplacement se regroupent ainsi en deux familles : les capteurs de déplacement linéaire et les capteurs de déplacement angulaire.

Le cadre du présent article se limite à la mesure des déplacements relatifs (c'est-à-dire par rapport à un repère lié à un solide de référence considéré comme fixe). Les capteurs présentés comportent donc généralement une partie fixe liée au solide de référence et une partie mobile liée au solide dont le déplacement est le mesurande. Certains capteurs échappent toutefois à cette règle, comme une partie des capteurs capacitifs (par exemple ceux fonctionnant par induction de charge sur la cible dont le déplacement est à mesurer).

Les capteurs présentés dans la suite de cet article sont classés par principe physique mis en œuvre :

- capteurs à impédance électrique variable ;
- capteurs à couplage inductif variable ;
- capteurs numériques optiques.

L'exposé des principes physiques nécessaires à la description du fonctionnement des capteurs est volontairement limité afin de ne pas alourdir l'article.

Une dernière partie présente les sources d'incertitude liées au positionnement du capteur.

1. Les différents types de déplacement et leur mesure

Un déplacement pouvant être défini comme la variation, en fonction du temps, d'une position, la dérivée première par rapport au temps du déplacement donne la vitesse, la dérivée seconde donne l'accélération. Ces deux grandeurs sont certes accessibles à partir du signal fourni par un capteur de déplacement ; il est toutefois à noter [1] que **le rapport signal sur bruit est diminué lors d'une dérivation par rapport au temps**. Il est donc plus intéressant d'utiliser les capteurs spécifiques au mesurage de ces grandeurs : tachymètres linéaires ou angulaires pour les vitesses [2], accéléromètres ou gyromètres pour les accélérations [3] [4] [5] [6] [7] [8].

La mesure des déformations, encore appelée extensométrie, traitée dans les références [4] et [5] de ce traité ne sera pas abordée dans cet article. Il en va de même pour les mesures optiques sans contact par interférométrie laser [10], par théodolite ou par triangulation laser [11]. Sont également absentes de cet article les mesures de position, abordées dans ce traité, qui sont pour certaines des versions « tout ou rien » (c'est-à-dire à seuil) des capteurs de déplacement.

La dynamique de mesure des capteurs présentés dans cet article s'échelonne entre quelques mètres et quelques 10^{-9} mètre soit sur 9 ordres de grandeur (en considérant toutefois des capteurs différents). Cette gamme s'étend donc entre les déplacements à échelle humaine et les microdéplacements qui se situent à l'échelle de la cellule vivante. Cela s'explique tant par l'évolution des technologies que par l'apparition de nouveaux besoins. Les capteurs de déplacement à étendue de mesure métrique (avec une résolution de l'ordre du micromètre ou de la dizaine de micromètres) ont en effet accompagné le développement des techniques de fabrication et de contrôle liées à l'industrie conventionnelle (tournage, fraisage, électroérosion...). Les nouvelles technologies de l'industrie et du médical (micro et nanotechnologies, manipulations cellulaires...) ont nécessité la maîtrise de déplacements se situant dans une gamme submillimétrique voire submicronique.

Un autre élément marquant de l'évolution des capteurs est l'intégration massive de composants électroniques permettant non seulement le prétraitement ou même le traitement complet du signal de mesure, mais également l'archivage de données nécessaires à l'utilisation du capteur, comme les paramètres d'étalonnage, le numéro de série ou l'étendue de mesure. Cela rend plus aisée la traçabilité des capteurs (et par là même des mesures), permet d'en vérifier le bon étalonnage ou d'accroître leur étendue de mesure en enregistrant des corrections de leurs non-linéarités. Cette nouvelle généra-

tion de capteurs, apparue dans les années 1990, est souvent désignée sous le nom de « **capteurs intelligents** ». Cette dénomination tient au fait que ces capteurs intègrent les éléments qui leur permettent de communiquer avec un ordinateur via leur carte d'acquisition.

Les capteurs de déplacement n'échappent pas à cette tendance générale de l'instrumentation de mesure mais, si leur structure devient de plus en plus complexe, leur apparence externe est de plus en plus dépouillée. Les vis des potentiomètres des réglages de sensibilité ou les poussoirs d'initialisation disparaissent au profit de commandes logicielles. Les capteurs sont ainsi de plus en plus hermétiques, tant aux poussières qu'à l'eau, répondant aux normes de protection caractérisées par les indices de protection (IP). En effet, un codeur optique de déplacement devra être étanche à la poussière et aux projections pour pouvoir être utilisé sur un poste d'usinage projetant copeaux et particules de lubrifiant.

2. Classement des capteurs selon le principe de transduction utilisé

2.1 Types de classements possibles

Les capteurs en général, et les capteurs de déplacement en particulier, peuvent être classés de multiples manières. L'une d'elles consiste par exemple à discerner ceux des capteurs qui se contentent de modifier la grandeur électrique qui leur est appliquée (capteurs passifs) de ceux qui sont capables de générer une grandeur électrique (capteurs actifs). Un autre mode de classement consiste à considérer le type de sortie délivrée par le capteur : numérique ou analogique. La nature de la liaison entre la partie fixe et la partie mobile peut également servir de critère, c'est alors le principe de mesure (avec ou sans contact) qui est considéré. L'étendue de mesure ou la résolution du capteur ne sont généralement pas admissibles comme critères de classification, bien que ce soient généralement les premiers critères de choix pour un capteur, car ces paramètres peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur pour une même gamme de capteurs.

2.2 Classement suivant le type de transduction utilisé

Ce classement est basé sur le principe physique mis en œuvre pour convertir le mesurande (ici le déplacement) en grandeur électrique. Il présente l'avantage de prendre en compte directement les grandeurs d'influence susceptibles de perturber la mesure, ce qui constitue un des principaux critères lors du choix d'un capteur. Une telle classification est en outre directement liée à la technologie utilisée ; il est alors possible de décrire le fonctionnement d'une famille entière de capteurs.

Dans ce qui suit, elle a été retenue pour la présentation des capteurs de déplacement. Parmi les capteurs (passifs) à impédance électrique variable, les trois types d'impédances sont successivement présentées : résistance, inductance et capacité. Le couplage inductif variable est le principe utilisé par toute une famille de capteurs : transformateur différentiel, microsyn, potentiomètre inductif, synchrodétecteur, résolveur et inductosyn. Enfin, les codeurs numériques optiques forment une famille à part entière de capteurs de déplacement.

3. Capteurs à impédance électrique variable

Afin d'éviter toute redondance, la présentation du principe et des avantages du système *push-pull* (tire-pousse) est effectuée ici dans un cadre général. Son utilisation sera mentionnée ultérieurement à chaque fois que cela sera nécessaire. Ce type de structure, dont la mise en œuvre dépend du principe de fonctionnement du capteur (ce n'est pas applicable dans tous les cas), a pour but de doubler la sensibilité au mesurande et de compenser les non-linéarités d'ordre pair. Le terme *compenser* est ici opposé dans le sens au terme *corriger* en ce que la compensation est intrinsèque et structurelle (deux effets physiques opposés se compensent) et que la correction est corollaire (un signal est corrigé *après* avoir été créé, sur la base de données issues d'une autre mesure).

La structure d'un montage *push-pull* suppose un mesurande petit devant une des grandeurs constitutives du capteur. Dans le cas présent de la mesure de déplacement, la variation de position est rapportée, par exemple, à une dimension fixe, créant ainsi une variable réduite x sans unité. Si ce ratio est petit devant l'unité, un développement de Taylor de la fonction décrivant la variation de la grandeur électrique de sortie en fonction de cette variable s'exprime sous la forme :

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n + o(x^n)$$

Le principe du montage *push-pull* consiste à créer un capteur à structure symétrique (figure 1) de manière qu'une variation x d'un côté se traduise par une variation $-x$ de l'autre. Un simple montage différentiel donne alors comme grandeur électrique de sortie :

$$g(x) = f(x) - f(-x) = 2a_1x + 2a_3x^3 + \dots + 2a_{(2p+1)}x^{(2p+1)}$$

On remarque que les termes d'ordre pair ont disparu, ce qui concerne en premier lieu la composante continue (ordre 0) et le premier terme de non-linéarité (ordre 2). Les termes non-linéaires d'ordres impairs (3 et supérieurs) se trouvent certes renforcés, mais x étant petit devant 1 (c'est-à-dire de l'ordre du dixième ou inférieur), ils ne contribuent que pour quelques 10^{-3} à la composante non-linéaire de la réponse.

Le principal inconvénient du montage *push-pull* tient à sa difficulté de mise en œuvre. Pour que le principe *push-pull* bien connu des électroniciens fonctionne correctement, la symétrie du capteur

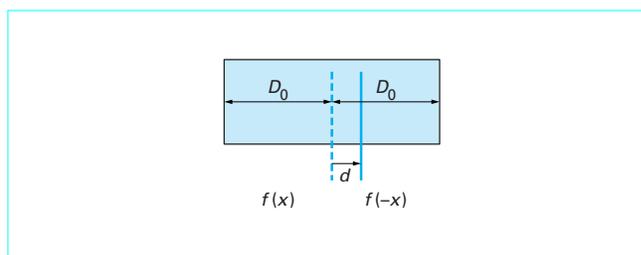


Figure 1 – Principe de capteur à effet *push-pull*

doit être aussi parfaite que possible. Tout défaut de symétrie se traduit en effet par un défaut de compensation des non-linéarités, accompagné d'une variation du facteur de sensibilité prévu pour la composante linéaire.

3.1 Capteurs à résistance variable

3.1.1 Principe physique

Ce type de capteurs, appelé **potentiomètre résistif**, est basé sur le principe du diviseur de tension. Le déplacement, linéaire x ou angulaire α , d'un curseur mobile sur une piste résistive fixe R_n fournit un signal de sortie du pont diviseur V_m directement proportionnel à la position du curseur.

Selon la forme géométrique de la résistance fixe et donc du mouvement du curseur, on distingue (figure 2) :

- le potentiomètre de mesure de déplacement rectiligne :

$$R(x) = \frac{x}{X} R_n \text{ et } \frac{V_m}{V_0} = \frac{R(x)}{R_n} = \frac{x}{X}$$

- le potentiomètre de mesure de déplacement angulaire :

$$R(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_M} R_n \text{ et } \frac{V_m}{V_0} = \frac{R(\alpha)}{R_n} = \frac{\alpha}{\alpha_M}$$

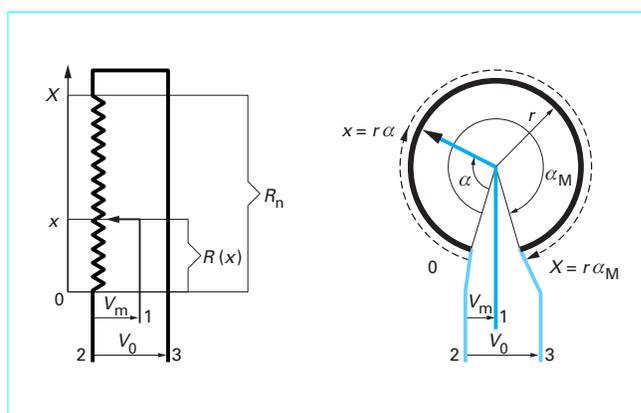


Figure 2 – Potentiomètres résistifs linéaire et circulaire

3.1.2 Constitution du potentiomètre

3.1.2.1 Potentiomètres à curseur mécanique

La plupart des potentiomètres sont aujourd'hui réalisés sur la base de pistes conductrices composites constituées d'une matrice polymère chargée en particules conductrices. Cela augmente la résolution du capteur par rapport à une piste bobinée dont la résolution est déterminée par le diamètre du fil utilisé (au mieux 10 μm). La résolution d'un potentiomètre à piste conductrice est de l'ordre de 0,1 μm .

Le curseur est généralement une lamelle métallique de cuivre venant frotter sur la piste, le contact étant maintenu par effet élastique. La fréquence maximale d'utilisation du potentiomètre est alors déterminée par la vitesse maximale de déplacement du curseur sur la piste permettant d'assurer un contact satisfaisant. Cette vitesse est de l'ordre de 10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les potentiomètres à piste plastique résistive.

La durée de vie d'un potentiomètre à piste est de l'ordre de 10^8 manœuvres, cette limite étant inhérente à l'usure de la piste engendrée par le frottement du curseur.

3.1.2.2 Potentiomètres sans curseur mécanique

Il existe toutefois une famille spécifique de potentiomètres qui ne comportent pas de curseur mécanique. Le curseur agit alors à distance, sans contact avec la piste.

■ Curseur optique

Dans le cas d'un **curseur optique**, une contre-piste photoconductive sépare la piste résistive de la piste de contact (figure 3). Lorsqu'elle se trouve éclairée, la matière de cette piste passe d'un comportement isolant à un comportement conducteur. Le spot d'éclairement fourni ou renvoyé par le curseur agit donc comme un contact mobile.

La bande passante de ce capteur est limitée par le temps de réponse du matériau photoconductif (CdSe, par exemple) qui est de l'ordre de la dizaine de millisecondes.

■ Curseur magnétique

Dans le cas du **curseur magnétique**, c'est un aimant qui se déplace au-dessus d'une piste magnétorésistive (figure 4 a), opérant par effet Hall [12]. Le champ magnétique créé par l'aimant modifie la résistance des pistes magnétorésistives reliant le point médian (2) (qui donne le potentiel du curseur) aux bornes (1 et 3) du pont diviseur du potentiomètre. La résistance des pistes n'étant jamais nulle, le potentiel de point médian du pont diviseur varie généralement entre 30 % et 70 % de la tension d'excitation du pont (figure 4 b).

Lorsque cela est nécessaire, une compensation de la dérive thermique peut être adjointe au capteur. Celle-ci est réalisée par l'adjonction d'un réseau de quatre résistances (figure 4 c). Une compensation plus fine de la réponse thermique du capteur peut être réalisée au moyen d'un réseau combinant résistances, thermistances et amplificateurs opérationnels, en complément du réseau résistif initial.

Nota : il existe aussi des capteurs linéaires conçus sur le principe de la figure 4. Ils présentent une étendue de mesure de 1 mm à quelques dizaines de millimètres et une précision de 1 à 2 % de la pleine échelle.

Un exemple de la réponse en température d'un tel capteur est donné figure 5, les courbes obtenues après compensation thermique (telle que décrite en figure 4 c) sont présentées figure 6.

La compensation thermique est réalisée pour un point de fonctionnement autour de la position 0° et à une température de 25 °C. Elle consiste à limiter la sensibilité en température du capteur

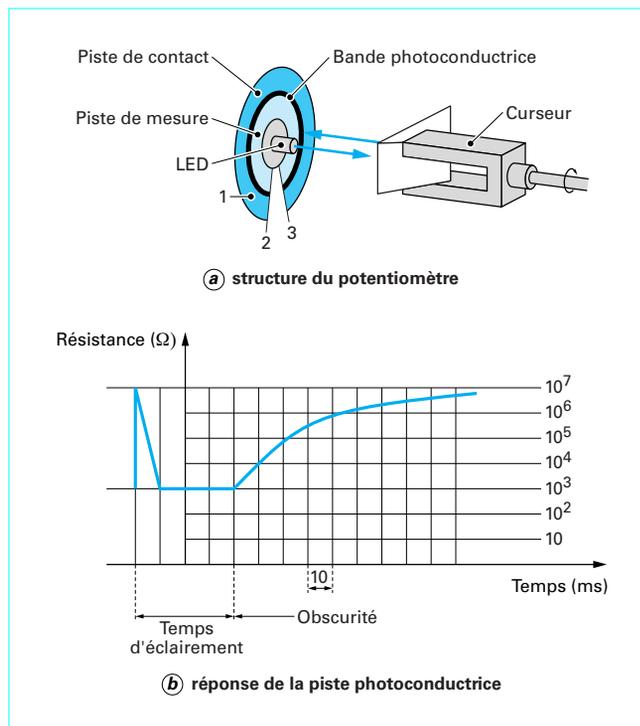


Figure 3 – Potentiomètre angulaire à curseur optique

autour de ce point, ce qui se traduit par une courbe à tangente horizontale sur la figure 6. Pour les positions -10° et $+10^\circ$ des courbes des figures 5 et 6, même si la compensation est moins efficace que pour la position 0°, la sensibilité en température autour de 25 °C est diminuée.

La bande passante s'étend jusqu'à la dizaine de gigahertz, la résolution quant à elle est limitée par les systèmes de mesure et d'alimentation, le capteur possédant une sortie analogique.

3.1.3 Conditionnement du signal

Le signal de sortie du potentiomètre dépend de la source de tension appliquée aux bornes du pont diviseur. Cette source doit fournir une tension suffisante, puisque la tension de mesure est directement proportionnelle à la tension d'alimentation E_s . Toutefois, cette dernière est limitée (généralement à une dizaine de volts) par la puissance que la piste résistive (ou le bobinage) peut dissiper. Une instabilité de cette source engendre des variations de la tension de sortie V_m :

$$\Delta V_m = \Delta E_s \frac{X}{X}$$

qui sont indécélables de celles que causerait un déplacement du curseur :

$$\Delta V_m = E_s \frac{\Delta X}{X}$$

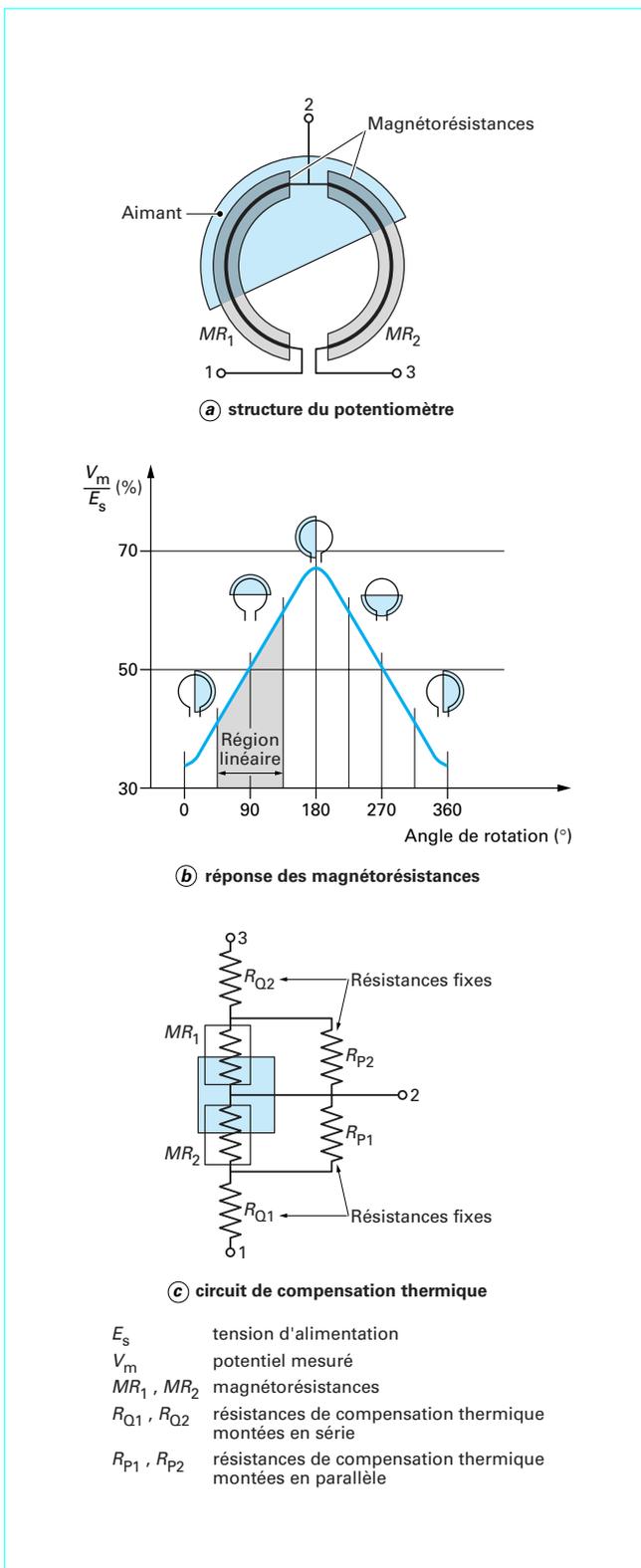


Figure 4 – Potentiomètre angulaire à curseur magnétique
(doc. Midori)

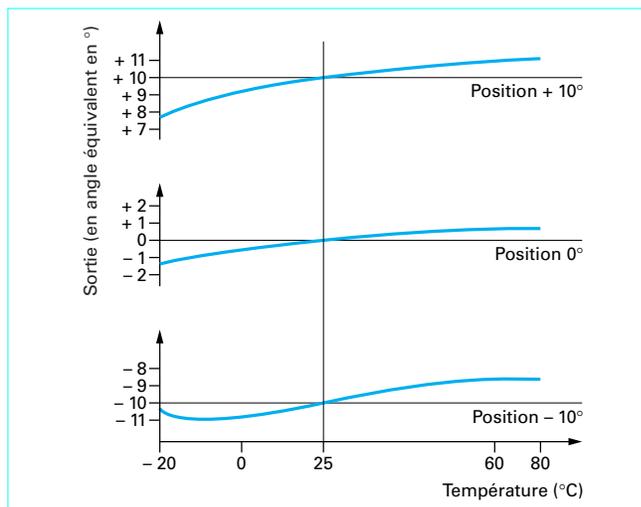


Figure 5 – Sortie thermique du potentiomètre magnétorésistif
(doc. Midori)

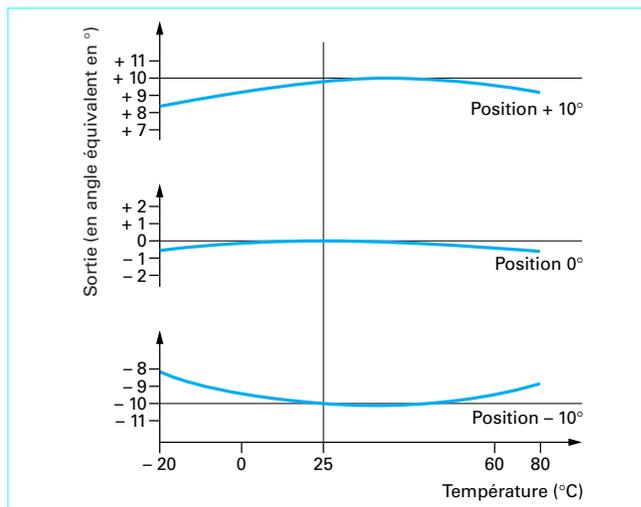


Figure 6 – Sortie thermique du potentiomètre magnétorésistif compensé en température
(doc. Midori)

Afin de pouvoir mesurer un déplacement minimal Δx_{min} , la condition de stabilité relative de la source de tension alimentant le pont diviseur :

$$\frac{\Delta E_s}{E_s} \ll \frac{\Delta x_{min}}{X}$$

doit être vérifiée.

L'influence des résistances relatives de la source et des circuits de mesure n'est pas traitée, le lecteur pourra se reporter aux articles du traité *Électronique des Techniques de l'Ingénieur*. Il en va de même pour les différents circuits de conditionnement du signal de mesure, en notant que l'utilisation d'un filtrage passe-haut permet de s'affranchir de la composante continue du signal lors de l'observation de déplacements périodiques du curseur. Il est alors à noter que si, par exemple, le curseur d'un potentiomètre rectiligne est soumis

autour d'une position x_0 à un mouvement sinusoïdal d'amplitude x_1 tel que :

$$x = x_0 + x_1 \sin \omega t$$

sa vitesse maximale :

$$\left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{\max} = \omega x_1$$

doit être inférieure au maximum spécifié par le constructeur (u_{\max}).

On en déduit la fréquence de coupure inhérente au capteur :

$$f_c = \frac{u_{\max}}{2\pi x_1}$$

Cela donne, pour un potentiomètre à curseur mécanique, une fréquence de coupure de l'ordre du kilohertz.

3.2 Capteurs à inductance variable

La famille des capteurs à inductance variable comprend deux sous-familles principales : les capteurs à entrefer variable et les capteurs à bobine et noyau mobile. Dans ces deux cas, la constitution même de ces capteurs nécessite de se préoccuper des problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) puisqu'ils sont à la fois sources de rayonnement électromagnétique et susceptibles d'être perturbés dans leur fonctionnement par des émissions électromagnétiques extérieures [13].

Quelle que soit la sous-famille de capteur considérée, le ou les bobinages sont alimentés par une source de tension sinusoïdale dont la fréquence est en général limitée à quelques dizaines de kilohertz. Cette limitation a pour but de minimiser les pertes par courants de Foucault dans le noyau, ainsi que l'influence des capacités parasites (entre les fils du bobinage, entre les fils du bobinage et le noyau...).

Dans ce qui suit, on notera R la réluctance du circuit magnétique :

– formulation générale :

$$R = \int_{\text{circuit magnétique}} \frac{d\ell}{\mu s}$$

– circuit à entrefer constant :

$$R = \frac{\ell_f}{\mu_0 \mu_f s_f} + \frac{\ell_0}{\mu_0 s_0}$$

avec μ_0 perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ SI), pour l'air usuellement,

μ_f perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (sans unité),

μ perméabilité magnétique ($\mu = \mu_0 \mu_f$),

s_0 section droite de l'entrefer (air),

s_f section droite du matériau ferromagnétique,

s section droite du circuit magnétique (notation générale),

ℓ_0 longueur moyenne d'une ligne de force dans l'air,

ℓ_f longueur moyenne d'une ligne de force dans le matériau ferromagnétique,

N nombre de spires de la bobine.

L'inductance sera notée L :

$$L = N^2/R$$

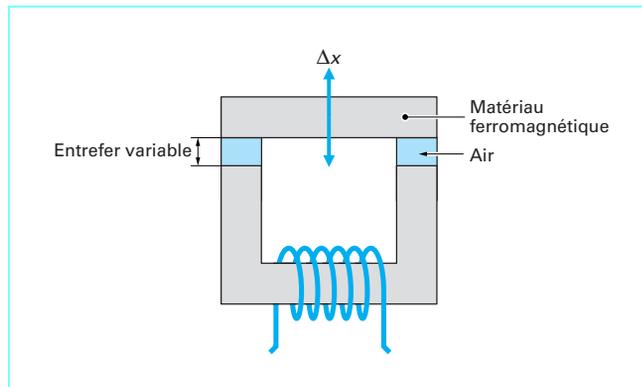


Figure 7 – Structure d'un capteur de déplacement inductif à entrefer variable

3.2.1 Capteur à entrefer variable

Le capteur à entrefer variable comprend un circuit magnétique composé d'une bobine et d'un noyau en deux parties. La partie du noyau liée au référentiel fixe porte le bobinage. L'autre élément du noyau est lié à la partie mobile du capteur (figure 7). Entre ces deux éléments se trouve une zone de taille variable appelée **entrefer** où les lignes de champ magnétique circulent dans un milieu (l'air le plus souvent) de perméabilité magnétique différente de celle du noyau.

Dans ce cas, le coefficient d'auto-induction (inductance) du circuit magnétique peut s'exprimer sous la forme :

$$L = \mu_0 N^2 s \frac{1}{\ell_0 + \frac{\ell_f}{\mu_f}}$$

Pour que la valeur de l'inductance soit sensible à la variation de la longueur ℓ_0 de l'entrefer, il importe de vérifier : $\ell_0 \gg \ell_f/\mu_f$. L'expression de L se simplifie alors comme suit :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 s}{\ell_0}$$

Une variation $\Delta \ell$ de l'entrefer est engendrée par un déplacement $\Delta x = \Delta \ell/2$ de l'armature mobile. Cela donne comme nouvelle expression de l'inductance :

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 s}{\ell_0} \frac{1}{1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0}}$$

Cette relation permet de calculer la variation de l'inductance :

$$\Delta L = \frac{-2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \frac{\Delta x}{1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0}}$$

La variation du mesurande secondaire qu'est l'inductance dépend de manière non linéaire de la variation du mesurande principal (la position de l'armature mobile du circuit magnétique). Aussi est-il intéressant de considérer de petites variations du mesurande ($\Delta x \ll \ell_0$), ce qui permet d'obtenir un développement de Taylor de l'expression du mesurande secondaire :

$$\Delta L = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \Delta x \left[1 - \frac{2\Delta x}{\ell_0} + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right]$$

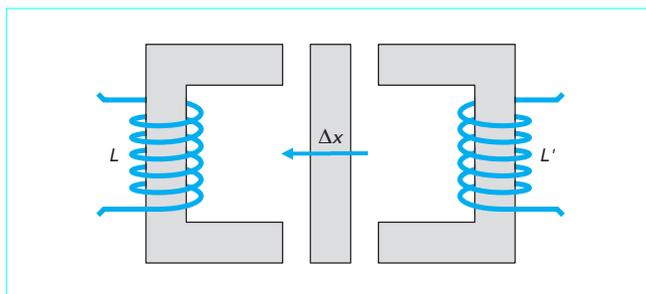


Figure 8 – Montage *push-pull* de deux inductances à entrefer variable

Un montage *push-pull* (figure 8) permet alors de s'affranchir des non-linéarités d'ordre pair tout en doublant la sensibilité du capteur :

$$\Delta L' - \Delta L = \frac{4\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \Delta x \left[1 + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right]$$

3.2.2 Capteur à noyau mobile

Ce type de capteur est constitué d'un bobinage, généralement solidaire de l'armature fixe du capteur, et d'un noyau relié à l'armature mobile (figure 9). La profondeur ℓ_f d'enfoncement du noyau ferromagnétique dans le bobinage est variable, la longueur restante de ce dernier ($\ell_0 = \ell - \ell_f$) est baignée par de l'air. L'inductance du circuit magnétique se présente alors comme la somme des coefficients d'auto-induction de ces deux portions de bobinage (L_0 et L_f) et de leurs coefficients d'induction mutuels (M) : $L = L_0 + L_f + 2M$.

Les coefficients d'auto-induction sont définis comme précédemment, le coefficient d'induction mutuelle est :

$$M = k\sqrt{L_0 L_f}$$

avec k coefficient de couplage ($0 \leq k \leq 1$), supposé constant.

L'application des formulations précédentes donne ici :

$$L_0 = \mu_0 \frac{N^2}{\ell^2} s_0 \ell_0 = \mu_0 \frac{N^2}{\ell^2} s_0 (\ell - \ell_f)$$

$$L_f = \mu_0 \frac{N^2}{\ell^2} [s_0 + (\mu_f - 1)s_f] \ell_f$$

d'où l'expression de L :

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell^2} \left[s_0 \ell + (\mu_f - 1)s_f \ell_f + 2k\sqrt{s_0 [s_0 + (\mu_f - 1)s_f]} \sqrt{\ell_f (\ell - \ell_f)} \right]$$

Comme pour le cas du capteur à entrefer variable, un montage *push-pull* à deux bobines (figure 10) avec des déplacements du noyau petits devant la longueur des bobines permet de linéariser la réponse du capteur. Il est toutefois nécessaire dans ce cas de prendre en compte l'apparition d'une inductance mutuelle supplémentaire entre les deux bobines.

3.2.3 Mesure des variations d'inductance

Dans le cas d'un capteur à impédance variable, il est rare de pouvoir considérer une inductance pure. Comme il a été mentionné

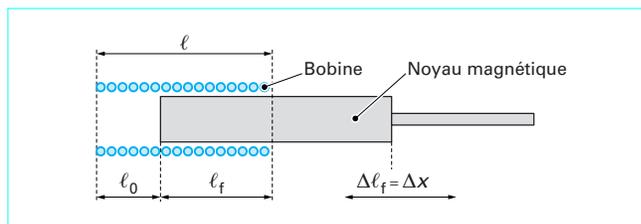


Figure 9 – Capteur inductif à noyau mobile

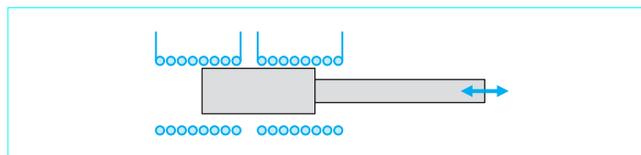


Figure 10 – Montage *push-pull* de deux bobines à noyau mobile

dans l'introduction de ce paragraphe 3.2, l'inductance est généralement associée à des capacités et résistances parasites. Celles-ci viennent alors perturber la mesure de l'inductance ou de sa variation.

Les capacités parasites sont localisées d'une part entre chaque spire du bobinage et toutes les autres spires, d'autre part entre ces spires et le noyau, et enfin entre ces spires et le câble de connexion du capteur. L'ensemble de ces capacités peut être regroupé sous forme d'une capacité globale C , située en parallèle avec l'inductance.

Les résistances parasites représentent les sources de dissipation énergétique du circuit : pertes ohmiques dans le bobinage, pertes par courants de Foucault dans le noyau, pertes magnétiques dans le noyau par traînage et par hystérésis. L'ensemble de ces pertes est représenté par une résistance globale R , en série avec l'inductance.

Le schéma équivalent du capteur (figure 11) amène au calcul de l'impédance équivalente du capteur :

$$Z = \frac{R}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2 C^2 \omega^2} + j \frac{L\omega(1 - LC\omega^2) + R^2 C\omega}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2 C^2 \omega^2}$$

Si le coefficient de surtension $Q = L\omega/R$ est élevé, cette impédance se compose alors d'une résistance et d'une inductance. Les expressions approchées de ces deux grandeurs sont celles mesurées par l'utilisateur cherchant à caractériser l'impédance d'un tel capteur :

$$R_{\text{mes}} = \frac{R}{(1 - LC\omega^2)^2}$$

$$L_{\text{mes}} = \frac{L}{(1 - LC\omega^2)}$$

Dans le cas d'un effet négligeable des capacités parasites, l'impédance équivalente devient :

$$Z = R + jL\omega$$

Les variations d'impédance $\Delta Z = \Delta R + j\omega\Delta L$ font intervenir, pour la partie résistive, les pertes ohmiques dans le bobinage, indépendantes de la position du noyau, et les pertes magnétiques R_m dans le noyau, proportionnelles à l'inductance :

$$\Delta R_m = k_m \omega \Delta L$$

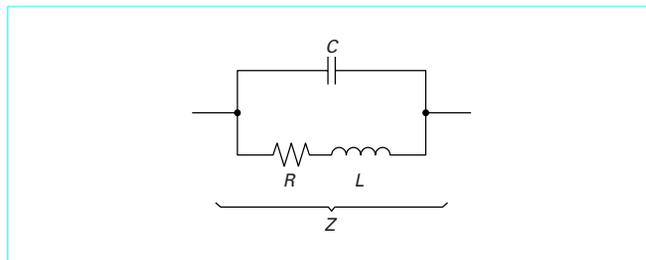


Figure 11 – Schéma équivalent d'un capteur inductif

La variation globale d'impédance est alors bien proportionnelle à la variation d'inductance ΔL :

$$\Delta Z = (k_m + j\omega)\Delta L$$

3.3 Capteurs à capacité variable

Une capacité, quelle que soit sa forme, se compose de deux armatures en regard séparées par un diélectrique (figure 12). Dans le cas d'un capteur de déplacement, l'une de ces armatures (dite armature fixe) est liée au repère de référence, l'autre (dite armature mobile) est liée au mobile dont le déplacement par rapport au repère fixe constitue le mesurande. La capacité formée par les deux armatures s'exprime alors sous la forme :

– pour le condensateur plan :

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{D}$$

avec ϵ_r permittivité relative du milieu placé entre les armatures,

A et D respectivement la surface en regard des armatures et leur distance ;

– pour le condensateur cylindrique :

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 L}{\lg \frac{r_2}{r_1}}$$

avec L enfoncement du cylindre intérieur de rayon r_1 dans le cylindre creux de rayon r_2 ,

$\epsilon_0 = 8,854\ 187\ 8 \times 10^{-12}\ \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ permittivité du vide.

Pour l'air, on prend usuellement $\epsilon_r = 1$.

Dans ce cas, la variation de capacité peut s'opérer par variation des surfaces en regard des deux armatures ou par variation de l'espace interarmatures. Toutefois, une autre configuration existe où la partie mobile ne fait pas partie du circuit électrique. Elle est alors chargée par influence et vient former deux capacités avec les armatures du condensateur relié au circuit électrique. Les capteurs à capacité variable se décomposent donc en trois sous-familles : les capteurs à surface variable, les capteurs à écartement variable et les capteurs à influence variable.

Pour cette dernière famille, le diélectrique est le plus souvent l'air ambiant, dont la propriété diélectrique présente l'avantage d'une extrême stabilité en fonction de la température, de l'humidité et de la pression (respectivement $2 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$, $-2 \times 10^{-6}\ \text{\% HR}$, $5 \times 10^{-7}\ \text{mbar}$).

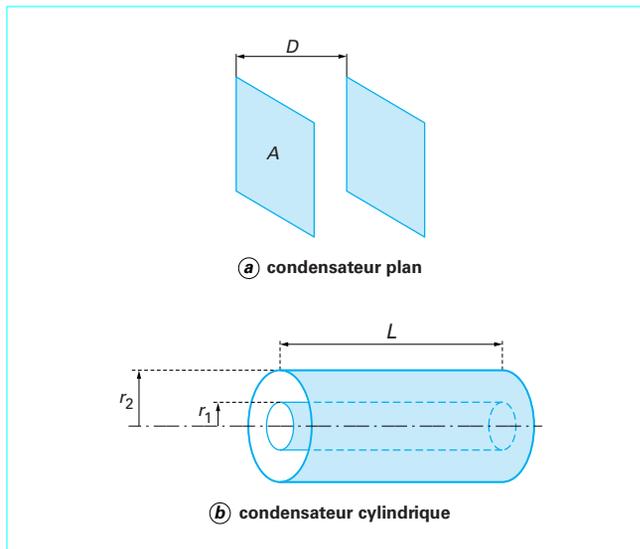


Figure 12 – Structures des condensateurs plan et cylindrique

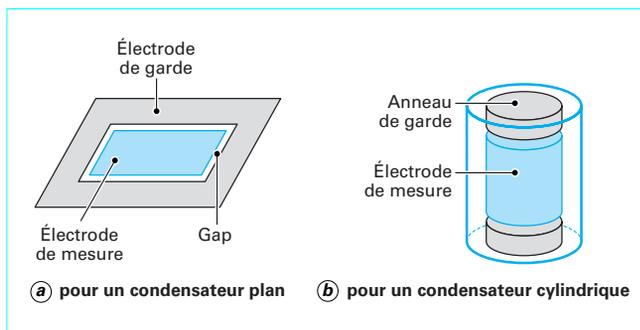


Figure 13 – Électrode de garde

3.3.1 Principes de mesure

Afin de limiter les effets de bord, les électrodes sont le plus souvent entourées d'une électrode dite « de garde », reliée à la masse du circuit de mesure, dont le rôle est de limiter la divergence des lignes de champ de l'électrode de mesure (figure 13).

Cette liaison à la masse permet de prolonger l'électrode de garde jusqu'au boîtier de mesure créant ainsi un blindage contre les rayonnements électromagnétiques. Il est alors possible de déporter l'électronique de mesure sans dégrader la qualité du signal.

L'électronique associée doit assurer deux fonctions essentielles :

- polariser la capacité formant le capteur ;
- convertir le déplacement d'armature sous forme d'une tension de mesure.

3.3.2 Capteurs capacitifs à surface variable

Les deux structures utilisées traditionnellement sont le condensateur à armature tournante (figure 14) et le condensateur cylindrique avec une armature mobile le long de l'axe du cylindre (figure 15).

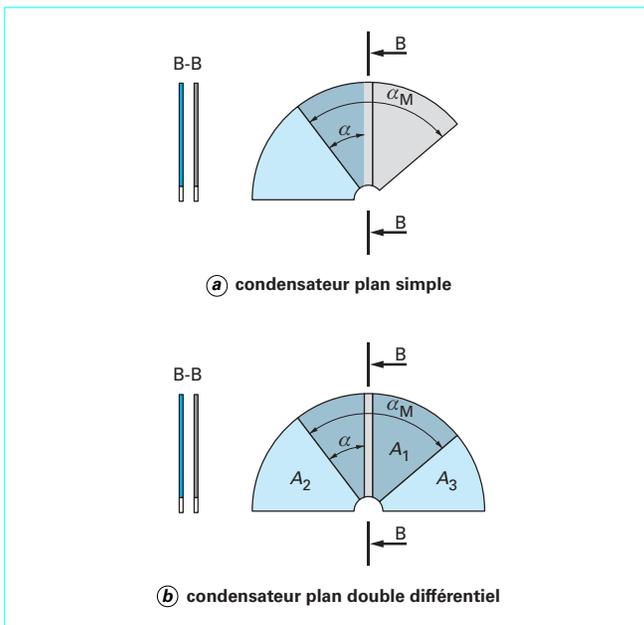


Figure 14 – Condensateur à armature tournante

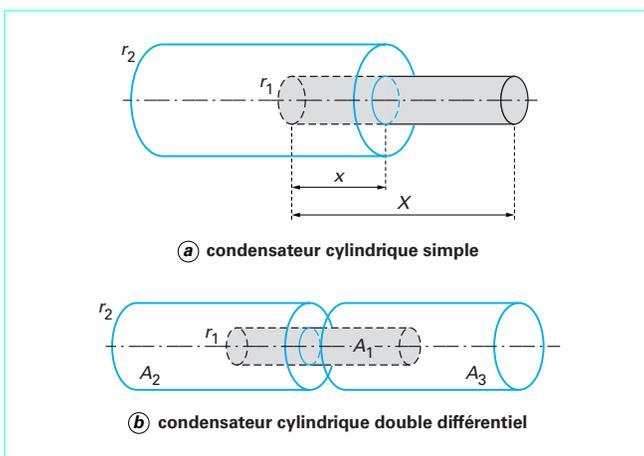


Figure 15 – Condensateur cylindrique à armature mobile le long de l'axe du cylindre

■ Condensateur unique

Pour le condensateur unique (c'est-à-dire avec deux armatures), la variation de capacité est proportionnelle au mesurande. Les capacités sont alors, respectivement pour le condensateur tournant (angle en degrés) et le condensateur cylindrique :

$$C(\alpha) = \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{360 D} \alpha$$

$$C(x) = \frac{2\pi\epsilon_0}{\lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} x$$

Contrairement à la sensibilité en termes de capacité S_C qui est ici constante ($S_C \approx K$), l'impédance est fonction non linéaire du mesurande x et la sensibilité en impédance ($S_Z = -1/K\omega x^2$) et la sensibilité relative ($S_R = 1/x$) présentent un comportement non linéaire en fonc-

tion de x . L'utilisation d'un montage *push-pull* faisant intervenir une troisième armature permet la compensation de cet effet. L'utilisation de sensibilités S_Z et S_R offre en effet une sensibilité élevée dans le cas des petits déplacements, mais c'est hélas dans ce cas que la non-linéarité est maximale.

Nota : les sensibilités sont définies par : $S_C = \Delta C/\Delta x$ et $S_Z = \Delta Z/\Delta x$.
La constante K est définie par : $C(\alpha) = K\alpha$ et $C(x) = Kx$.

■ Condensateur double différentiel

Le montage *push-pull* est constitué de deux capacités présentant une armature commune mobile (A_1). Les armatures fixes (A_2 et A_3) sont situées de part et d'autre de celle-ci. Les capacités C_{12} et C_{13} ainsi formées varient alors de manière opposée en fonction du déplacement x de l'armature mobile (figure 14 b et figure 15 b). La position médiane de l'armature mobile est prise comme origine des déplacements. Les deux capacités C_{12} et C_{13} sont alors égales : la sortie du montage *push-pull* est nulle. Les capacités C_{12} et C_{13} s'expriment alors en fonction du déplacement maximal des armatures (X) et de la sensibilité en termes de capacité ($S_R = K$) :

$$C_{12} = K(X + x) = KX(1 + x/X) = C_0(1 + x/X)$$

$$C_{13} = K(X - x) = KX(1 - x/X) = C_0(1 - x/X)$$

Dans ces équations, KX est noté C_0 et, selon le type de condensateur, X vaut $L/2$ ou $\alpha_M/2$. Il est alors intéressant d'utiliser les rapports de pont diviseur suivants :

$$\frac{Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13}} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{13}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{X}\right)$$

$$\frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{13}} = \frac{C_{13}}{C_{12} + C_{13}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{X}\right)$$

Leur différence fournit en effet directement le rapport x/X .

3.3.3 Condensateur à écartement variable

Le condensateur à écartement variable ne peut mesurer que des déplacements rectilignes puisque seule la structure à armatures planes permet ce mode de fonctionnement (figure 16).

■ Condensateur unique

Soit d le déplacement de l'armature mobile par rapport à sa position d'origine et D l'espace interarmature avant ce déplacement (figure 16 a et b), l'expression de la capacité s'écrit :

$$C(d) = \frac{\epsilon_0 A}{D + d}$$

Les expressions des sensibilités en termes de capacité et d'impédance et de la sensibilité relative sont alors respectivement :

$$S_C = -\frac{\epsilon_0 A}{(D + d)^2}$$

$$S_Z = \frac{1}{\epsilon_0 A \omega}$$

$$S_R = \frac{-1}{D + d}$$

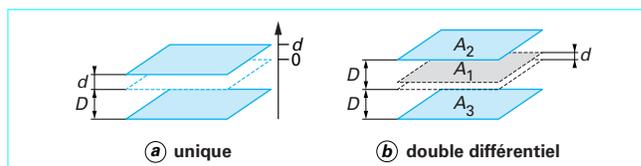


Figure 16 – Condensateur à écartement variable

Contrairement au cas du condensateur à surface variable, c'est ici la variation d'impédance qui est fonction linéaire du déplacement. Dans le cas où la condition à $d \ll D$ est vérifiée, ce sont S_C et S_R qui peuvent être maintenant considérées comme constantes.

L'avantage du condensateur à écartement variable réside dans une sensibilité en capacité très supérieure à celle du condensateur à surface variable pour le cas des petits déplacements. La comparaison peut être illustrée par le cas d'une capacité formée de deux plaques carrées de côté a , parallèles et distantes de D ($D \ll a$). Les sensibilités en termes de capacité pour un fonctionnement à surface variable et pour un fonctionnement à écartement variable sont alors respectivement :

$$S_C(//) = \frac{\epsilon_0 a}{D}$$

et

$$S_C(\perp) = \frac{\epsilon_0 a^2}{D^2}$$

d'ou :

$$\frac{S_C(\perp)}{S_C(//)} = \frac{a}{D} \gg 1$$

Compte tenu de la nécessité de conserver la validité de la relation $D \ll a$, le condensateur à écartement variable est limité à la mesure de petits déplacements (de l'ordre du millimètre). Pour des déplacements supérieurs (voisins du centimètre), il convient d'utiliser un condensateur à surface variable.

■ Condensateur double différentiel

Soit d le déplacement de l'armature mobile A_1 entre les deux armatures fixes A_2 et A_3 , par rapport à sa position d'origine et perpendiculairement à son plan. Soit D la distance séparant A_1 de chaque armature fixe (figure 16 b) et $\epsilon_0 A/D = C_0$. L'armature mobile forme alors avec les armatures fixes les capacités :

$$C_{12} = \frac{\epsilon_0 A}{D-d} = \frac{\epsilon_0 A}{D} \frac{1}{1-d/D} = C_0 \frac{1}{1-d/D}$$

$$C_{13} = \frac{\epsilon_0 A}{D+d} = \frac{\epsilon_0 A}{D} \frac{1}{1+d/D} = C_0 \frac{1}{1+d/D}$$

Comme dans le cas du condensateur différentiel à surface variable, il est possible de trouver des rapports de pont diviseur présentant une dépendance par rapport au mesurande facilement exploitable par un montage *push-pull*.

$$\frac{Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13}} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{13}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_0} \right)$$

$$\frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{13}} = \frac{C_{13}}{C_{12} + C_{13}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_0} \right)$$

3.3.4 Condensateur à influence variable

Le capteur est constitué de deux conducteurs cylindriques coaxiaux formant un condensateur de capacité fixe C_1 . Le conducteur central forme le noyau, le conducteur périphérique l'électrode de garde. Lorsqu'une cible s'approche de l'extrémité de ces conducteurs, elle se charge par influence et ils forment avec elle deux autres capacités (figure 17).

L'une de ces capacités a pour armatures la surface extrême du conducteur central et la cible distante de x ; sa capacité $C(x)$ est sim-

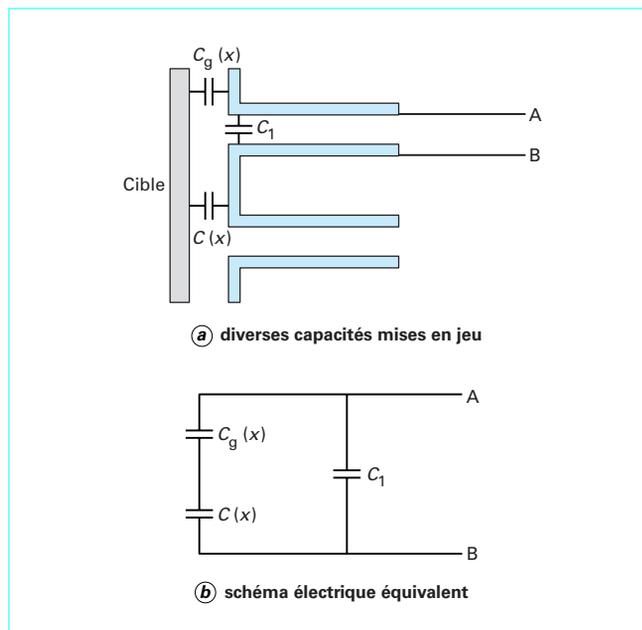


Figure 17 - Capteur capacitif de proximité

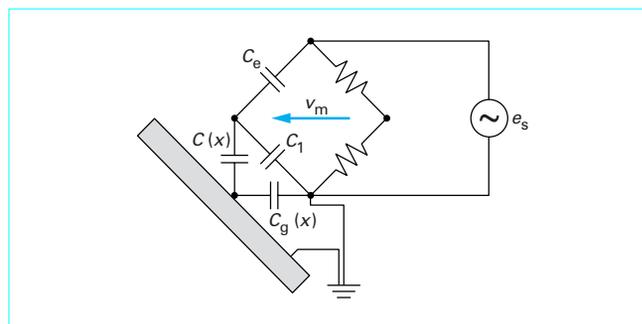


Figure 18 - Montage en pont de Sauty du capteur capacitif à influence variable

plement liée à x : $C(x) = K/x$, K étant une constante, pour une tête de mesure donnée. L'autre est formée par l'électrode de garde et la cible, sa capacité est $C_g(x)$.

La capacité C_m que l'on mesure entre les deux armatures du condensateur cylindrique est ainsi modifiée par la présence de la cible :

$$C_m = C_1 + \frac{C(x)C_g(x)}{C(x) + C_g(x)}$$

La mesure peut alors s'effectuer à l'aide d'un pont de Sauty (figure 18).

Si la cible est mise à la masse, la capacité $C_g(x)$ peut être court-circuitée lorsque l'électrode de garde lui est également reliée (en général). On a dans ce cas :

$$C_m = C_1 + C(x)$$

La tension de mesure v_m , qui est la tension de déséquilibre du pont, s'exprime alors comme :

$$v_m = \frac{e_s}{2} \frac{C_e - C_m}{C_e + C_m}$$

avec C_e capacité du condensateur d'équilibrage du pont,
 e_s tension d'excitation du pont.

Lorsque le déplacement d s'effectue autour d'une position D déterminée,

$$\text{soit } x = D + d \text{ et } C_m = C_1 + \frac{K}{D+d}$$

le pont étant équilibré pour la position D , en choisissant C_0 tel que

$C_e = C_1 + \frac{K}{D} = C_1 + C_0$ et en posant $\frac{K}{D} = C_0$, la tension de déséquilibre du pont correspondant à un déplacement d est alors :

$$v_m = \frac{e_s}{4} \frac{C_0}{C_1 \left(1 + \frac{d}{D}\right) + C_0 \left(1 + \frac{d}{2D}\right)}$$

Lorsque $\frac{d}{D} \ll 1$, l'expression de v_m limitée au premier ordre en fonction de d/D vaut :

$$v_m = \frac{e_s}{4} \frac{C_0}{C_1 + C_0} \frac{d}{D}$$

Ce type de capteur présente l'intérêt d'une réponse indépendante du matériau de la cible ; il est néanmoins important que les surfaces en regard soient très propres afin d'éviter tout dépôt modifiant le milieu diélectrique. Il est à noter que ce type de capteur permet une mesure sans contact de très petits déplacements.

4. Capteurs à couplage inductif variable

Les capteurs à inductance variable appartiennent à la catégorie des capteurs inductifs. Celle-ci comporte également des capteurs comprenant un transformateur à couplage variable, comme c'est le cas pour le transformateur différentiel, le microsyn, le potentiomètre inductif, le synchrodétecteur, le résolveur et l'inductosyn, qui font l'objet de ce paragraphe.

4.1 Transformateur différentiel

Le transformateur différentiel, encore appelé LVDT (pour *Linear Variable Differential Transformer*), est très répandu du fait de ses avantages qui sont :

- une grande plage d'étendues de mesure (de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres) ;
- une bonne linéarité, une très fine résolution, un fonctionnement sans liaison mécanique entre la partie fixe et la partie mobile (ce qui lui confère une très grande longévité) ;
- une étanchéité possible qui rend son fonctionnement compatible avec des environnements très sévères ;

– un isolement galvanique entre le circuit d'alimentation et le circuit de mesure qui simplifie la réjection des tensions mode commun.

■ Constitution

Un bobinage primaire et deux bobinages secondaires placés symétriquement par rapport à ce dernier constituent le LVDT. Le couplage entre le circuit primaire et chacun des circuits secondaires est modifié par un noyau ferromagnétique mobile. L'ensemble des bobinages constitue la partie fixe du capteur tandis que le noyau relié à une tige de manœuvre constitue l'équipage mobile (figure 19 a).

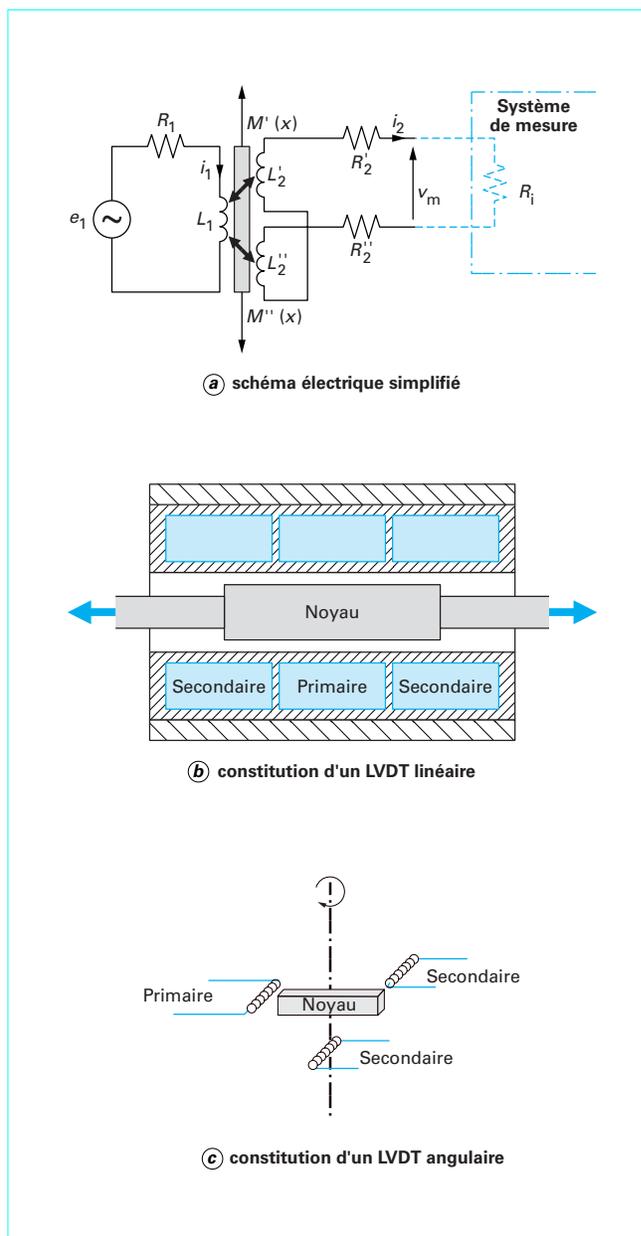


Figure 19 – Constitution d'un transformateur différentiel (doc. IFELEC)

■ **Équations de fonctionnement**

Les équations régissant le fonctionnement des circuits primaire et secondaire tels que décrits sur le schéma simplifié (figure 19 a), sont :

$$e_1 = (R_1 + jL_1\omega)i_1 + j\omega [M'(x) - M''(x)] i_2$$

$$[R_2' + R_2'' + R_1 + j\omega(L_2' + L_2'')] i_2 + j\omega [M'(x) - M''(x)] i_1 = 0$$

La tension $v_m = R_1 i_2$ aux bornes du dispositif de mesure branché au secondaire s'exprime alors en fonction de e_1 comme suit :

$$v_m = \frac{j\omega R_1 [M''(x) - M'(x)] e_1}{D}$$

avec

$$D = R_1(R_2 + R_1) + j\omega [L_2 R_1 + L_1(R_2 + R_1)] - \omega^2 [L_1 L_2 + (M'(x) - M''(x))^2]$$

et $L_2 = L_2' + L_2''$ et $R_2 = R_2' + R_2''$.

La linéarisation de la tension v_m en fonction de $M''(x) - M'(x)$ et son indépendance en fonction de R_1 sont obtenues au moyen d'une valeur élevée de cette dernière. L'expression de v_m devient alors :

$$v_m = \frac{j\omega [M''(x) - M'(x)]}{R_1 + jL_1\omega}$$

Les non-linéarités de la variation des coefficients d'induction mutuelle entre le circuit primaire et les circuits secondaires (en fonction du mesurande) sont compensées par un montage *push-pull*. La symétrie du capteur entraîne en effet une variation opposée de ces coefficients par rapport au mesurande (déplacement du noyau) pour les ordres impairs :

$$M'(x) = M(0) + ax + bx^2 + \dots$$

et

$$M''(x) = M(0) - ax + bx^2 + \dots$$

Leur différence (limitée au premier ordre) devient : $M''(x) - M'(x) = -2ax$.

La tension de mesure $v_m = \frac{-2j\omega a e_1}{R_1 + jL_1\omega} x$ varie alors de manière linéaire en fonction du mesurande. Cette variation est symétrique par rapport au point médian du capteur. Ce point est ainsi fréquemment associé à une valeur nulle du mesurande.

Néanmoins, les défauts de symétrie du capteur tant au niveau géométrique que structurel (hystérésis des phénomènes magnétiques induits dans le noyau) et les impédances parasites (capacités entre les spires des circuits primaire et secondaires) viennent perturber la symétrie du signal de sortie. La position médiane du capteur ne fournit alors plus une tension de mesure nulle. Les moyens permettant de limiter ce décalage de zéro consistent à soigner la réalisation du capteur, à limiter le flux magnétique dans le noyau et à réaliser une mise à la masse pour limiter les capacités parasites. L'alimentation symétrique du circuit primaire par rapport à une masse reliée à une des bornes du circuit secondaire permet, par exemple, de limiter leur couplage capacitif.

4.2 Microsyn

Les deux éléments qui constituent le microsyn sont un rotor et un stator. Ce dernier comporte quatre pôles situés à 90° les uns des autres. L'ensemble rotor - stator est réalisé en matériau ferromagnétique (figure 20).

Chaque pôle du stator porte deux enroulements, l'un appartient au circuit primaire, l'autre au circuit secondaire. L'alimentation du circuit primaire par une tension sinusoïdale engendre dans chaque enroulement i du secondaire des flux et une f.e.m. :

$$\Phi_i = \phi_i \cos \omega t \quad e_i = -\frac{d\Phi_i}{dt} = \omega \phi_i \sin \omega t$$

Le bobinage des enroulements du secondaire est réalisé de manière à obtenir e_1 et e_3 en opposition de phase avec e_2 et e_4 . La tension de mesure v_m vaut alors :

$$v_m = e_1 - e_2 + e_3 - e_4$$

ce qui donne :

$$v_m = -\omega(\phi_1 - \phi_2 + \phi_3 - \phi_4) \sin \omega t$$

La réluctance des circuits magnétiques primaires et secondaires est déterminée par la position du rotor. Lorsque ce dernier se trouve dans une **position médiane** par rapport aux paires de pôles 1-3 et 2-4, la réluctance et donc le flux induit sont identiques dans chaque pôle ; **la tension de mesure v_m est alors nulle**. Soit ϕ_0 la valeur du flux dans cette configuration, une rotation du rotor par rapport à cette position crée un déséquilibre entre les pôles et les flux polaires du secondaire sont alors :

$$\Phi_j = \Phi_0 + \Delta\Phi_j$$

La symétrie des enroulements implique alors :

$$\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_3 = \Delta\Phi \quad \text{et} \quad \Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_4 = \Delta\Phi'$$

L'expression de la tension de mesure est alors :

$$v_m = 2\omega(\Delta\Phi - \Delta\Phi') \sin \omega t$$

Les variations de flux $\Delta\Phi$ et $\Delta\Phi'$ autour de la position médiane sont de signes contraires. Un développement de Taylor de ces expressions, limité au second ordre, pour de faibles variations angulaires $\Delta\alpha$ donne :

$$\Delta\Phi = a\Delta\alpha + b(\Delta\alpha)^2$$

$$\Delta\Phi' = -a\Delta\alpha + b(\Delta\alpha)^2$$

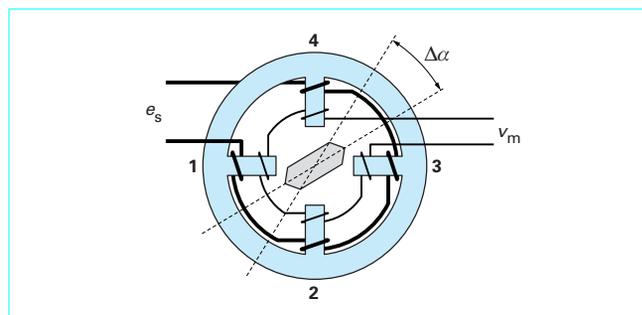


Figure 20 - Principe de constitution du microsyn

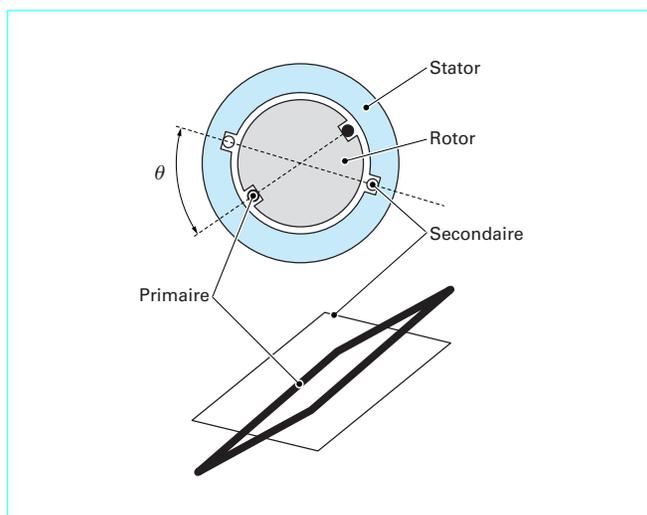


Figure 21 - Principe de constitution du potentiomètre inductif

La mise à profit du montage *push-pull* permet alors d'obtenir une réponse proportionnelle au mesurande $\Delta\alpha$:

$$v_m = 4a\omega\Delta\alpha \sin \omega t$$

De même que pour le cas du LVDT, l'utilisation d'un montage adapté permet la limitation de la tension résiduelle de décalage de zéro. Le microsyn permet, dans ce cas, la mesure de très petits déplacements angulaires.

4.3 Potentiomètre inductif

Le stator et le rotor de ce capteur peuvent être considérés comme deux bobines plates portées par des éléments ferromagnétiques (figure 21).

Le circuit primaire, porté par le rotor, est alimenté par une tension $E_1 \cos \omega t$. Il est alors parcouru par le courant $I_1 \cos(\omega t + \psi)$ qui crée un champ d'induction traversant le circuit secondaire. Ce champ, proportionnel au courant du primaire, induit dans le circuit secondaire la f.e.m. :

$$E_2 = M(\theta)\omega I_1$$

avec $M(\theta)$ coefficient d'induction mutuelle entre les circuits primaire et secondaire.

Son expression en fonction de l'écart angulaire entre les deux circuits peut s'écrire en première approximation :

$$M(\theta) = M_0 \cos \theta$$

Pour θ proche de $\pi/2$, l'expression :

$$E_2 = M_0 \omega I_1 \cos \theta$$

devient :

$$E_2 = M_0 \omega I_1 \sin \alpha$$

avec $\theta = \alpha + \pi/2$

d'où, en première approximation, pour α petit :

$$E_2 = M_0 \omega I_1 \alpha$$

L'extension de l'étendue de mesure à α voisin de $\pi/2$ est obtenue par une disposition judicieuse des bobines primaire et secondaire.

4.4 Synchrodécteur

Le schéma de principe (figure 22) présente deux groupes de quatre bobines constituant l'un l'émetteur et l'autre le récepteur. Pour chaque groupe, les trois bobines à 120° forment le stator et la bobine seule le rotor. En réalité, le stator et le rotor sont superposés ; ils sont présentés décalés l'un par rapport à l'autre pour plus de lisibilité. La liaison deux à deux des bobines des stators de l'émetteur et du récepteur fait circuler dans chaque bobine du récepteur un courant directement opposé à celui qui circule dans la bobine correspondante de l'émetteur.

La création d'un champ d'induction \vec{B} par le stator de l'émetteur (sous l'effet d'une tension sinusoïdale $E \cos \omega t$ à ses bornes) va engendrer la production d'un champ \vec{B}_e , de sens contraire dans le rotor de l'émetteur (loi de Lenz). Les courants qui créent ce champ dans l'émetteur circulent en sens contraire dans le récepteur ; celui-ci crée alors un champ \vec{B}_r opposé à \vec{B}_e , et donc de même sens que \vec{B} .

En notant θ_e l'angle formé par les axes des bobines du rotor et du stator S_{e1} de l'émetteur (figure 22), les expressions des f.e.m. créées dans les enroulements S_{e1} , S_{e2} , S_{e3} sont respectivement :

$$e_{e1} = \omega k E \cos \theta_e \cos(\omega t - \psi)$$

$$e_{e2} = \omega k E \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega t - \psi)$$

$$e_{e3} = \omega k E \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega t - \psi)$$

où le coefficient k et le déphasage ψ sont intrinsèques au capteur.

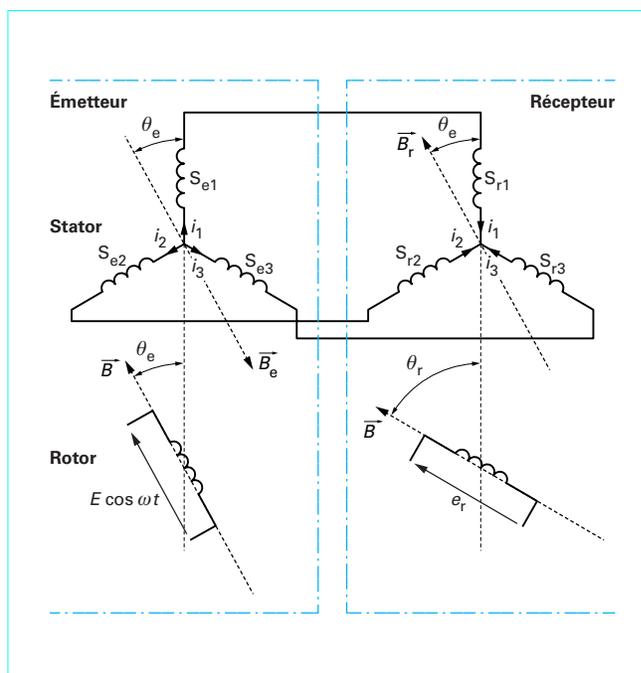


Figure 22 - Principe de constitution d'un synchrodécteur

Soit maintenant θ_r l'angle entre les axes des bobines du rotor et du stator S_{r1} du récepteur. L'enroulement du rotor récepteur est soumis à un flux induit proportionnel à $\cos(\theta_e - \theta_r)$ et à une constante k' (caractéristique du synchrodétecteur et de la pulsation ω de la tension d'excitation de l'émetteur). Ce dispositif devient particulièrement intéressant pour le cas particulier $\theta_r = \pi/2$ et θ_e voisin de 0. La tension de mesure, limitée au premier ordre du développement, devient alors directement proportionnelle à θ_e :

$$E_r \approx k' E \theta_e$$

Comme pour les dispositifs précédents, la justesse de ce dispositif est tributaire de la tension résiduelle pour $\theta_e = 0$.

Une utilisation fréquente du synchrodétecteur est l'asservissement de position. Il est utilisé pour mesurer l'écart angulaire entre la position de consigne et la position courante, avec une résolution de l'ordre de la minute d'angle.

Le montage en synchrépétiteur consiste à alimenter les rotors de l'émetteur et du récepteur en parallèle. Ils sont alors porteurs du même moment magnétique \vec{M} . La présence du champ \vec{B}_r , opposé à \vec{B}_e , soumet alors le rotor récepteur au moment magnétique $\vec{M} \wedge \vec{B}_r$ qui tend à l'aligner avec l'axe du rotor émetteur, d'où le nom du montage.

4.5 Resolver

Le schéma de principe (figure 23) montre un rotor constitué de deux bobinages d'axes orthogonaux et le stator constitué de même. L'ensemble rotor et stator forme le resolver. Selon la manière dont les quatre bobinages décrits ci-dessus sont alimentés, plusieurs modes de fonctionnement sont possibles. Ils sont décrits ci-après.

■ Configuration A

Une tension $E \cos \omega t$ alimente l'un des enroulements du rotor, appelé inducteur, tandis que le second est court-circuité. Des f.e.m. e_{S1} et e_{S2} de même pulsation apparaissent alors dans les enroulements du stator :

$$\begin{aligned} e_{S1} &= \omega k E \cos \theta \\ e_{S2} &= \omega k E \sin \theta \end{aligned}$$

avec θ angle formé par les axes de l'inducteur et de l'enroulement S_1 du stator,
 k constante.

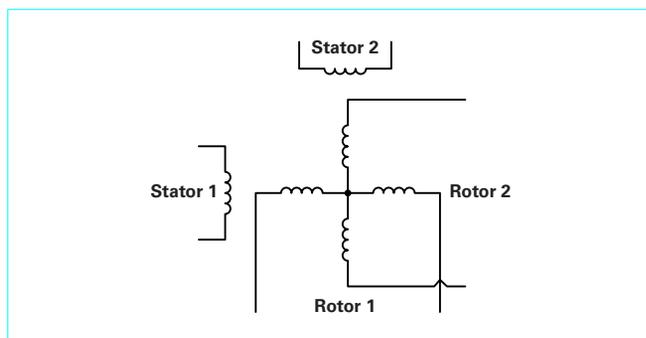


Figure 23 - Principe de constitution d'un resolver

■ Configuration A bis

Si l'inducteur est l'un des enroulements du stator, les f.e.m. apparaissent dans les deux bobines du rotor :

$$\begin{aligned} e_{r1} &= \omega k' E \cos \theta \\ e_{r2} &= \omega k' E \sin \theta \end{aligned}$$

avec θ angle formé par les axes de l'inducteur et de l'enroulement R_1 du rotor,
 k' constante intrinsèque au capteur.

■ Configuration B

Ce sont cette fois deux tensions en phase, mais d'amplitudes différentes, qui alimentent les bobines du stator :

$$\begin{aligned} e_{S1} &= E_1 \cos \omega t \\ e_{S2} &= E_2 \cos \omega t \end{aligned}$$

Posons $\tan \theta_0 = E_2/E_1$, les expressions des tensions d'alimentation deviennent :

$$\begin{aligned} e_{S1} &= E \cos \theta_0 \cos \omega t \\ e_{S2} &= E \sin \theta_0 \cos \omega t \end{aligned}$$

L'angle θ_0 existant entre la direction de l'induction produite par les bobines du stator et l'axe du rotor S_1 est alors constant. L'amplitude de la f.e.m. induite dans la bobine R_1 du rotor par cette induction vaut alors :

$$e_r = \omega k E \cos(\theta_r - \theta_0)$$

avec θ_r angle formé par les axes du rotor R_1 et du stator S_1 ,
 k constante intrinsèque du capteur.

Le maximum de l'amplitude E_r intervient pour $\theta_r = \theta_0$, tandis qu'elle s'annule pour $\theta_r = \theta_0 \pm \pi/2$.

■ Configuration C

Deux tensions en quadrature de phase alimentent chacun des stators :

$$\begin{aligned} e_{S1} &= E \cos \omega t \\ e_{S2} &= E \sin \omega t \end{aligned}$$

L'angle entre l'induction tournante ainsi créée et l'axe du stator S_1 est $\omega(t) = \omega t$. La f.e.m. induite dans l'enroulement R_1 du rotor vaut alors :

$$e_r = \omega k E \sin(\omega t - \theta_r)$$

avec θ_r angle formé par les axes du rotor et du stator S_1 ,
 k constante intrinsèque au capteur.

■ Configuration D

Le schéma de la figure 24 montre la manière de réaliser un synchrodétecteur diphasé en couplant deux resolvers (l'émetteur et le récepteur).

De même que dans le cas du synchrodétecteur présenté précédemment, le rotor du transmetteur est alimenté par une tension $E \cos \omega t$, et on note θ_e l'angle formé par son l'axe et celui du stator S_{e1} . Les f.e.m. générées dans les bobines du stator émetteur ont alors pour expressions :

$$\begin{aligned} e_{e1} &= \omega k E \cos \theta_e \cos(\omega t - \psi) \\ e_{e2} &= \omega k E \sin \theta_e \cos(\omega t - \psi) \end{aligned}$$

avec k et ψ constantes intrinsèques au capteur.

Des considérations analogues à celles développées pour le synchrodétecteur triphasé permettent de calculer la f.e.m. aux bornes du rotor récepteur en fonction de l'angle θ_r formé par les axes du

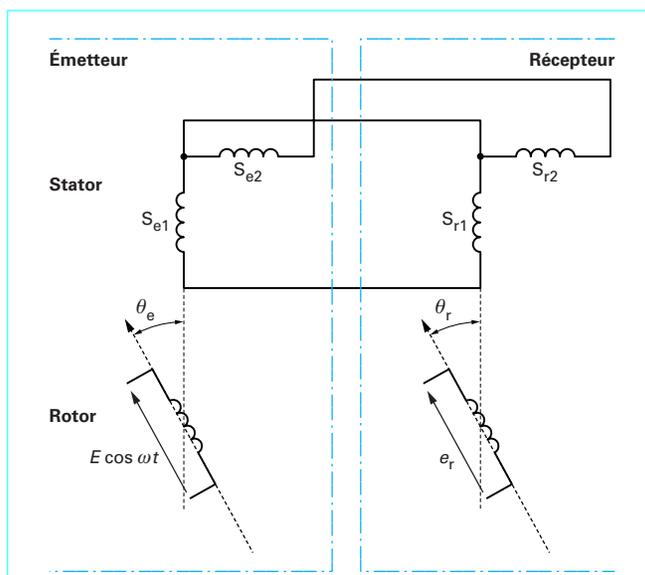


Figure 24 – Montage en synchrodétecteur de deux resolvers

rotor et du stator S_{r1} du récepteur et de l'angle précédemment défini :

$$e_r = k' E \cos(\theta_e - \theta_r)$$

Certaines valeurs particulières des angles θ_r et θ_e permettent de simplifier cette expression.

$\theta_r = \pi/2$ donne :

$$e_r = k' E \sin \theta_e$$

ce qui se simplifie encore pour θ_e voisin de 0 :

$$e_r \approx k' E \theta_e$$

Ces différentes configurations fournissent le plus souvent (sauf pour des positions particulières) des expressions trigonométriques des angles à mesurer. On limitera donc l'application du resolver aux systèmes de commande qui utilisent de telles expressions. Le principal atout du resolver réside dans sa bonne résolution angulaire (de l'ordre de quelques dizaines de secondes d'angle) et une tension résiduelle au voisinage du zéro inférieure au millivolt.

4.6 Inductosyn

Il se présente sous deux formes :

- l'inductosyn circulaire, pour la mesure des déplacements angulaires (figure 25 a) ;
- l'inductosyn linéaire, pour la mesure des déplacements rectilignes (figure 25 b).

Dans son principe, il peut être considéré comme un resolver à nombre élevé de pôles dont les enroulements statoriques et rotoriques ont été développés dans un plan.

L'inductosyn comprend donc deux parties planes qui se font face et dont l'une est mobile par rapport à l'autre :

- le rotor et le stator pour l'inductosyn circulaire ;



Figure 25 – Inductosyn (doc. Farrand Control)

- l'échelle et le curseur pour l'inductosyn linéaire.

L'échelle et le rotor sont formés par $2N$ conducteurs, reliés en série et qui sont parallèles pour l'échelle et radiaux pour le rotor. Chaque conducteur correspond à un pôle et l'ensemble de deux conducteurs consécutifs, qui sont parcourus par le courant en sens inverse, fixe le pas p , linéaire ou angulaire. Un rotor comportant 720 conducteurs a un pas angulaire de 1° .

Le curseur ou le stator sont aussi constitués de conducteurs en série, de même forme et de même pas que ceux de l'échelle ou du rotor mais ces conducteurs forment deux ensembles indépendants dont l'un est décalé par rapport à l'autre de $(n + 1/4)p$, n étant un nombre entier.

Les conducteurs de l'inductosyn sont réalisés par la technique des circuits imprimés sur un support isolant qui est généralement fixé sur une règle ou un disque métallique.

Le déplacement relatif des deux parties de l'inductosyn modifie le couplage électromagnétique entre les circuits qu'ils portent.

Dans la suite, on traitera uniquement le cas de l'inductosyn linéaire, les résultats obtenus se transposant aisément au cas de l'inductosyn circulaire.

Les divers montages étudiés dans le cas du resolver peuvent être utilisés avec l'inductosyn et portent, dans la suite, la même lettre.

■ Configuration A

L'échelle étant alimentée par une tension $E \cos \omega t$, le courant qui parcourt ses conducteurs induit dans chacun des deux circuits du curseur des f.e.m. e_{c1} et e_{c2} dont les amplitudes sont des fonctions périodiques de la position x du curseur, la période spatiale étant le pas p . Un dimensionnement judicieux des conducteurs et de la distance règle-curseur ou rotor-stator permet de rendre e_{c1} et e_{c2} fonc-

tions quasi sinusoïdales de la position x , le taux d'harmoniques étant généralement inférieur à 10^{-3} .

Par suite du décalage, qui équivaut à $1/4$ de période spatiale, entre les deux circuits du curseur, les f.e.m. dont ils sont le siège ont pour expression :

$$e_{c1} = kE \cos 2\pi \frac{x}{p} \cos \omega t$$

$$e_{c2} = kE \cos 2\pi \left(\frac{x}{p} - \frac{1}{4} \right) \cos \omega t$$

$$= kE \sin 2\pi \frac{x}{p} \cos \omega t$$

À partir de la mesure des amplitudes :

$$E_{c1} = kE \cos 2\pi \frac{x}{p} \quad \text{et} \quad E_{c2} = kE \sin 2\pi \frac{x}{p}$$

il est possible de déduire x/p à $m\pi$ près, m étant déterminé, par exemple, par comptage des zéros de E_{c1} ou E_{c2} ou par décomptage selon le sens du déplacement.

La grande précision des mesures par inductosyn est due, en particulier, au nombre important de pôles entraînant une compensation, par effet de moyenne, des incertitudes liées à chacun d'eux.

■ Configuration B

Les deux circuits du curseur sont alimentés par des tensions en phase mais d'amplitudes différentes :

$$e_{c1} = E_{c1} \cos \omega t$$

$$e_{c2} = E_{c2} \cos \omega t$$

soit, en posant $\tan \theta_0 = E_{c2}/E_{c1}$ et $\theta_0 = 2\pi x_0/p$:

$$e_{c1} = E \cos \theta_0 \cos \omega t = E \cos \frac{2\pi x_0}{p} \cos \omega t$$

$$e_{c2} = E \sin \theta_0 \cos \omega t = E \sin \frac{2\pi x_0}{p} \cos \omega t$$

La f.e.m. qui est induite dans l'échelle est la somme des f.e.m. induites par chacun des circuits du curseur soit :

$$e = k \left(e_{c1} \cos 2\pi \frac{x}{p} + e_{c2} \sin 2\pi \frac{x}{p} \right)$$

$$= kE \cos 2\pi \frac{(x_0 - x)}{p} \cos \omega t$$

k dépendant de la réalisation de l'inductosyn et de la pulsation ω .

Cette f.e.m. est une fonction sinusoïdale du déplacement x et présente un maximum, à l'intérieur de chaque pas, pour $x = x_0 + m\pi$, x_0 étant fixé par le rapport des amplitudes des tensions appliquées au curseur et m étant un entier positif ou négatif.

■ Configuration C

Des tensions d'égale amplitude mais en quadrature dans le temps sont appliquées aux circuits du curseur :

$$e_{c1} = E \cos \omega t$$

$$e_{c2} = E \sin \omega t$$

La f.e.m. induite dans l'échelle, somme des f.e.m. dues à chacun des circuits du curseur, a pour expression :

$$e = k \left(e_{c1} \cos 2\pi \frac{x}{p} + e_{c2} \sin 2\pi \frac{x}{p} \right)$$

$$= kE \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{p} \right)$$

Le déphasage de e est, dans ce cas, fonction linéaire du déplacement.

■ Configuration D

Ce montage utilise deux inductosyns, un transmetteur et un récepteur. L'échelle du transmetteur est alimentée par une tension $E \cos \omega t$, ce qui entraîne (montage **A**) l'apparition dans les enroulements du curseur des tensions suivantes :

$$e_{c1} = kE \cos 2\pi \frac{x_t}{p} \cos \omega t = E_{c1} \cos \omega t$$

$$e_{c2} = kE \sin 2\pi \frac{x_t}{p} \cos \omega t = E_{c2} \cos \omega t$$

avec x_t correspondant à la position relative, à l'intérieur d'un pas, de l'échelle et du curseur du transmetteur.

Ces tensions e_{c1} et e_{c2} sont appliquées aux deux enroulements du curseur du récepteur (montage **B**) ; elles induisent dans l'échelle du récepteur une f.e.m. qui s'écrit :

$$e = k' \left(e_{c1} \cos 2\pi \frac{x_r}{p} + e_{c2} \sin 2\pi \frac{x_r}{p} \right)$$

avec x_r définissant la position relative, à l'intérieur d'un pas, de l'échelle et du curseur du récepteur.

Compte tenu des expressions de e_{c1} et e_{c2} , on a finalement :

$$e = KE \cos 2\pi \frac{(x_t - x_r)}{p} \cos \omega t$$

avec K constante pour un appareillage et une pulsation ω donnés.

L'amplitude de cette f.e.m. est maximale chaque fois qu'à l'intérieur d'un pas l'on a : $x_t = x_r$.

L'inductosyn présente donc comme principales qualités une résolution élevée sur une étendue de mesure importante et une bonne répétabilité. Il trouve ses applications dans la mesure fine de grands déplacements et dans la commande de position.

5. Capteurs numériques optiques

La mesure du déplacement peut être réalisée de manière **absolue** ou **incrémentale**. Le **codage absolu** permet de connaître à la fois le déplacement relatif et la position, tandis que le **codage incrémental** ne fournit d'information que sur le déplacement relatif. La connaissance de la position nécessite alors une initialisation du système de mesure par rapport à une position de référence.

5.1 Codeurs optiques absolus

Le codeur absolu fournit une information de position absolue, le déplacement étant mesuré comme une variation de position. Le sens du déplacement est directement déterminé par le signe de la variation de position.

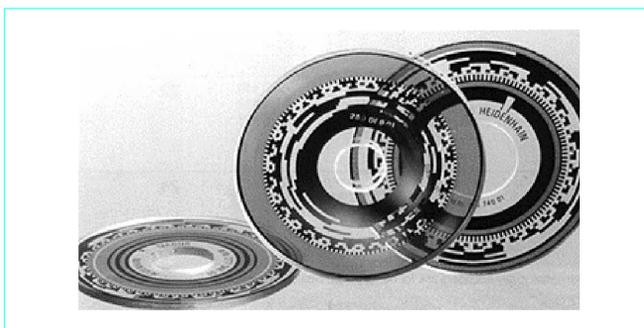


Figure 26 – Codeurs angulaires absolus (doc. Heidenhain)

La limite de résolution de ces systèmes est liée à la finesse minimale des traits de codage compatibles avec le système de lecture (figure 26). La lecture des codes est opérée par transmission, les structures de codeurs angulaire et linéaire sont présentées figure 27.

Pour un codeur angulaire, la taille du capteur intervient également : plus le diamètre du disque codeur est grand et plus la résolution angulaire du capteur est fine.

■ Codages utilisés

Les codages utilisés sont le code binaire, le code Gray et le code Gray à excédent (figure 28).

Le codage binaire (figure 28 a) représente les nombres sous forme de puissances de 2 : le chiffre décimal 7 est codé 0111 tandis que le chiffre décimal 8 est codé 1000 :

$$7 = 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

$$8 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0$$

Le changement simultané de valeur pour plusieurs bits lors du passage d'une position à la position consécutive est ici une source potentielle d'erreurs.

Le code Gray découle de ce constat : il a pour propriété de ne faire changer qu'un seul bit à la fois entre deux positions consécutives (figure 28 b). Les codages pour les positions 7 et 8 sont alors :

$$7 : 0100$$

$$8 : 1100$$

Le code Gray à excédent est utilisé pour coder un nombre d'états inférieur à celui disponible compte tenu du nombre de digits utilisés.

Exemple : pour coder 10 positions, il faut plus de 3 digits (ce qui ne permet de coder que 8 positions). Or quatre digits codent 16 positions. Il convient alors de « laisser » 6 positions inutilisées : les 3 premières et les 3 dernières. Ce code est appelé code Gray à excédent 3 (figure 28 c).

5.2 Codeurs optiques incrémentaux

Les codeurs optiques incrémentaux, linéaires ou circulaires, utilisent des marques gravées le plus souvent sur une règle en verre, ou parfois sur un ruban polymère souple pouvant être adapté à différentes formes de structure. Dans tous les cas, la technique utilisée pour la lecture dépend de la finesse des marques. Pour des marques de taille comprise entre 100 μm et 20 μm , une lecture par imagerie à l'aide de photodétecteurs (en lumière transmise ou réfléchie) est adaptée. Pour des marques plus fines (8 μm ou 4 μm), des phénomènes d'interférence apparaissent. La lecture est alors basée sur un principe interférentiel.

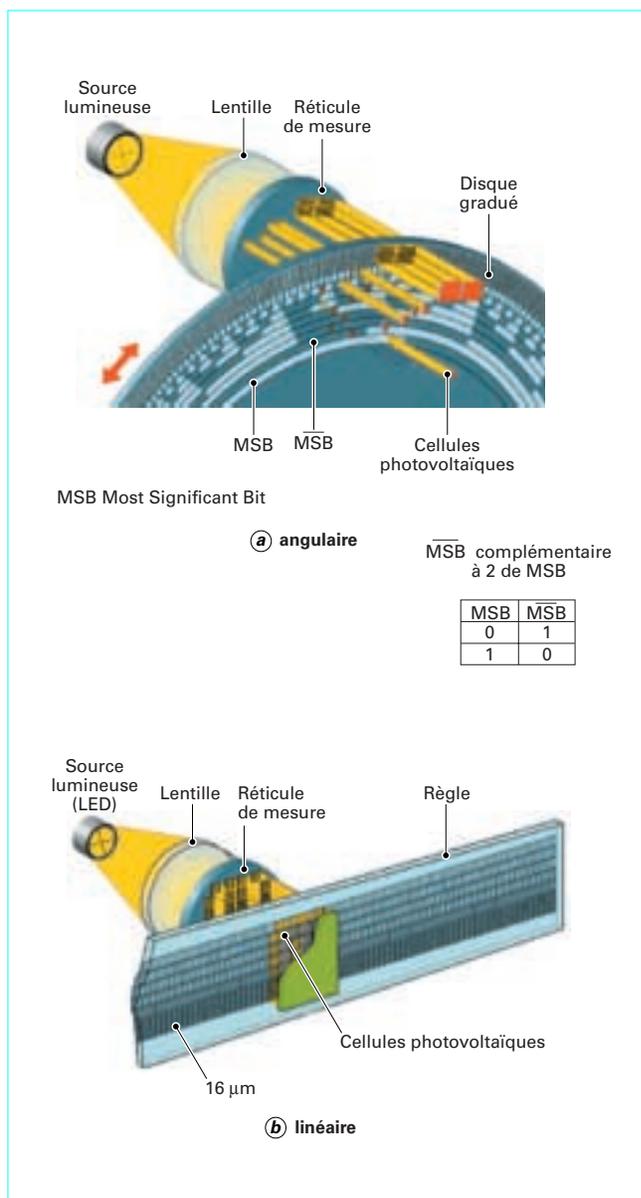


Figure 27 – Structure de codeurs optiques absolus (doc. Heidenhain)

5.2.1 Lecture en imagerie par transmission

L'imagerie par transmission met en œuvre l'alternance éclaircissement/obscurité produite sur les photodétecteurs par le déplacement d'une règle à marquage périodique devant le faisceau issu d'un réticule portant quatre réseaux de même période déphasés spatialement de $\lambda/4$. Un système à quatre photodétecteurs (figure 29 a et b, page 19) génère alors quatre signaux sinusoïdaux (I_0 , I_{90} , I_{180} et I_{270}) décalés en phase de 90° et dont l'amplitude présente une valeur moyenne non nulle. Ces signaux, combinés deux à deux en *push-pull*, permettent la création de deux signaux de mesure I_1 et I_2 déphasés de 90° et à valeur moyenne nulle (figure 30, page 19).

Le déphasage entre les signaux I_1 et I_2 permet la détermination du sens de déplacement de la règle. La présence d'un cinquième photodétecteur correspondant à une marque de référence sur la règle

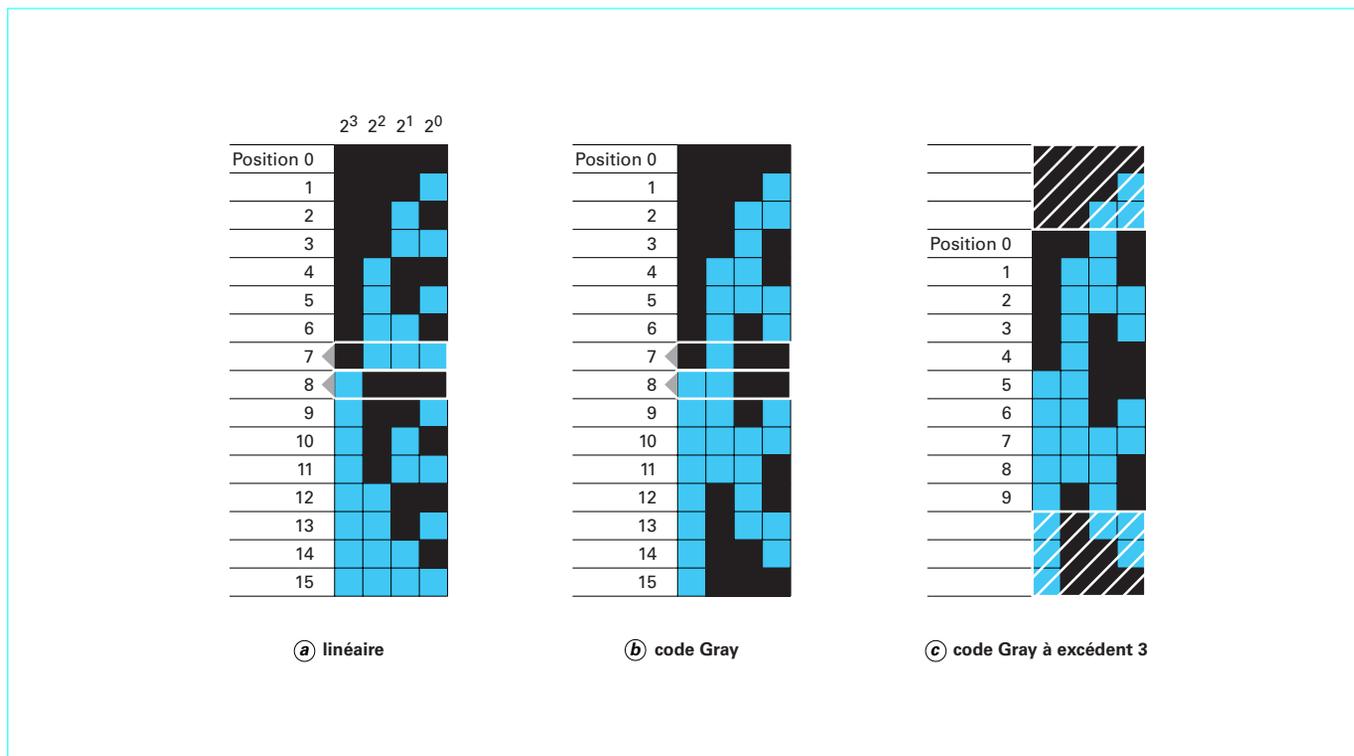


Figure 28 – Codages utilisés (doc. Heidenhain)

permet, quant à elle, l’initialisation du capteur incrémental sur une référence absolue.

Dans tous les cas, la vitesse de déplacement (linéaire ou angulaire) de la règle devant les photodétecteurs est limitée par les facteurs suivants :

- période et niveau de bruit des signaux de mesure ;
- résolution de la règle graduée ;
- facteur d’interpolation de l’électronique de traitement.

5.2.2 Lecture en imagerie par réflexion

L’imagerie par réflexion se présente sous deux formes faisant toutes deux intervenir une règle graduée (ou un disque).

■ La première utilise un champ de lecture unique avec un réticule de lecture comportant deux réseaux de phase alternés qui possèdent des propriétés de réflexion différentes (figure 31). Ce système crée quatre images de la règle, décalées chacune d’un quart de période qui permettent la génération de quatre signaux déphasés de 90° comme ceux présentés pour la lecture par transmission (cf. figure 30).

■ La seconde met en œuvre la diffraction de la lumière sur le réseau de phase du réticule pour produire les signaux de mesure. Lorsque la règle se déplace, les ordres de diffraction élevés subissent des variations de phase proportionnelles à ce déplacement (figure 32, page 20). Les ordres de diffraction produits par le réticule sont principalement les ordres - 1, 0 et + 1. Ces faisceaux sont à nouveau diffractés par la règle, l’ordre zéro disparaît alors.

Les faisceaux d’ordre - 1 et + 1, maintenant porteurs de l’information de phase traduisant le déplacement de la règle viennent interférer sur le réticule. La modulation de l’intensité lumineuse résultant de cette interférence est détectée par trois cellules photovoltaïques

qui fournissent trois signaux déphasés de 120°. Ces trois signaux sont enfin traités pour donner les deux signaux déphasés de 90° décrits précédemment.

6. Sources d’incertitude liées au positionnement des capteurs

Les capteurs de déplacement sont le plus souvent constitués d’une partie liée au référentiel fixe et d’une partie liée au référentiel mobile (élément matériel pour les capteurs avec contact, immatériel pour les capteurs sans contact).

Les principales sources d’incertitude sont :

- les défauts de positionnement Δx , Δy et Δz du corps du capteur par rapport au référentiel fixe ;
- le défaut d’alignement α du corps du capteur et de la direction de mesure ;
- le défaut de guidage β de la partie mobile (défaut d’alignement de l’axe de mesure par rapport aux faces de fixation du corps du capteur pour les systèmes de mesure sans contact) ;
- la différence de position γ entre le point de contact « idéal » et le point de contact réel sur la cible, compte tenu du rayon de courbure r de la cible au voisinage du point de mesure : $r \sin \gamma \approx (h + \Delta y) \approx r\gamma$.

Les calculs ci-dessous sont valables dans le cas de l’approximation qui consiste à faire coïncider les axes des degrés de liberté en rotation avec le zéro mesure. L est la distance du capteur à la cible au zéro mesure (l est la longueur de la tige de palpation pour les capteurs avec contact, la distance de travail pour les capteurs sans

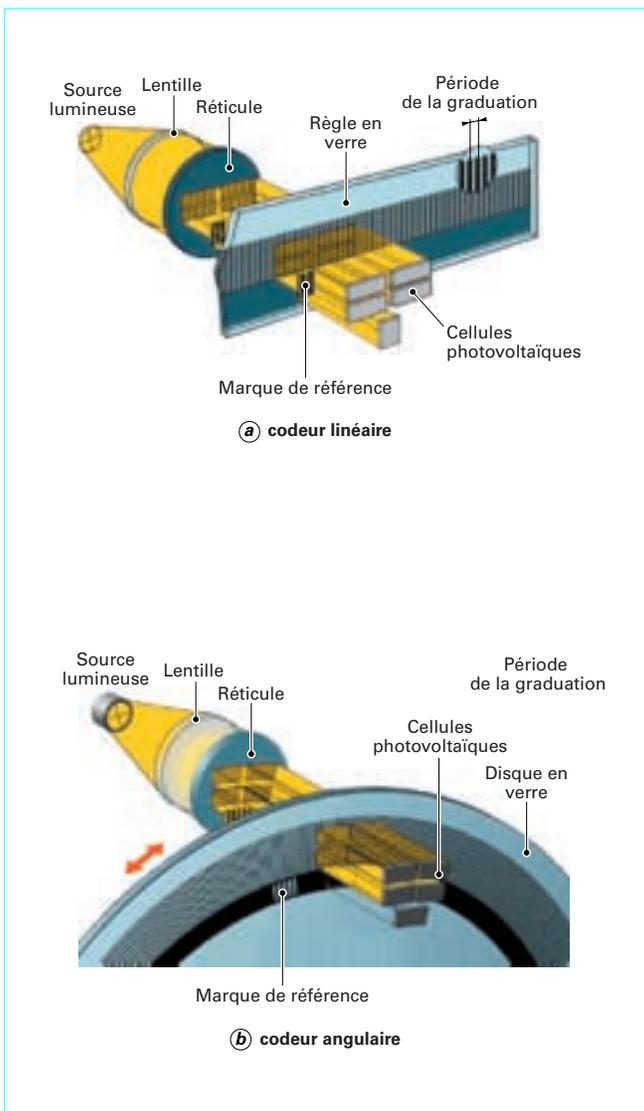


Figure 29 – Imagerie par transmission à 4 photodétecteurs (doc. Heidenhain)

contact) et d la valeur du mesurande, ce qui donne $L = \ell + d$. r est le rayon de courbure de la cible au point de mesure.

L'erreur de mesure δ due aux défauts de positionnement et d'alignement (figure 33) s'exprime comme suit (en considérant les angles α, β et γ petits) :

$$h \approx L \tan(\alpha + \beta) \approx L(\alpha + \beta)$$

$$\gamma \approx \frac{h + \Delta y}{r}$$

ce qui donne : $\delta = r(1 - \cos \gamma) + \Delta x \approx r \frac{\gamma^2}{2} + \Delta x$

et enfin : $\delta \approx \frac{[L(\alpha + \beta) + \Delta y]^2}{2r} + \Delta x$

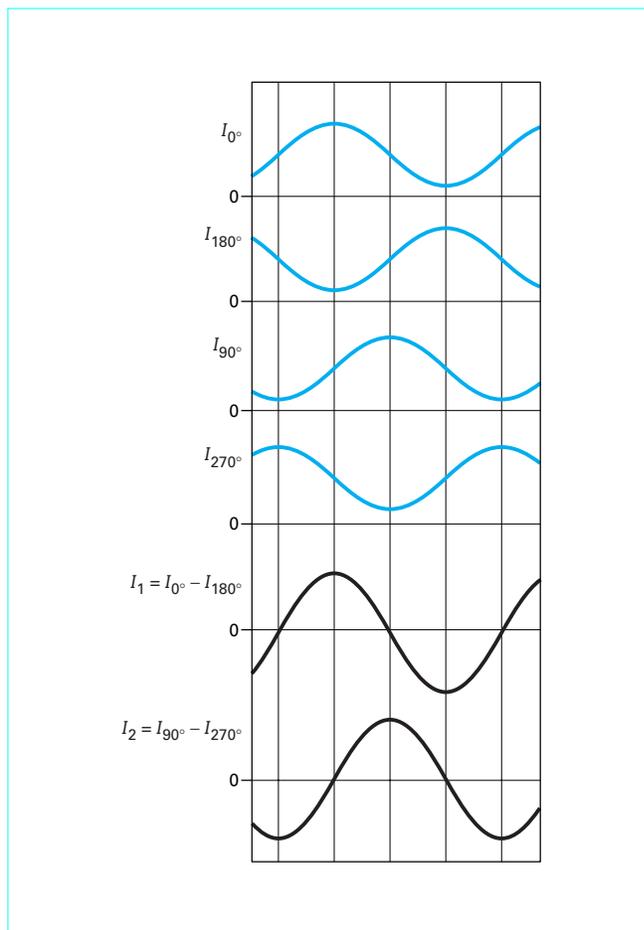


Figure 30 – Signaux de mesure de l'imagerie par transmission à 4 photodétecteurs (doc. Heidenhain)

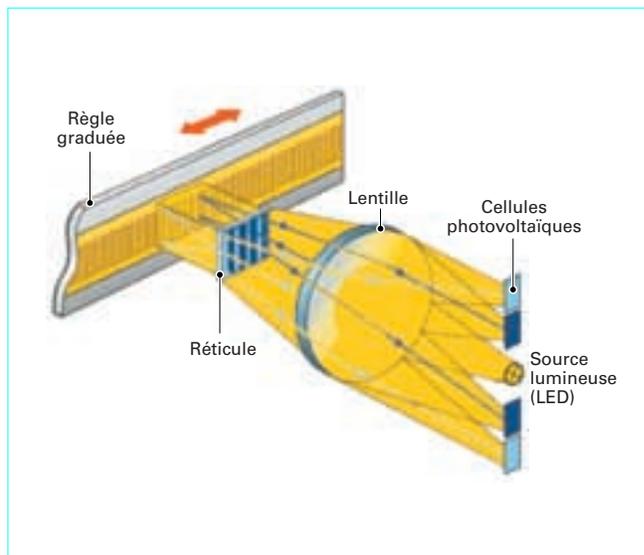


Figure 31 – Imagerie par réflexion en champ unique (doc. Heidenhain)

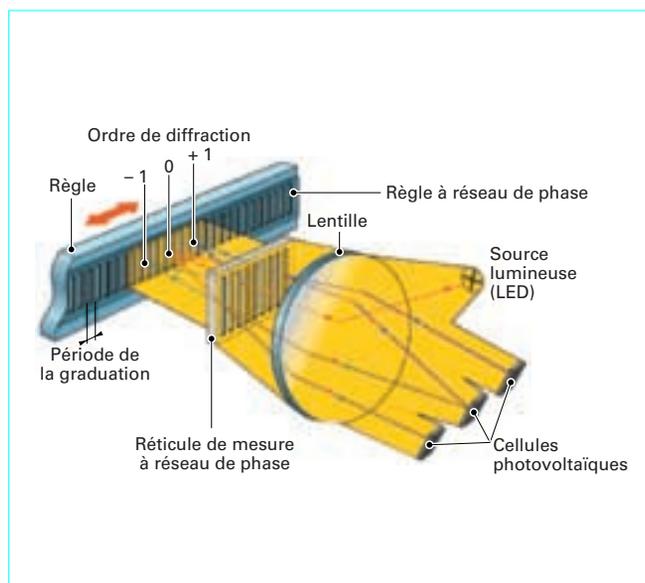


Figure 32 – Imagerie par réflexion à lecture interférentielle
(doc. Heidenhain)

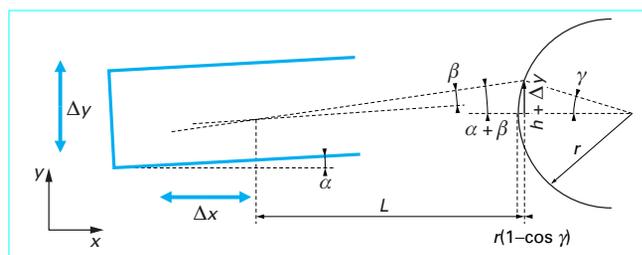


Figure 33 – Défauts de positionnement du capteur

7. Conclusion

Les capteurs de déplacement sont nombreux et basés sur des principes physiques variés. Il est à noter que l'utilisation de structures fonctionnant en *push-pull* permet de réduire sensiblement les non-linéarités de la réponse de ces capteurs. Pour ce qui est du choix du capteur, la sensibilité et l'étendue de mesure nécessaires ainsi que la faible sensibilité aux grandeurs d'influence présentes dans l'environnement de mesure constituent les premiers critères de choix. Le prix de la chaîne de mesure demeure le plus souvent le critère principal en fonction duquel des compromis seront à trouver vis-à-vis des critères précédemment cités.

Capteurs de déplacement

par **Stéphane DURAND**

Ingénieur de l'École nationale supérieure de mécanique et des microtechniques de Besançon

Docteur de l'université de Franche-Comté

Maître de conférences à l'École nationale supérieure d'ingénieurs du Mans

Bibliographie

Références

Dans le traité Mesures et contrôle

- [1] SAVELLI (M.), COMALLONGA (J.) et BOGGIANO (L.). – *Bruit de fond et mesures*. [R 310] (1992).
- [2] MATON (M.). – *Mesures des vitesses et circuits associés*. [R 1 810] (1993).
- [3] DEVAL (A.) et AMAND (Y.). – *Accélération*. [R 1 812] (1992).
- [4] LE GOËR (J.-L.) et AVRIL (J.). – *Extensométrie*. [R 1 850] (1992).

- [5] LE GOËR (J.-L.) et AVRIL (J.). – *Capteurs à jauges extensométriques*. [R 1 860] (1992).
- [6] RADIX (J.-C.). – *Accéléromètres inertiels*. [R 1 930] (2000).
- [7] RADIX (J.-C.). – *Gyroscopes et gyromètres mécaniques avec élément rotatif*. [R 1 940] (2000).
- [8] LEGER (P.). – *Gyroscopes mécaniques vibrants*. [R 1 942] (1999).
- [9] RADIX (J.-C.). – *Gyromètres optiques*. [R 1 945] (1999).
- [10] LIPINSKI (G.). – *Mesures dimensionnelles par interférométrie laser*. [R 1 320] (1995).

- [11] GELMAN (M.). – *Utilisation des théodolites en mécanique. Les systèmes de mesure par intersections (SMI)*. [R 1 384] (1991).
- [12] DIENY (B.) et FEDELI (J.-M.). – *Capteurs magnétorésistifs*. [R 416] (2000).
- [13] AZOOLAY (A.) et MARDIGUIAN (M.). – *Mesures en compatibilité électromagnétique*. [R 930] (1998).

Ouvrages

- ASCH (G.). – *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod (1991).
- BRUERE (A.). – *Les applications de la mesure capacitive*. Doc. ATI Électronique (1995).

Normalisation

Association française de Normalisation AFNOR

- NF EN 50319 Déc. 1999 Détecteurs de proximité – Prescriptions pour les détecteurs de proximité possédant une sortie analogique.
- NF EN 60947-5-2 Déc. 1999 Appareillage à basse tension – Partie 5-2 : appareils et éléments de commutation pour circuits de commande – Détecteurs de proximité
Constitué par : NF EN 60947-5-2:199903 (C63-147), NF EN 60947-5-2/A1:199912 (C63-147/A1).
- NF EN 60947-5-3 Oct. 1999 Appareillage à basse tension – Partie 5-3 : appareils et éléments de commutation pour circuits

de commande – Prescriptions pour dispositifs de détection de proximité à comportement défini dans des conditions de défaut (PDF).

- NF EN 60947-5-6 Juin 2000 Appareillage à basse tension – Partie 5-6 : appareillage et éléments de commutation pour circuits de commande – Interface à courant continu pour capteurs de proximité et amplificateurs de commutation (NAMUR).

International Organization for Standardization ISO

- ISO 6859-1:1982 Fév. 1982 Aéronautique. Détecteurs de proximité. Partie 1 : exigences générales.

Principaux constructeurs

Farrand Controls : <http://www.ruhle.com/index.htm>

Heidenhain : <http://www.heidenhain.com/main.html>

Midori America Corp. : <http://www.midoriamerica.com/index.html>

Fogale Nanotech : <http://www.fogale.fr>



L'expertise technique et scientifique de référence

Techniques de l'Ingénieur vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets. Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une **actualisation permanente** du fonds documentaire
- Un **comité d'experts** scientifiques et techniques reconnus
- Une **collection scientifique et technique incontournable** sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les **tendances et innovations** de vos secteurs



DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses** ⁽¹⁾⁽²⁾ : interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte** : un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue** : 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives** : vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande ⁽¹⁾, pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.

(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :

SAGEMCOM



SAFRAN
AEROSPACE DEFENCE SECURITY



ARKEMA
INDUSTRIAL CHEMISTRY

groParisTech

3M

SIEMENS

ROLEX

CCS
A division of the American Chemical Society

DASSAULT
AVIATION

EADS

L'ORÉAL

SAINT-GOBAIN



Schneider
Electric

THALES





Pour disposer d'un panorama complet sur une thématique
DÉCOUVREZ
les offres de packs !

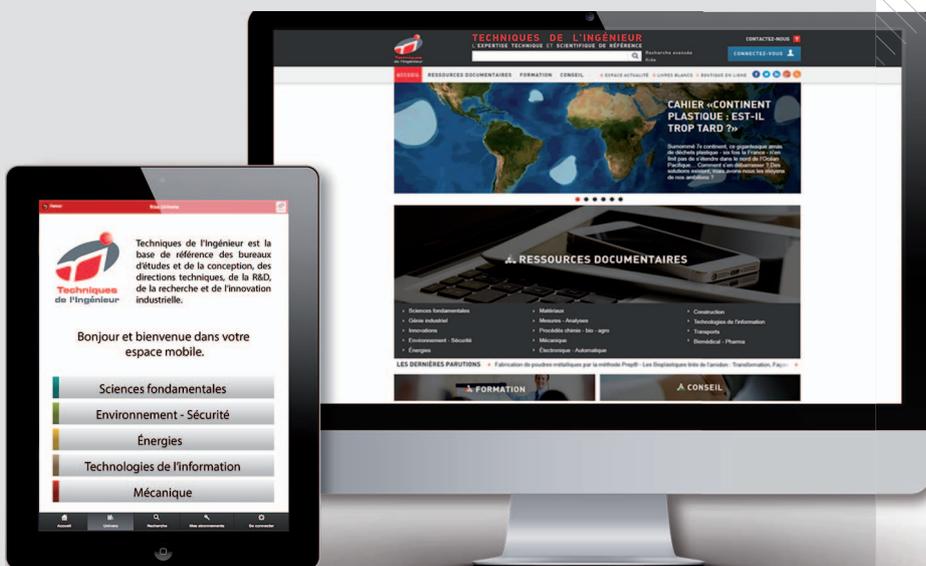
LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

- Sciences fondamentales
- Environnement - Sécurité
- Énergies
- Technologies de l'information
- Mécanique
- Innovations
- Génie industriel
- Biomédical - Pharma
- Procédés Chimie -Bio - Agro
- Matériaux
- Mesures - Analyses
- Électronique - automatique
- Construction
- Transports



POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

Tél : +33 (0)1 53 35 20 20

Email : infos.clients@teching.com
www.techniques-ingenieur.fr

LES AVANTAGES **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

■ ACTUALISATION PERMANENTE

Mises à jour permanentes, publication de **nouveaux articles** de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

■ DES SERVICES INCLUS

En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un **accès privilégié** à un **ensemble de services**.

■ MOBILITÉ



Votre abonnement étant **100 % web**, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions **iPad et Android**.



Pour accompagner vos équipes et projets,
CHOISISSEZ
les offres de formation et conseil

MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

LES ENGAGEMENTS **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité
des programmes sur le site
de Techniques de l'Ingénieur,
espaces **FORMATION** et **CONSEIL**
www.techniques-ingenieur.fr



RESSOURCES
DOCUMENTAIRES



FORMATION



CONSEIL