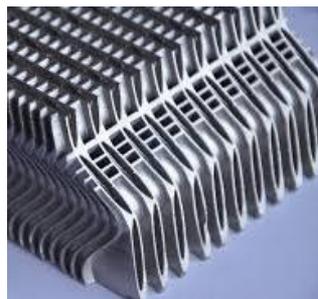
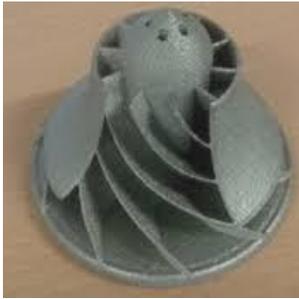


Tolérancement des surfaces complexes et en fabrication additive

Bernard ANSELMETTI

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud,
Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France

LURPA, 11 février 2016



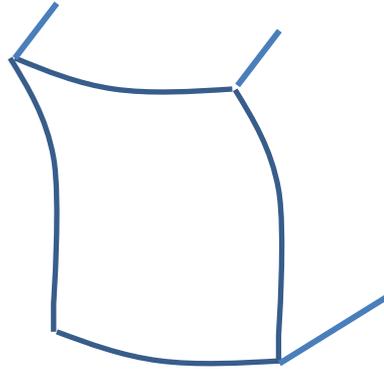
PREAMBULE

Contexte :

Surface complexe
= limite matière/air

La surface est définie par un
modèle numérique ou par un
modèle analytique

Il est impossible d'exiger une
représentation contractuelle
"papier" noir et blanc.



Les normes ISO 1101:2013 et ISO/DIS 1660 : 2013 sont très limitées

Objectif :

Présentation d'extensions de norme "nécessaires, raisonnables et compréhensibles"

Pour la recherche : voir EASY Tolerancing page WEB LURPA

- Simplification des contraintes
- Nouvelles propositions

New

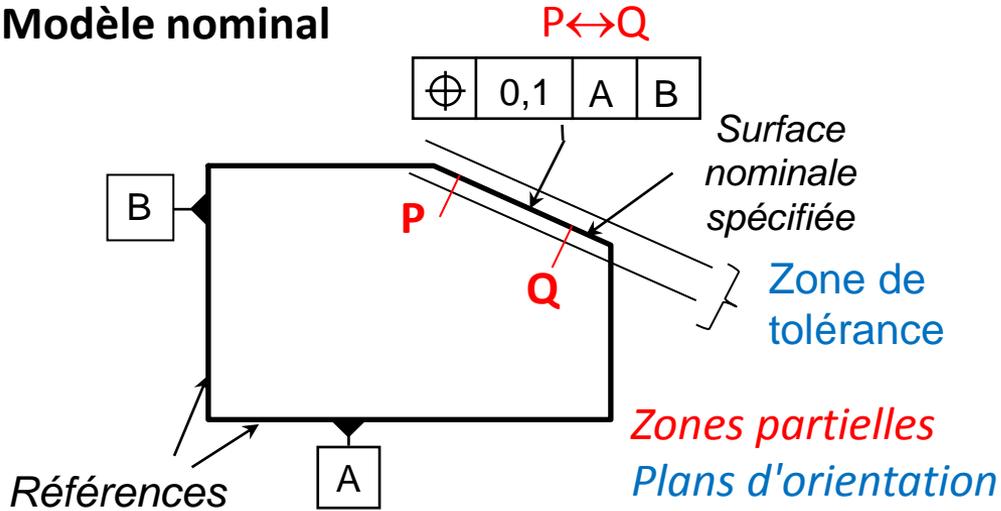
PLAN



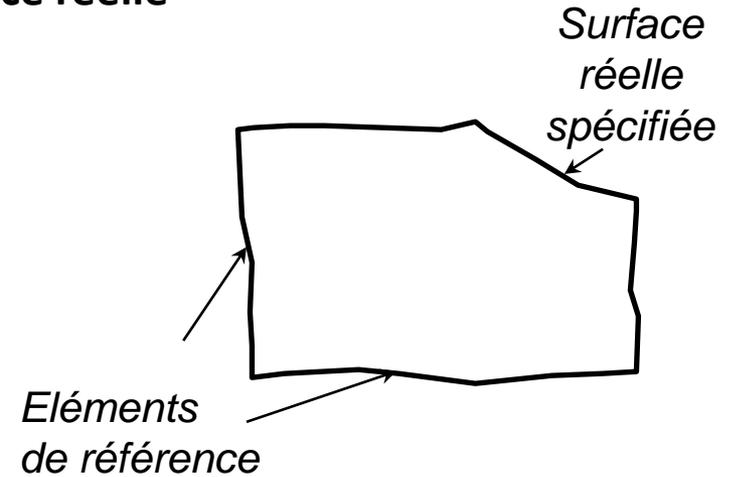
1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins

PRINCIPE DE TOLERANCEMENT

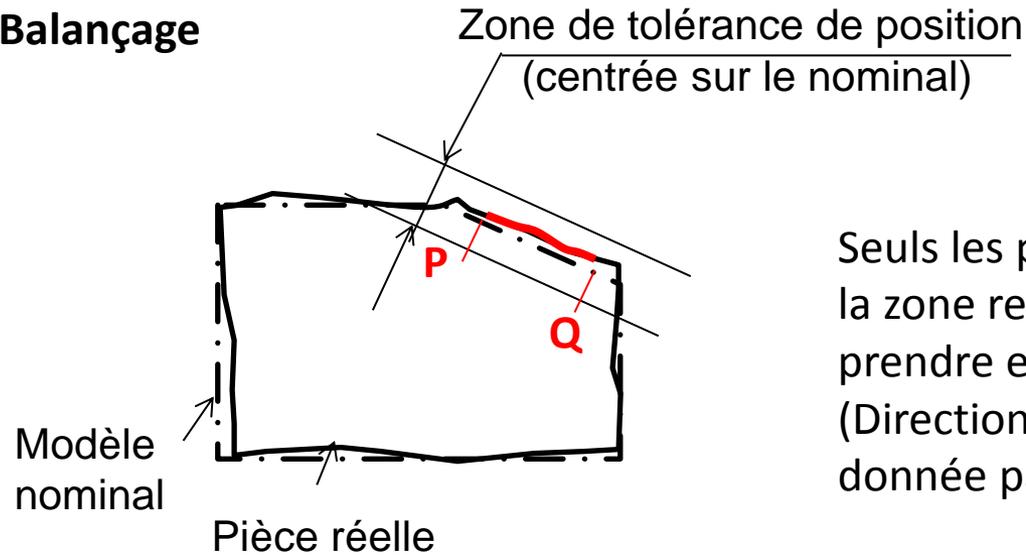
Modèle nominal



Pièce réelle



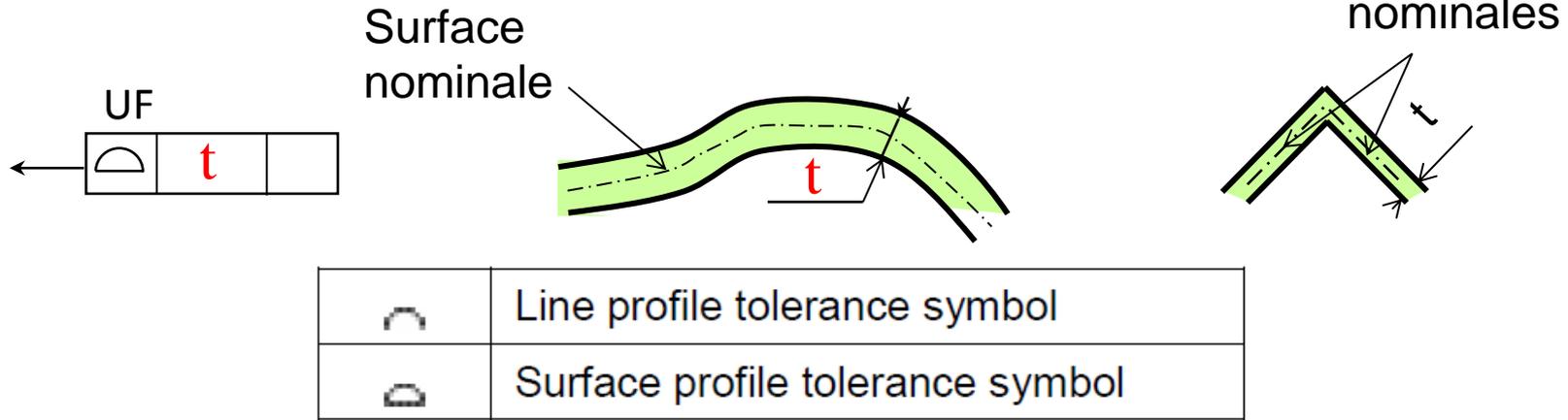
Balançage



Seuls les points projetés sur la zone restreinte sont à prendre en compte.
(Direction de projection donnée par le nominal)

SYMBOLE DE BASE

Espace compris entre deux surfaces offsets

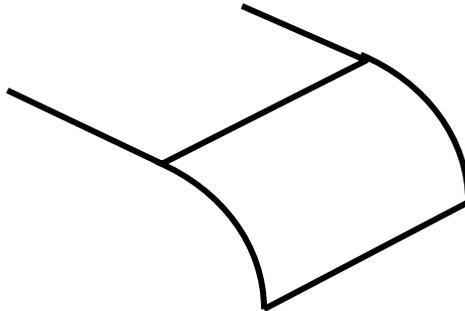


UF : united feature : l'ensemble de la surface est considérée comme une seule surface

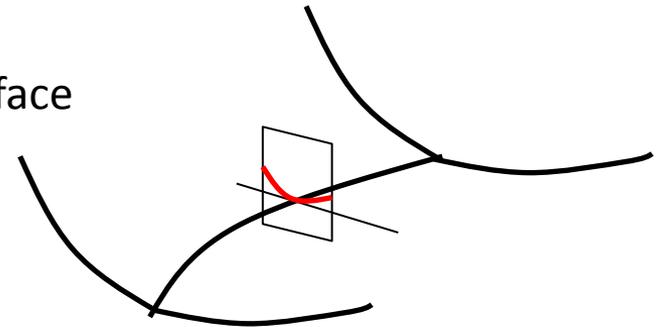
Projet : 1101: si pas de UF, chaque surface a sa propre zone de tolérance.

Deux surfaces adjacentes sont considérées comme une seule surface si les surfaces sont tangentes et de rayons de courbure identiques dans tous les plans d'intersection perpendiculaires à l'arête commune (même concavité)

2 surfaces

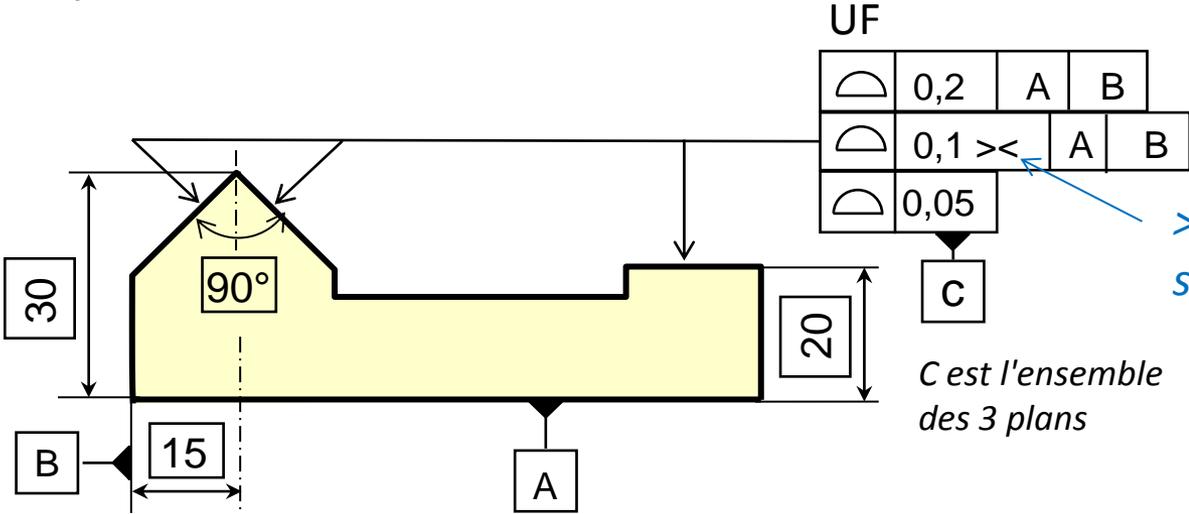


1 surface



FORME, ORIENTATION, POSITION

Les 3 plans constituent une seule surface, avec une seule zone commune.

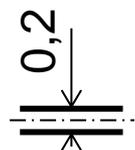


>< *contrainte d'orientation seulement*

(Attention : CZ >< casse la zone de tolérance commune)

C'est l'ensemble des 3 plans

Position



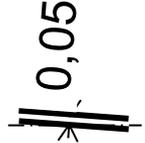
La zone est centrée sur le nominal

Orientation



La zone est construite centrée sur le nominal puis translaturée dans toutes les directions

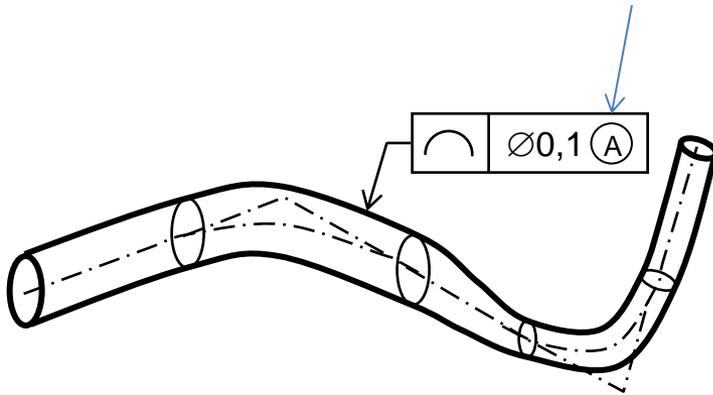
Forme



La zone est construite centrée sur le nominal puis déplacée librement

SPECIFICATION DE FORME D'UN AXE

Axe ou surface médiane ISO 1101 : 2013

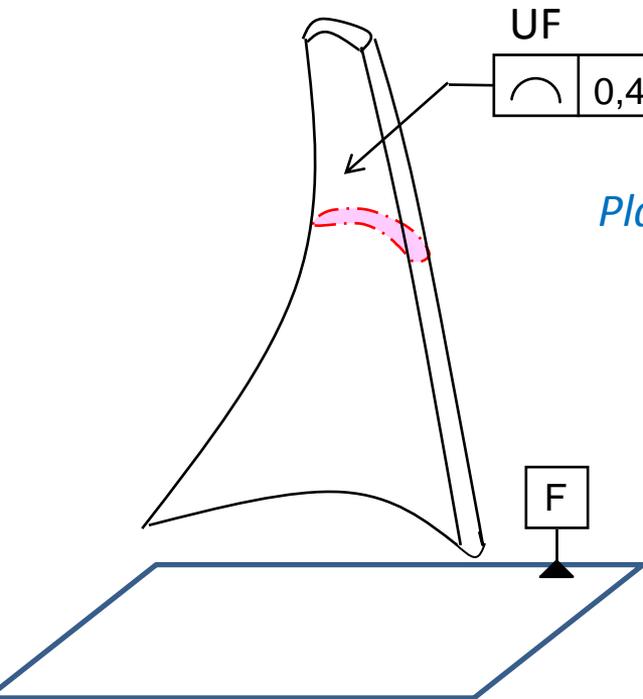


L'axe réel de la surface doit être dans la zone de tolérance définie par la surface offset de l'axe nominal avec un offset $t/2$.

NOTE : par définition un axe ou un plan médian est un élément virtuel. (Il ne peut être mesuré directement). L'axe nominal est défini par le modèle nominal. L'axe réel sera défini à partir des surfaces de la pièce réelle.

SECTION D'UNE LIGNE D'UNE SURFACE COMPLEXE

La spécification est imposée dans tous les plans d'intersection parallèles à F.



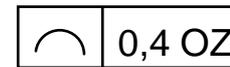
Plan d'intersection

Zone de tolérance dans le plan d'intersection parallèle à F



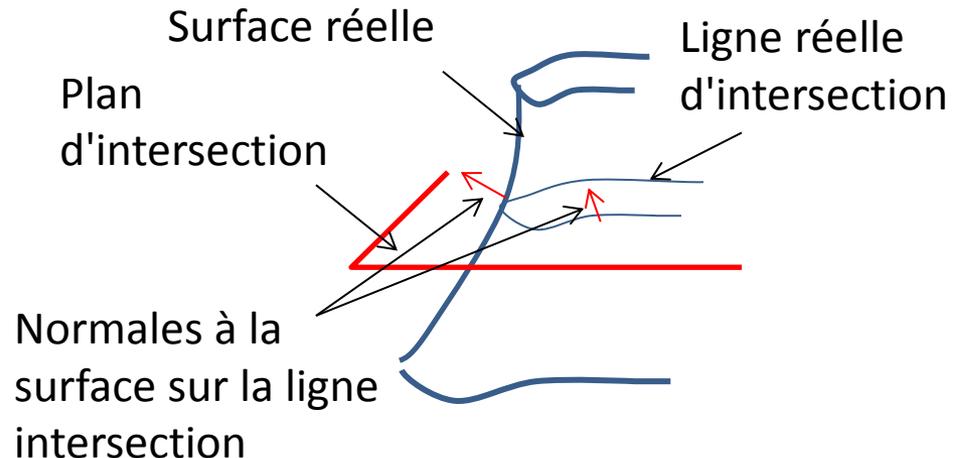
UF

Possible avec OZ



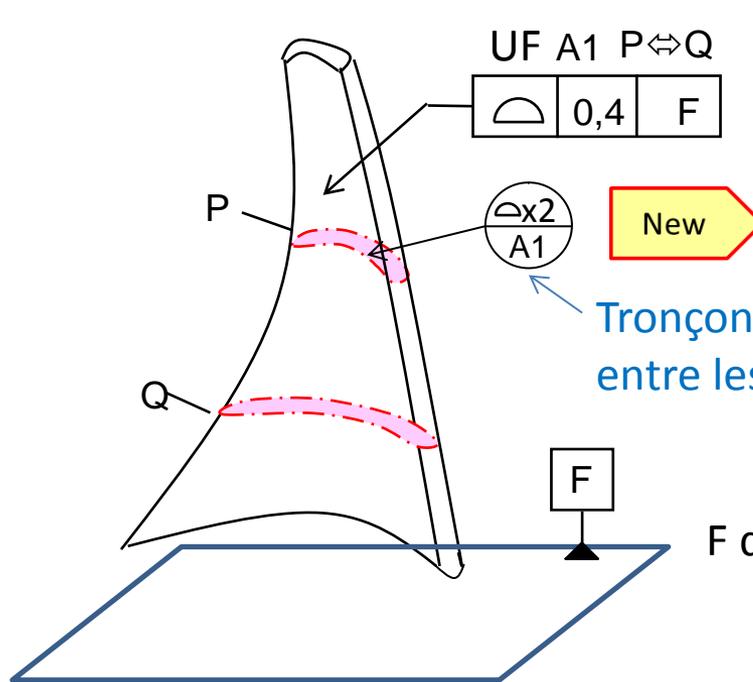
Selon l'ISO : le plan F est associé à une surface réelle
=> le plan n'est pas forcément en position "parfaite"
par rapport au nominal.

Problème de direction de mesure de l'écart et de projection des points obtenus "au voisinage de la section" :



TRONÇON D'UNE SURFACE COMPLEXE

Cette méthode évite d'avoir à calculer les points dans le plan d'intersection. L'écart est mesuré selon la normale.

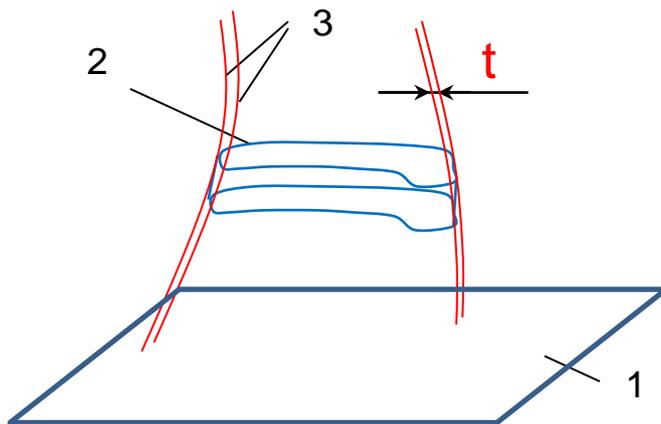


La zone de tolérance est définie sur l'ensemble de la surface. Seuls les points d'un tronçon doit appartenir à la zone de tolérance.

F défini dans le modèle nominal

New

F laisse des mobilités à la zone de tolérance.

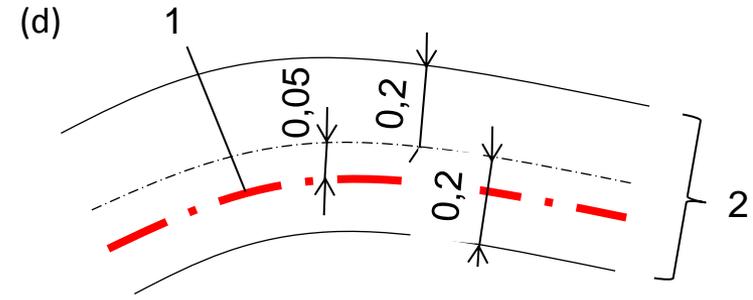
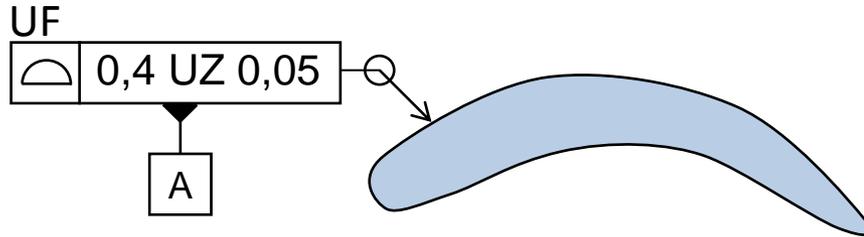


- 1 : Plan d'intersection = référence
- 2 : Surface réelle au voisinage de la ligne
- 3 : Zone de tolérance (représentation partielle)

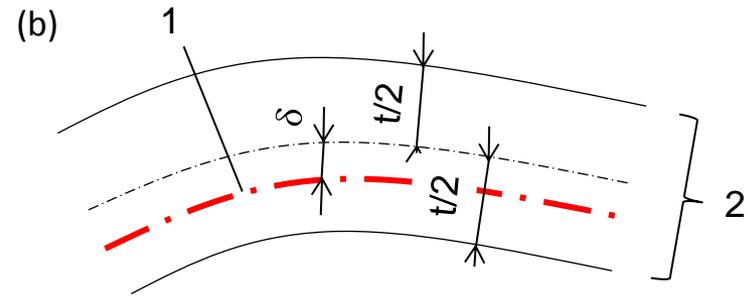
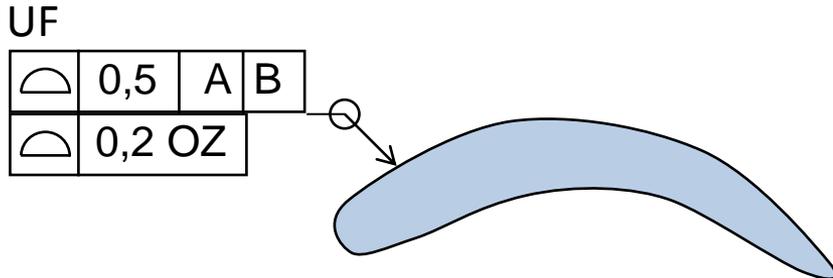
DECALAGE DU NOMINAL

Important en fabrication additive

Décalage imposé (UZ)



Décalage libre (OZ)



(défaut de forme apparent)

ZONE DE TOLERANCE VARIABLE

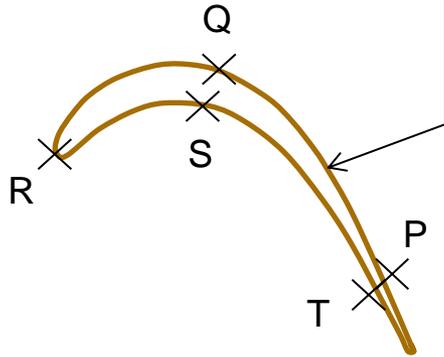
P, Q, R... Sont des lignes définies sur la surface

La tolérance varie linéairement entre les lignes en fonction de l'abscisse curviligne

(a) Contour ouvert

UF P-Q-R-S → T

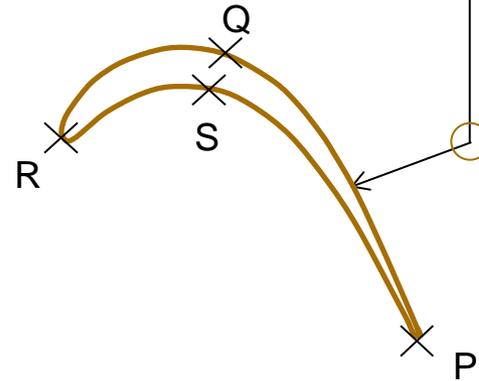
	0,2-0,1-0,05-0,1-0,2	A	B	C
---	----------------------	---	---	---



(b) Contour fermé

UF P-Q-R-S → P

	0,5-0,1-0,05-0,1-0,5	A	B	C
---	----------------------	---	---	---

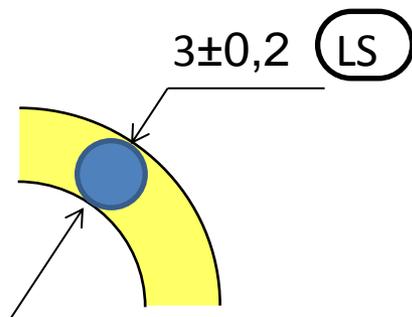
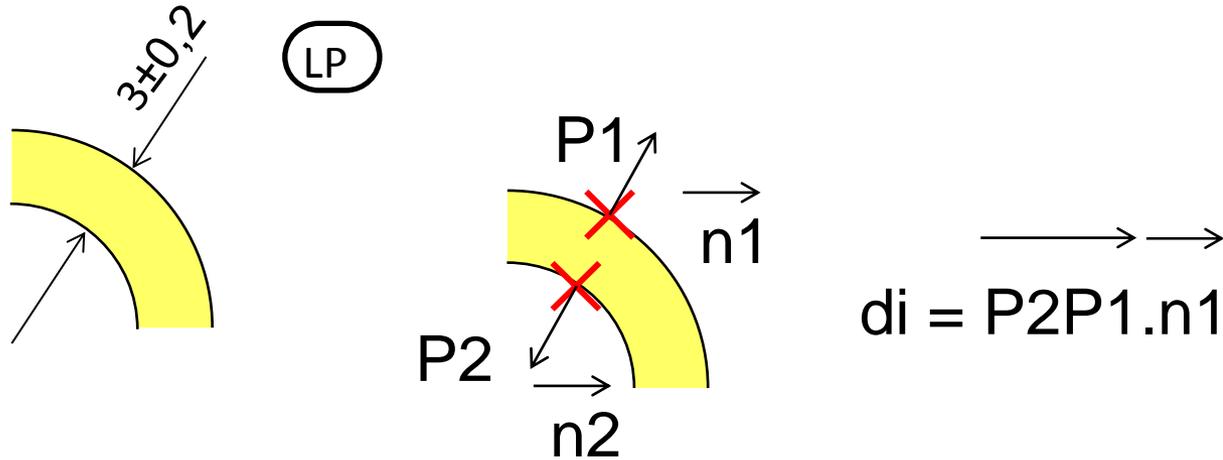


NOTE : Défini uniquement entre 2 lignes dans la ISO 1101 !

DIMENSIONS LOCALES

Emploi "limite" en ISO

Les surfaces doivent avoir la même normale sur les points "face à face"
cote = dimension locale entre 2 points face à face



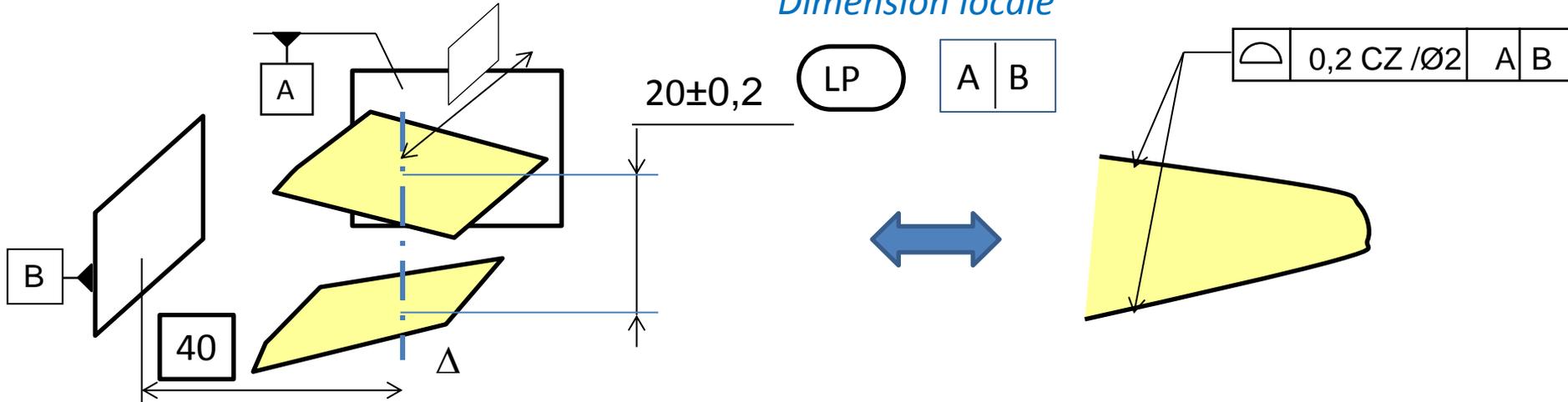
Taille entre deux points



Taille locale définie par une sphère bitangente

Dimension entre surfaces non parallèles

Dimension locale



Mesure de la distance réelle

Δ est une droite définie par rapport aux références A et B

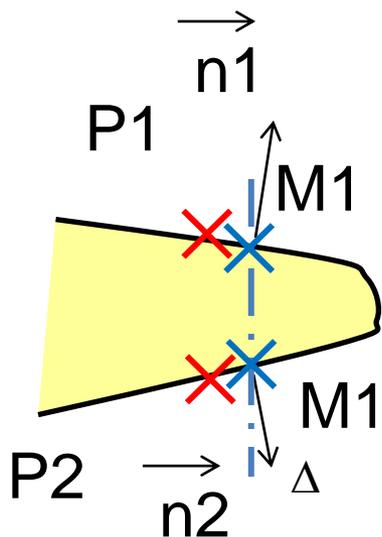
P1 est un point mesuré au voisinage de la droite.

$\vec{n1}$ est la normale à la surface nominale au point d'intersection droite/surface nominale.

Calcul de l'intersection M1, du plan (P1, n1) avec Δ

Calcul de l'intersection M2 du plan (P2, n2) avec Δ

$D = \text{DistanceM1, M2}$



Acceptable en mesure sans contact

PLAN



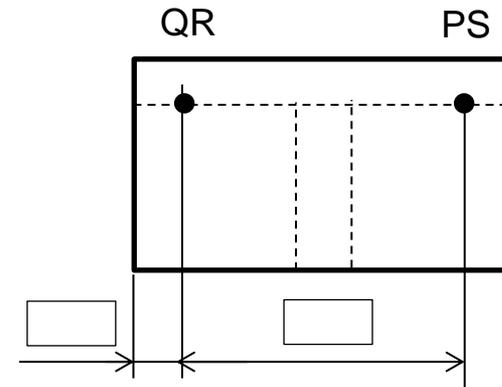
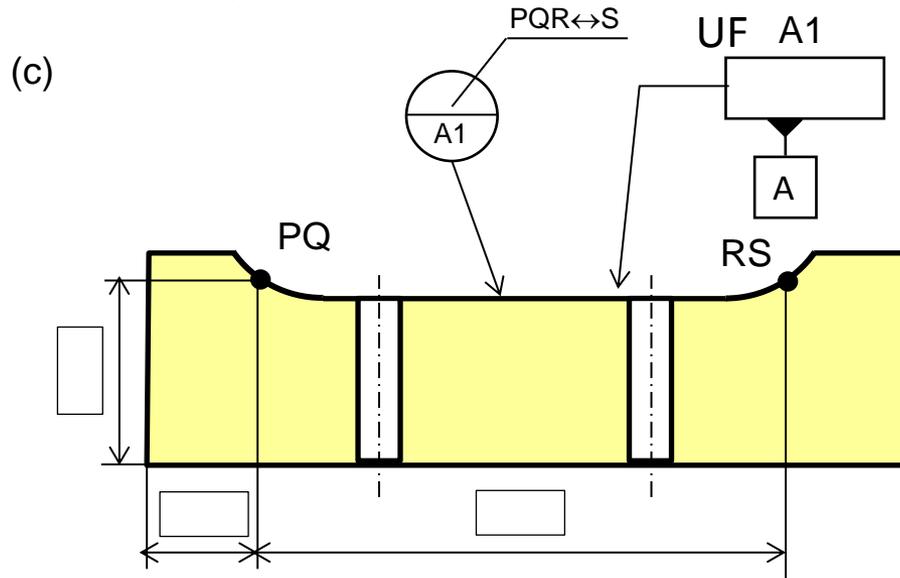
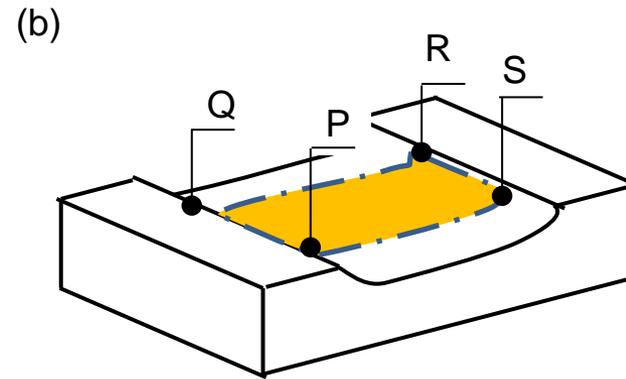
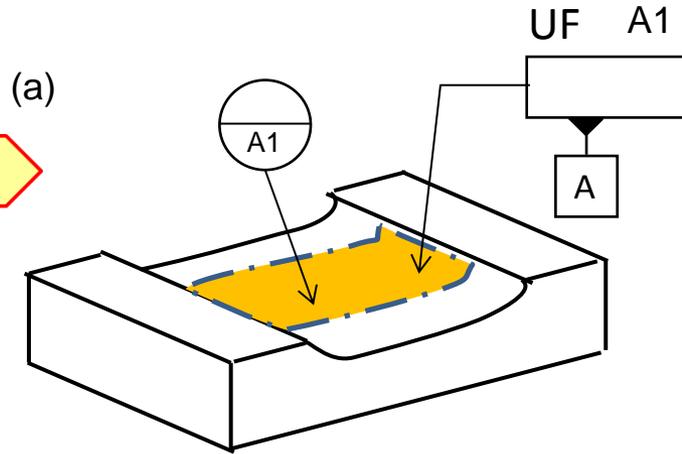
1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins

ZONE PARTIELLE

En ISO, une zone partielle ne peut pas couvrir des surfaces différentes (chaque surface a son propre nom)

Zone partielle = portion d'une surface

La zone partielle est définie dans la CAO. Seuls les points de la surface réelle qui sont projetés à l'intérieur de la zone partielle selon la normale à la surface nominale sont à prendre en compte.



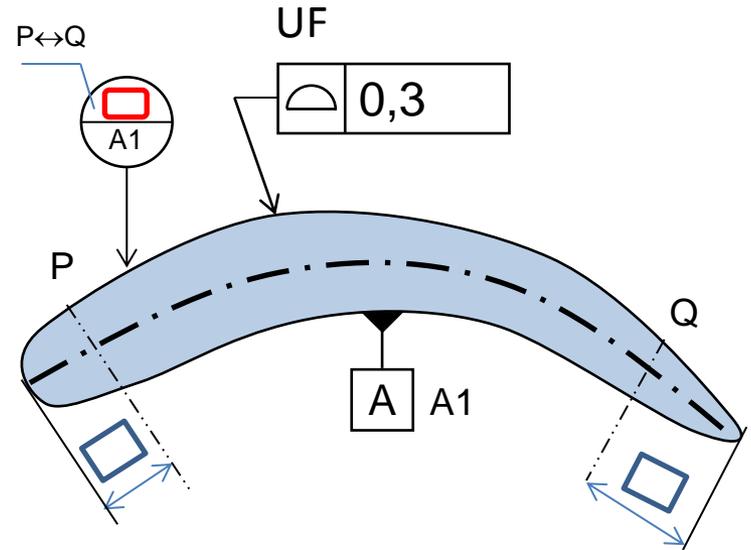
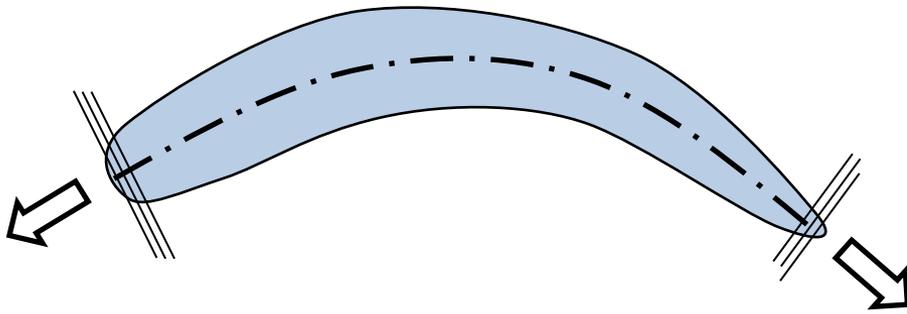
ZONE PARTIELLE LIMITEE PAR LA FACE

New

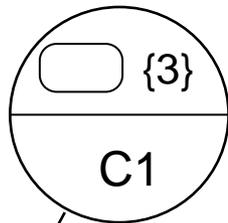


Zone partielle définie par rapport à la face réelle. Le modèle nominal est associé à la surface réelle et à son contour (pas au système de référence)

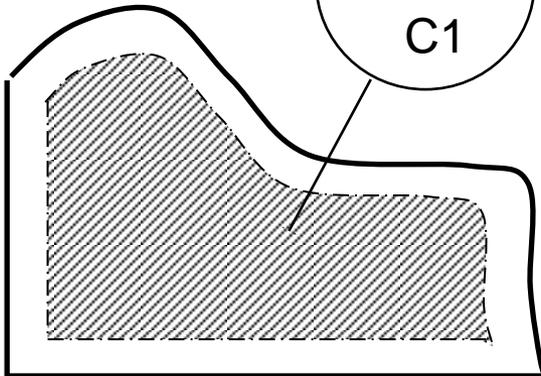
La pièce a une "longueur" variable



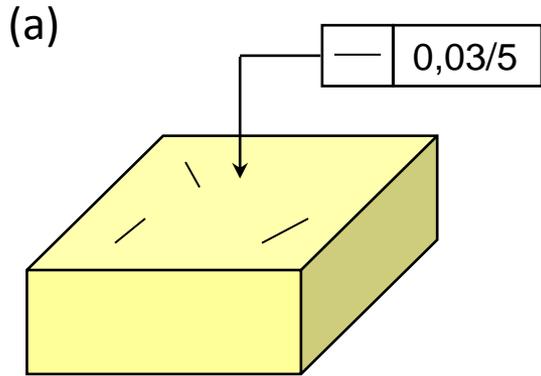
Surface plane



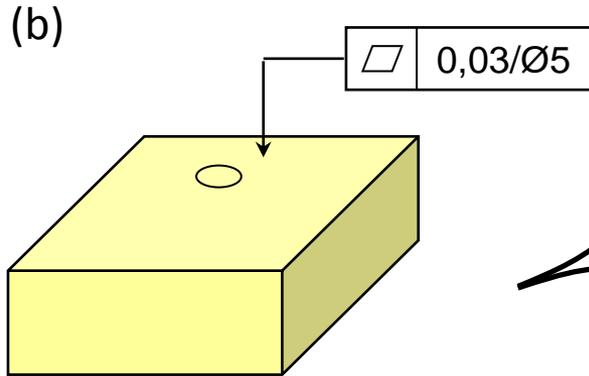
Offset 3mm par rapport au contour de la face



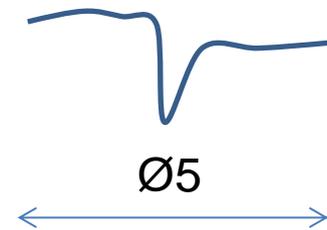
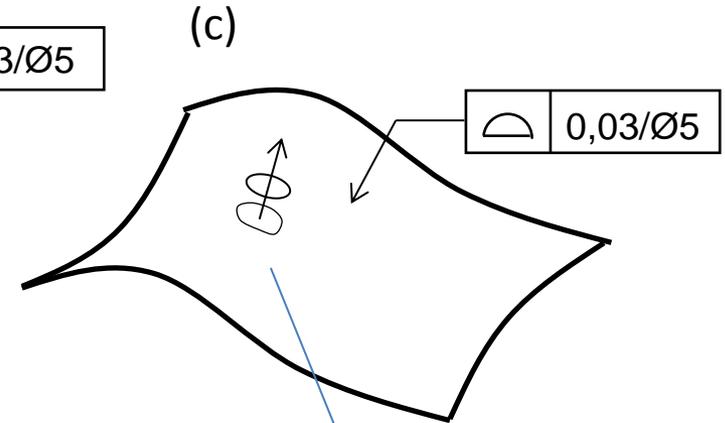
SPECIFICATIONS DE FORME LOCALE D'UNE SURFACE



Sur toutes les lignes
dans toutes les
directions



Sur toutes les zones
partielles Ø5



Ex : Trace d'outil

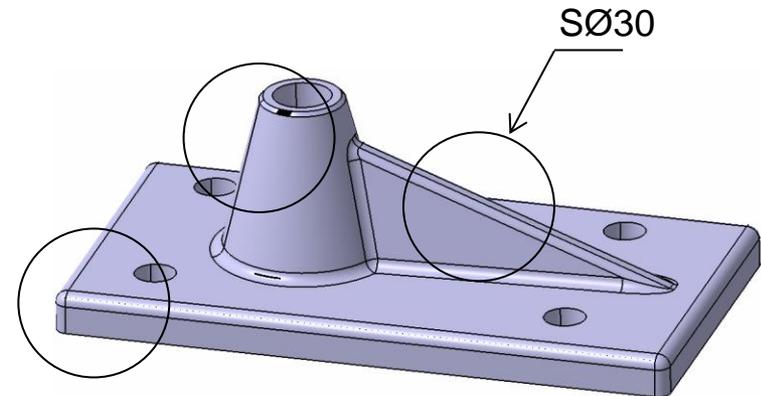
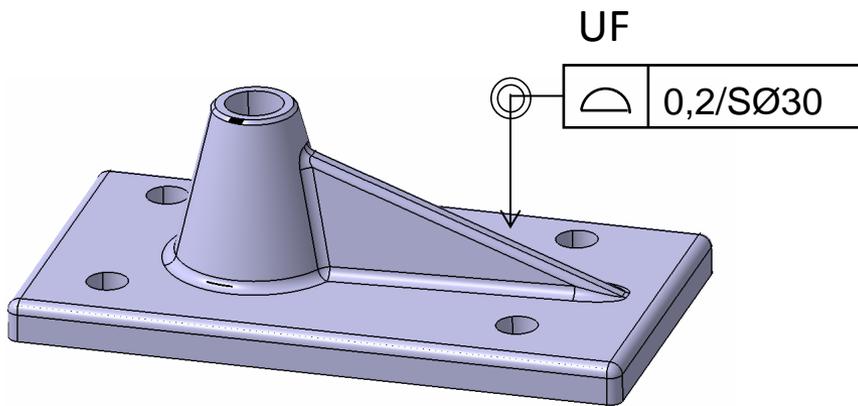
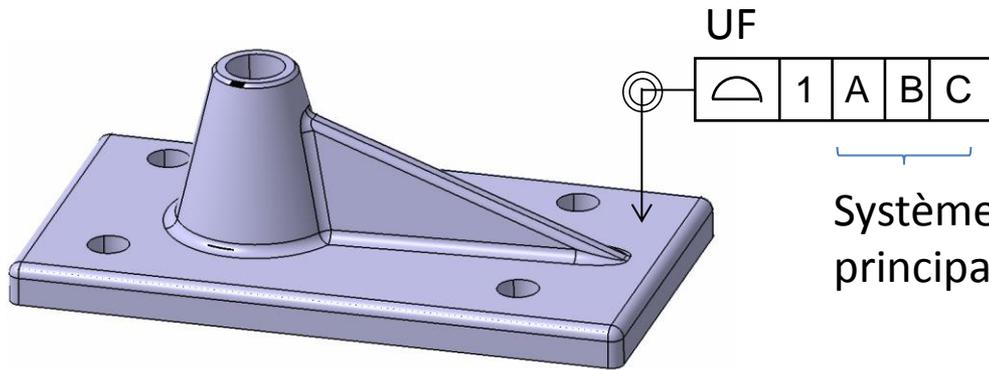
*Projection du contour sur la surface
(Ø5 = ensemble de points contenus dans un cylindre
d'axe perpendiculaire à la surface nominale)*

La pièce ne peut pas être contrôlée en tous les points, mais elle peut être refusée si elle a un défaut sur une zone locale.

/xx Possible pour toutes les spécifications

TOLERANCEMENT GENERAL

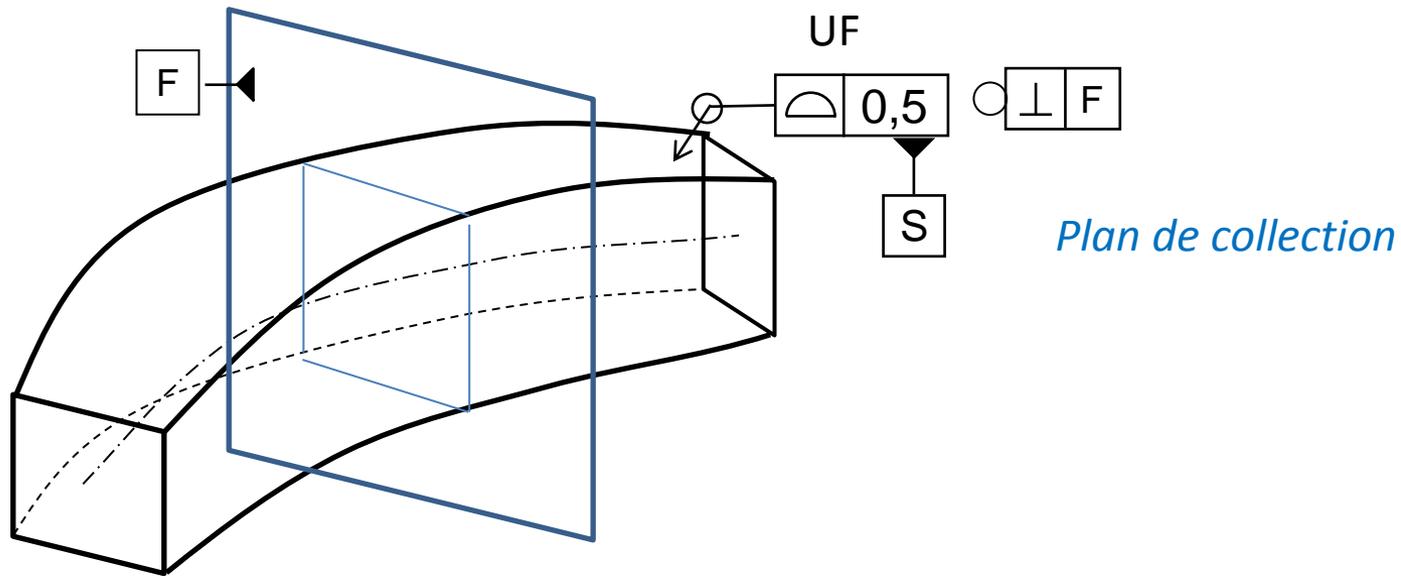
- Bientôt en ISO : Sur toutes les surfaces (par défaut surfaces indépendantes)



(remplace la norme 2768 de tolérancement général)

TOUT AUTOUR

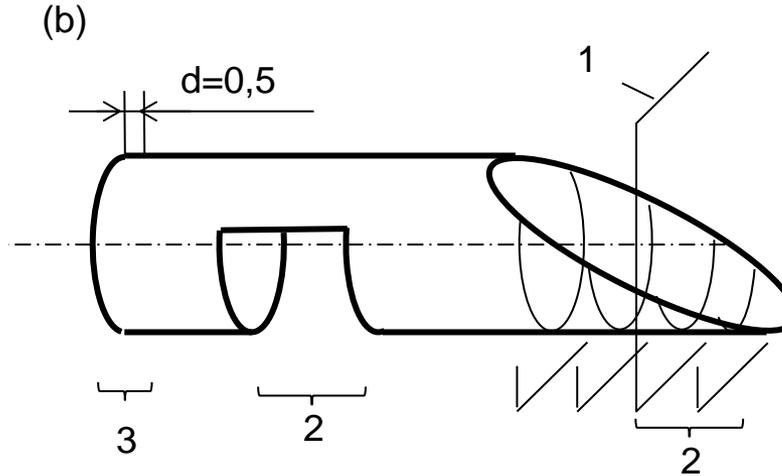
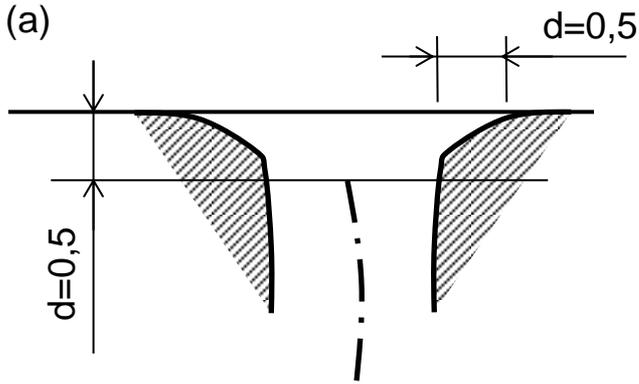
Les surfaces spécifiées sont les surfaces du contour présentes dans le plan de collection



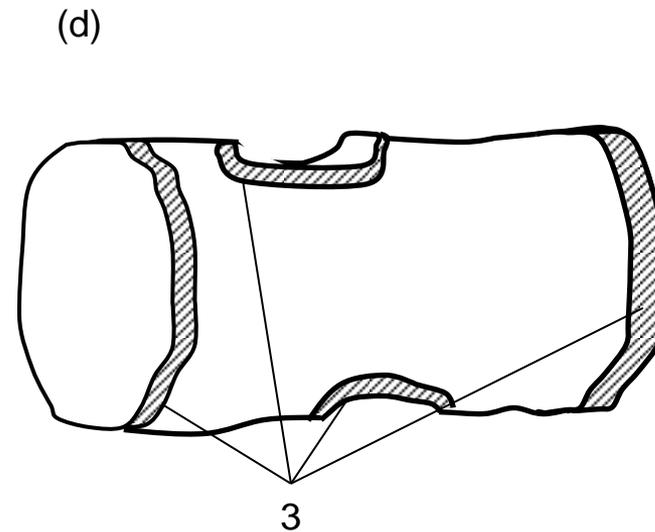
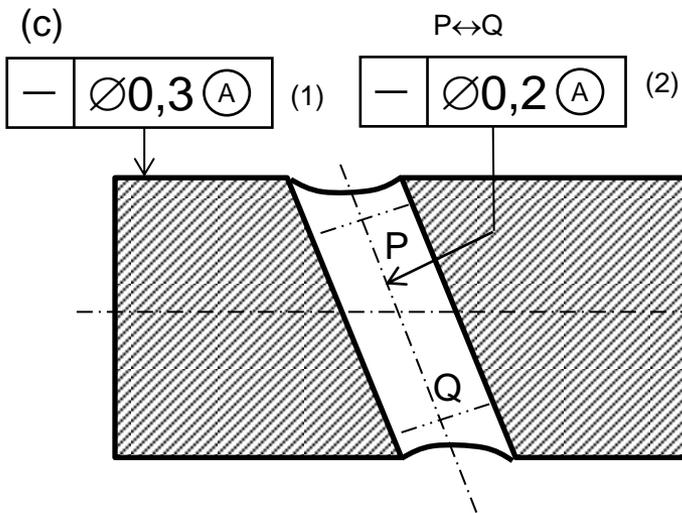
LIMITE DES ZONES

New

Par défaut, la pièce est ébavurée, la surface s'arrête à 0,5 mm des bords (sinon définir une zone partielle) et spécification d'arête (bavure, cassage d'angle)



1 : plan limite correspondant à 180°
2 : plages dans lesquelles l'axe réel n'est pas défini
3 : zones exclues de l'association

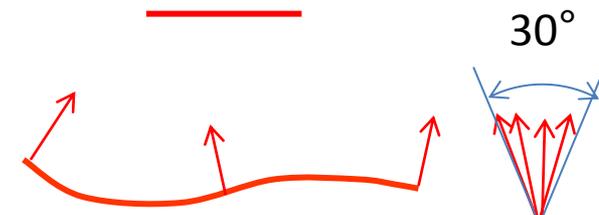
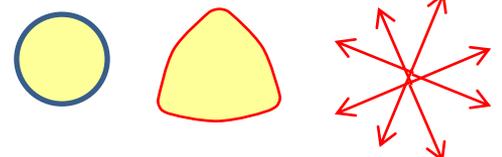


PLAN

1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins



CRITERE D'ASSOCIATION

<p>Plan</p>  <p>Surface tendue</p>  <p>Les normales sont contenues dans un cône d'angle 30°</p>	<p>Critère d'association Minimax (*) Chebychev tangent extérieure matière [CO] pour minimiser la distance maxi.</p> 
<p>Surface fermée</p>  <p>Surface bilatérale</p>  <p>Surface gauche</p>  <p>Surface creuse (fond ~ plat)</p> 	<p>Critère d'association des moindres carrés [G].</p> 

(*) En projet ISO : [GO] surface nominale tangente extérieure matière minimisant $\sum e_i^2$
 À ne pas confondre avec [G+] surface nominale minimisant $\sum e_i^2$ translaturée pour être tangente.

MOINDRES CARRÉS

Le critère suppose une surface continue

$$S = \int di^2 \cdot ds$$

(Les trous ne sont pas bouchés)

La mesure réelle impose inévitablement un nombre limité de points. La méthode considère que tous les points au voisinage d'un point palpé auront le même écart à la surface associée.

Moindres carrés pondérés

New

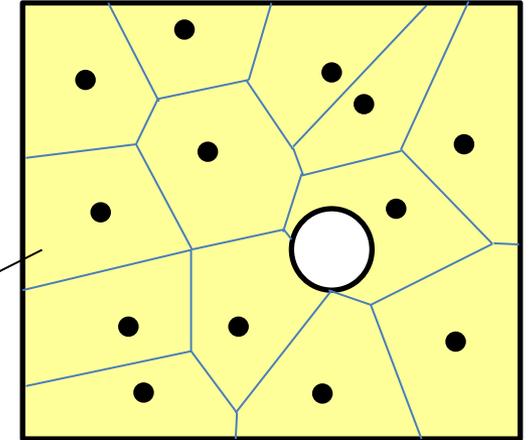
$$\sum s_i \cdot (\xi_i \cdot y_i) + w \cdot \sum s_i \cdot y_i + \alpha \cdot \sum s_i \cdot y_i^2 - \beta \cdot \sum (s_i \cdot x_i \cdot y_i) = 0$$

$$\sum s_i \cdot (\xi_i \cdot x_i) + w \cdot \sum s_i \cdot x_i + \alpha \cdot \sum (s_i \cdot x_i \cdot y_i) - \beta \cdot \sum s_i \cdot x_i^2 = 0$$

$$\sum s_i \cdot (\xi_i) + w \cdot \sum s_i + \alpha \cdot \sum s_i \cdot y_i - \beta \cdot \sum s_i \cdot x_i = 0$$

↑ Aire de la facette autour du point

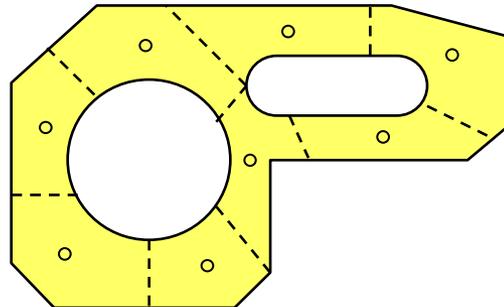
Aire s_i



Facettes sur la peau de la pièce, limitée par les plans médians des paires de points.

Pour éviter le calcul de la pondération, il faut une répartition uniforme des points ($s_i = \text{cte}$)

Diviser la face en N facettes d'aires identiques.
Palper un point au centre de chaque facette.



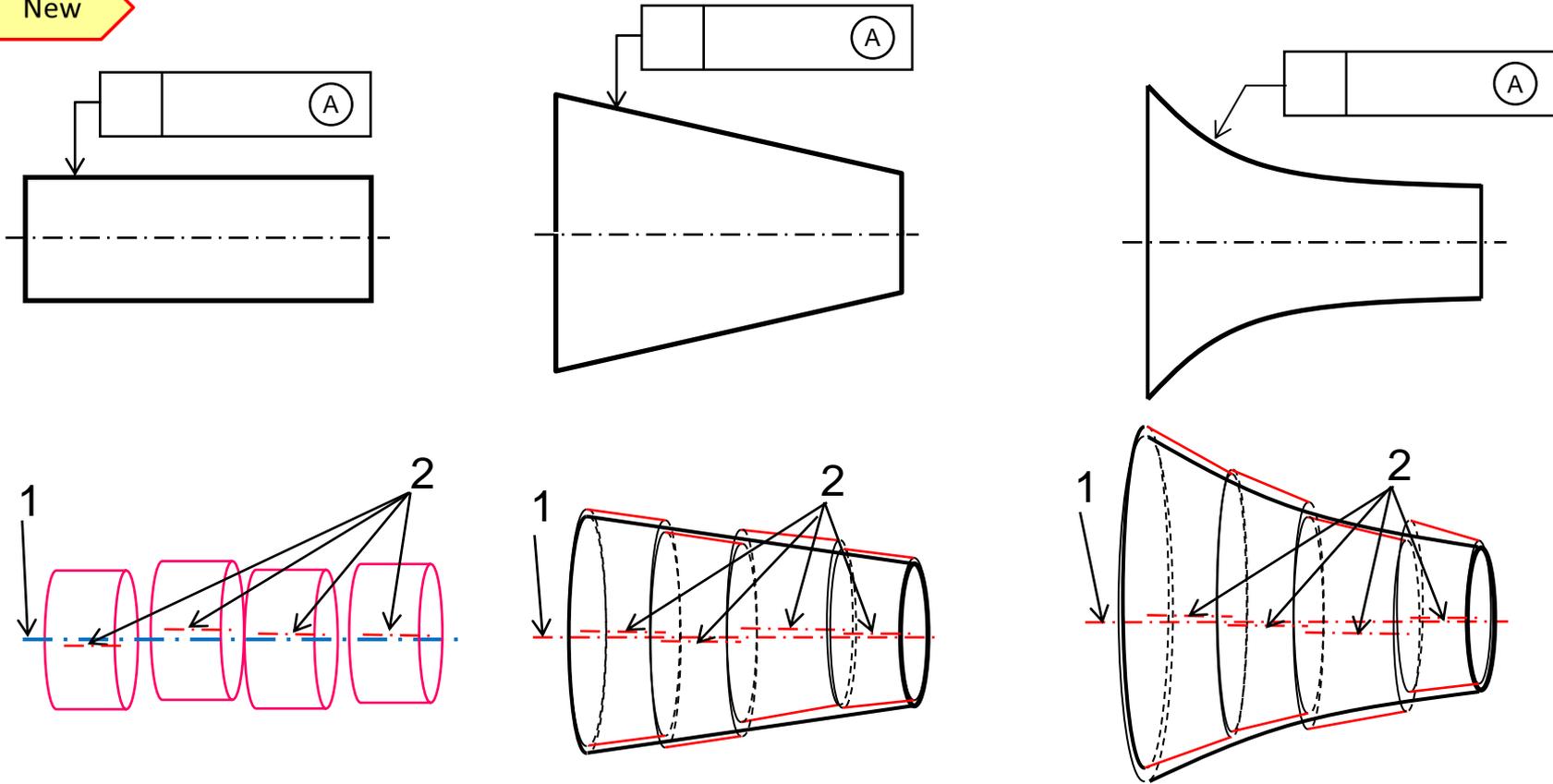
PLAN

1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins



AXE D'UNE SURFACE DE REVOLUTION

New

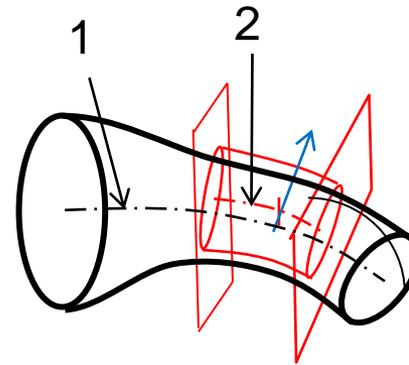
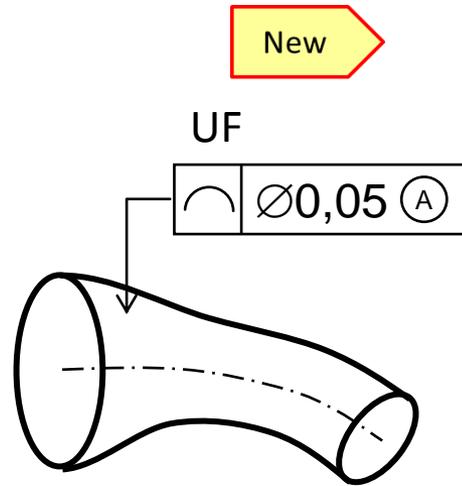


Etape 1 : la surface nominale est associée à l'ensemble de la surface réelle avec 6 ddl
=> axe nominal

Etape 2 : la surface nominale est associée aux points du tronçon en laissant uniquement la mobilité dans le plan perpendiculaire à l'axe nominal.

AXE D'UNE SURFACE avec section "circulaire"

Limite ISO



1 : axe nominal de la surface

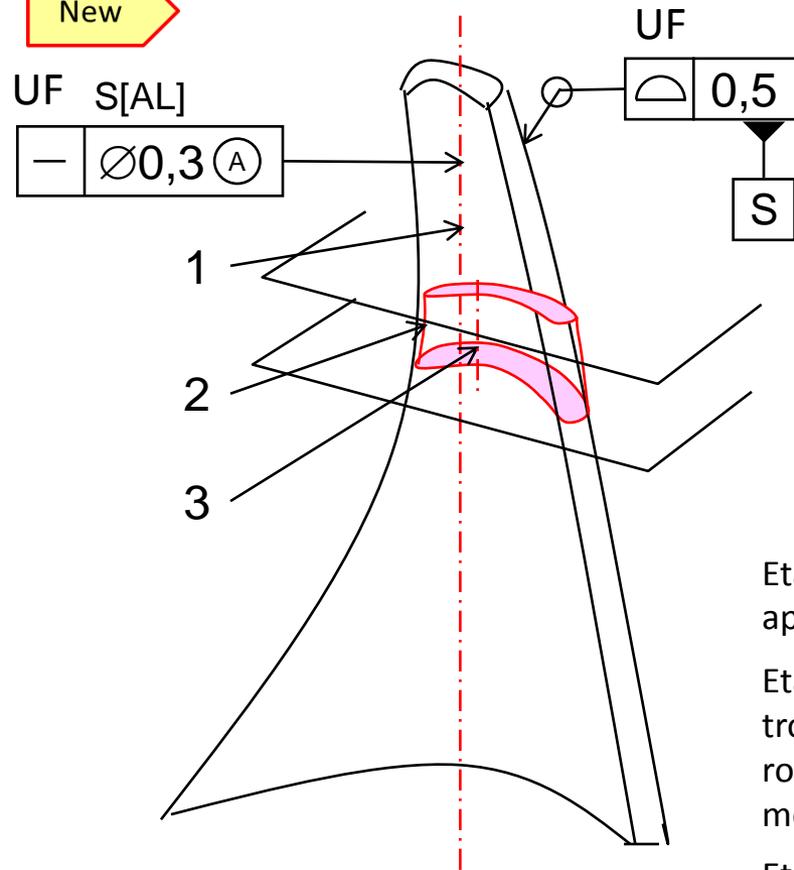
2 : axe du tronçon

AXE RECTILIGNE D'UNE SURFACE COMPLEXE

Le modèle nominal doit comporter un axe associé à la surface S identifié par un commentaire "S[AL]" (Axe Linéique) de S

L'élément tolérancé est l'axe réel défini par le lieu des axes des tronçons.

New



Remarque : ce concept n'a de sens que pour une surface "allongée"

Désignation de l'axe : $\xrightarrow{S[AL]}$

- 1 : Axe nominal de la surface complète
- 2 : Tronçon décalé dans le plan de la section
- 3 : Axe du tronçon

Etape 1 : détermination de la surface associée complète => axe approché.

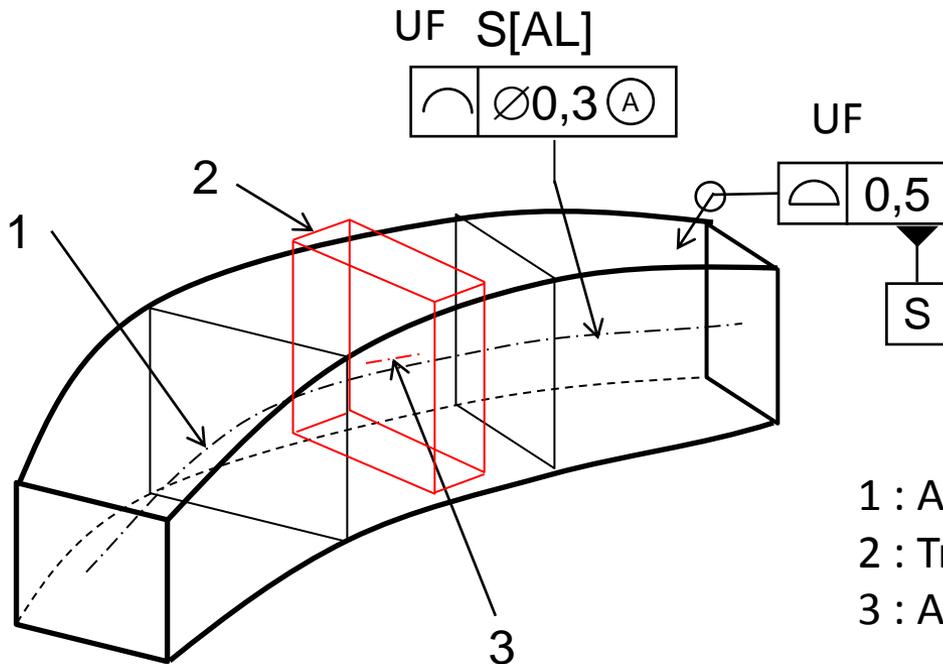
Etape 2 : la surface nominale est associée aux points de chaque tronçon perpendiculaire à l'axe approché, par 2 translations et une rotation dans le plan perpendiculaire à l'axe avec le critère des moindres carrés.

Etape 3 : l'axe réel est l'ensemble des axes des tronçons entre les plans limites des tronçons

Etape 4 : l'axe réel doit être dans la zone de tolérance de rectitude.

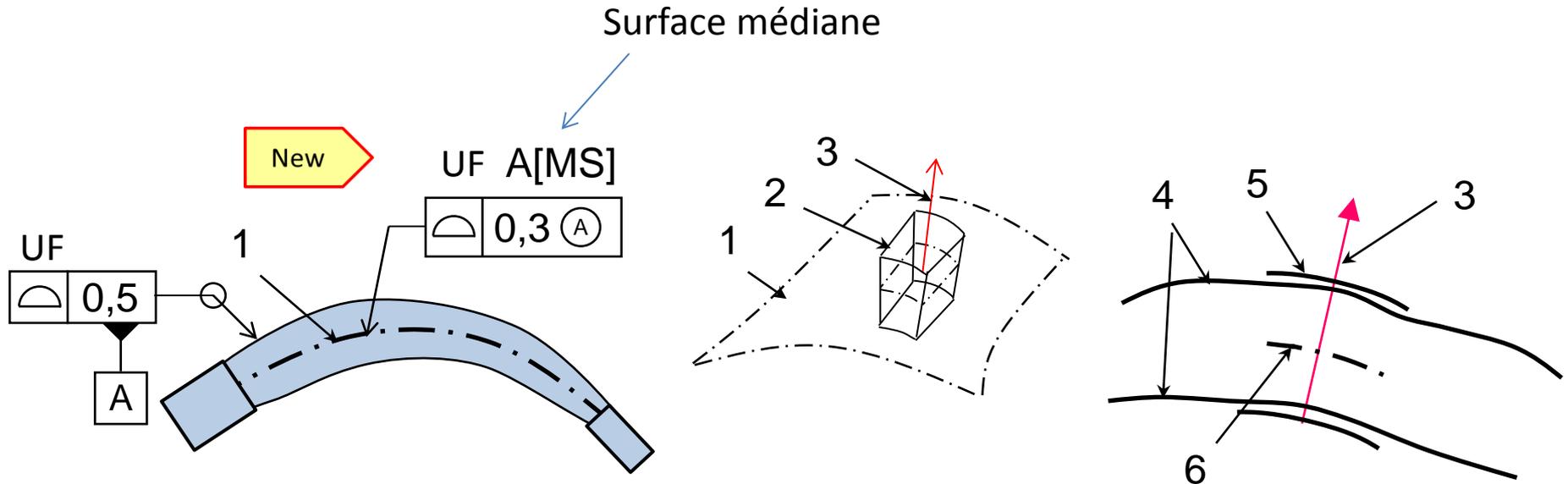
AXE COURBE D'UNE SURFACE COMPLEXE

New



- 1 : Axe nominal de la surface complète
- 2 : Tronçon décalé dans le plan de la section
- 3 : Axe réel du tronçon

SURFACE MEDIANE DE SURFACES SYMETRIQUES



- 1 : Surface médiane nominale de la surface complète
- 2 : Tronçon défini sur la surface médiane nominale
- 3 : Direction d'optimisation
- 4 : Surfaces réelles
- 5 : Tronçon décalé dans le plan de la section
- 6 : Surface médiane du tronçon

PLAN

1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins



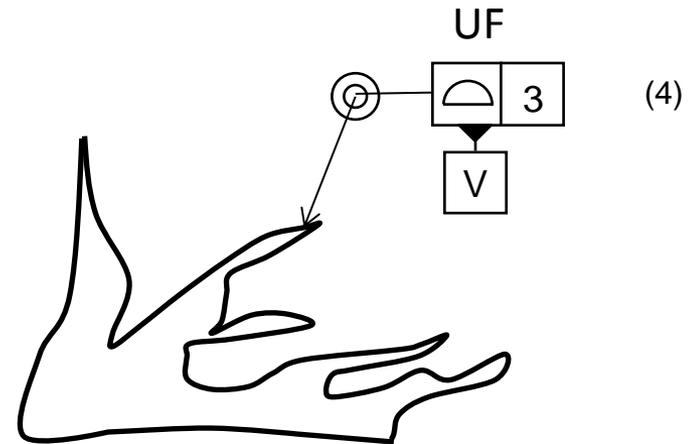
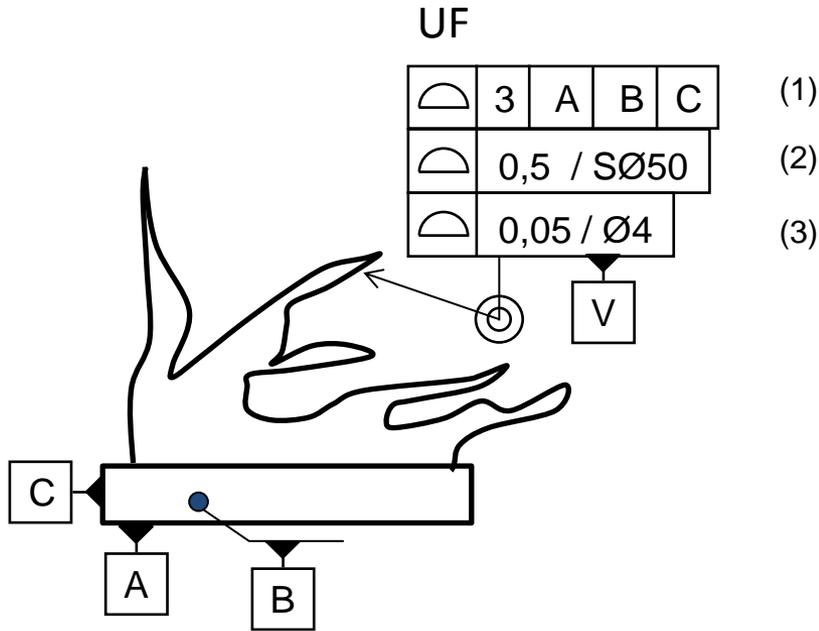
SPECIFICATION GENERALE DES SURFACES COMPLEXES

La surface nominale est connue sous forme numérique (points et normales)

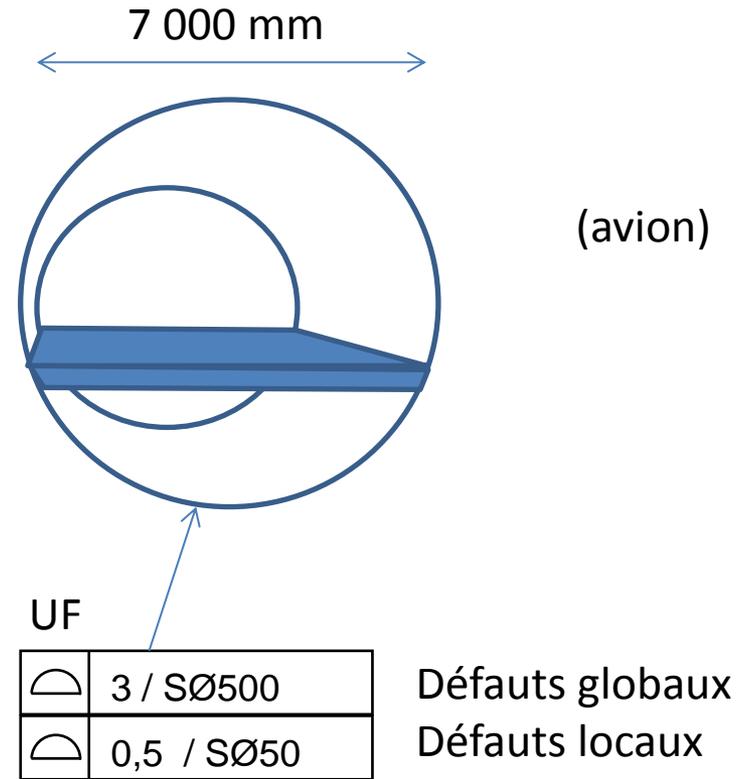
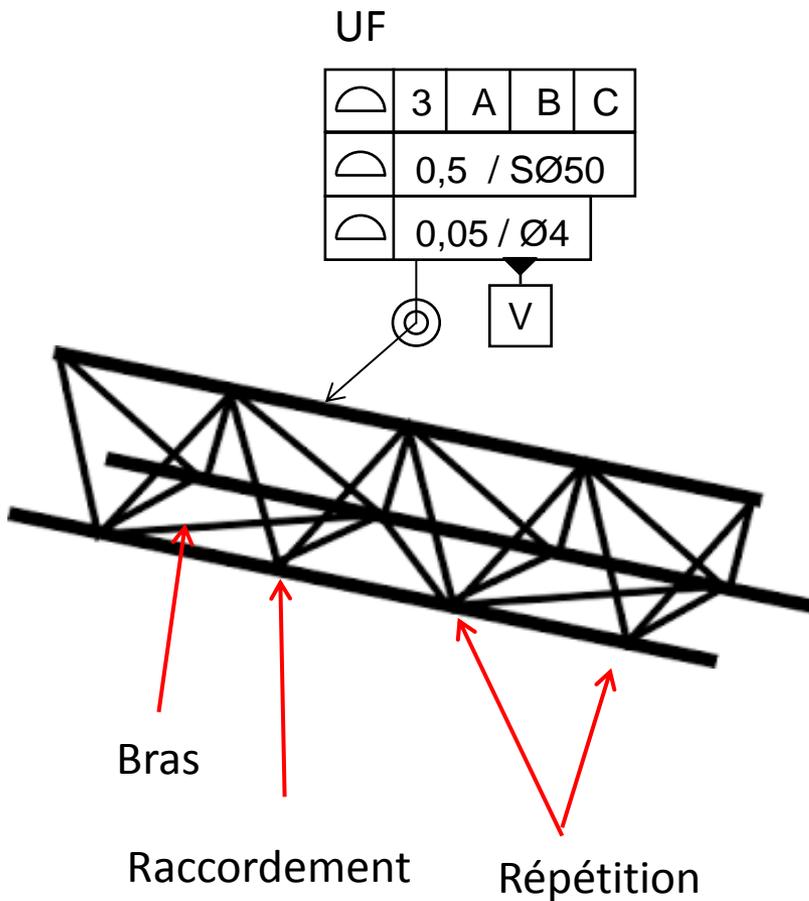
(a) Avec référence

(b) Sans référence

Sur toutes les surfaces sauf le socle



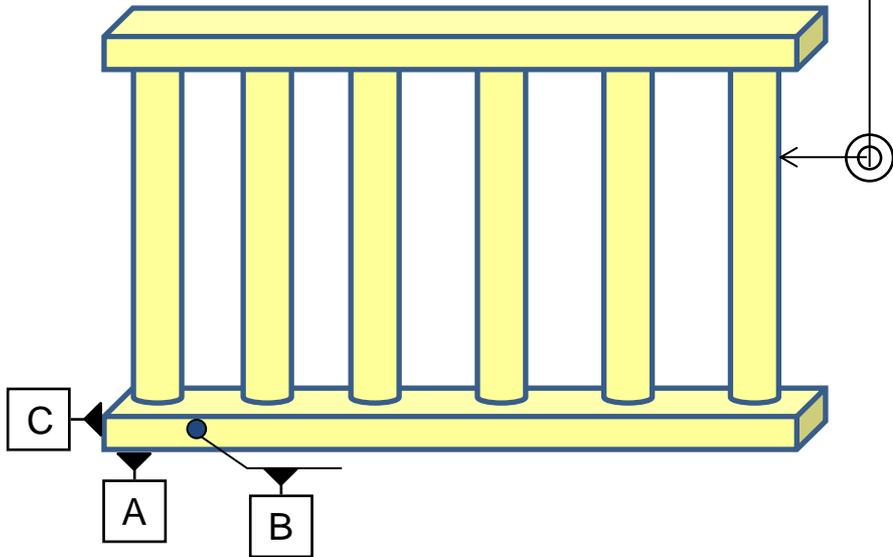
SPECIFICATION MULTI ECHELLES DES GRANDES STRUCTURES



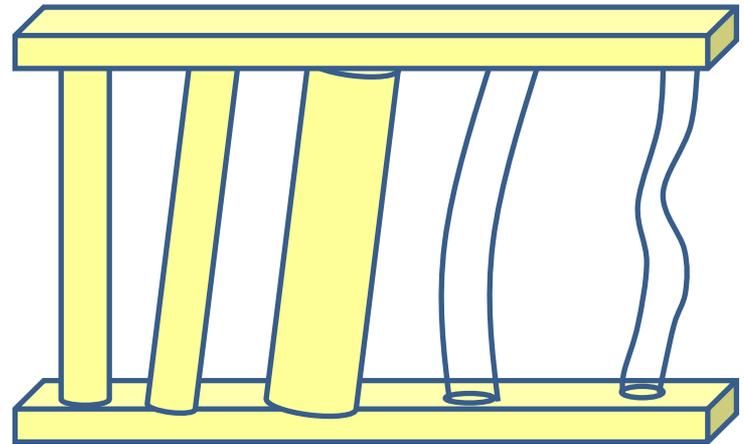
MULTI ECHELLES

UF

	1	A	B	C
---	---	---	---	---



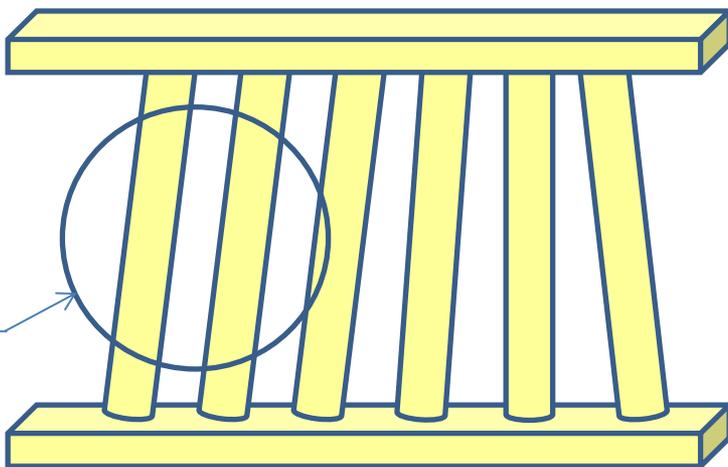
Tolérance "large"



"Forme et position relative"

UF

	0,2 / SØ5
---	-----------



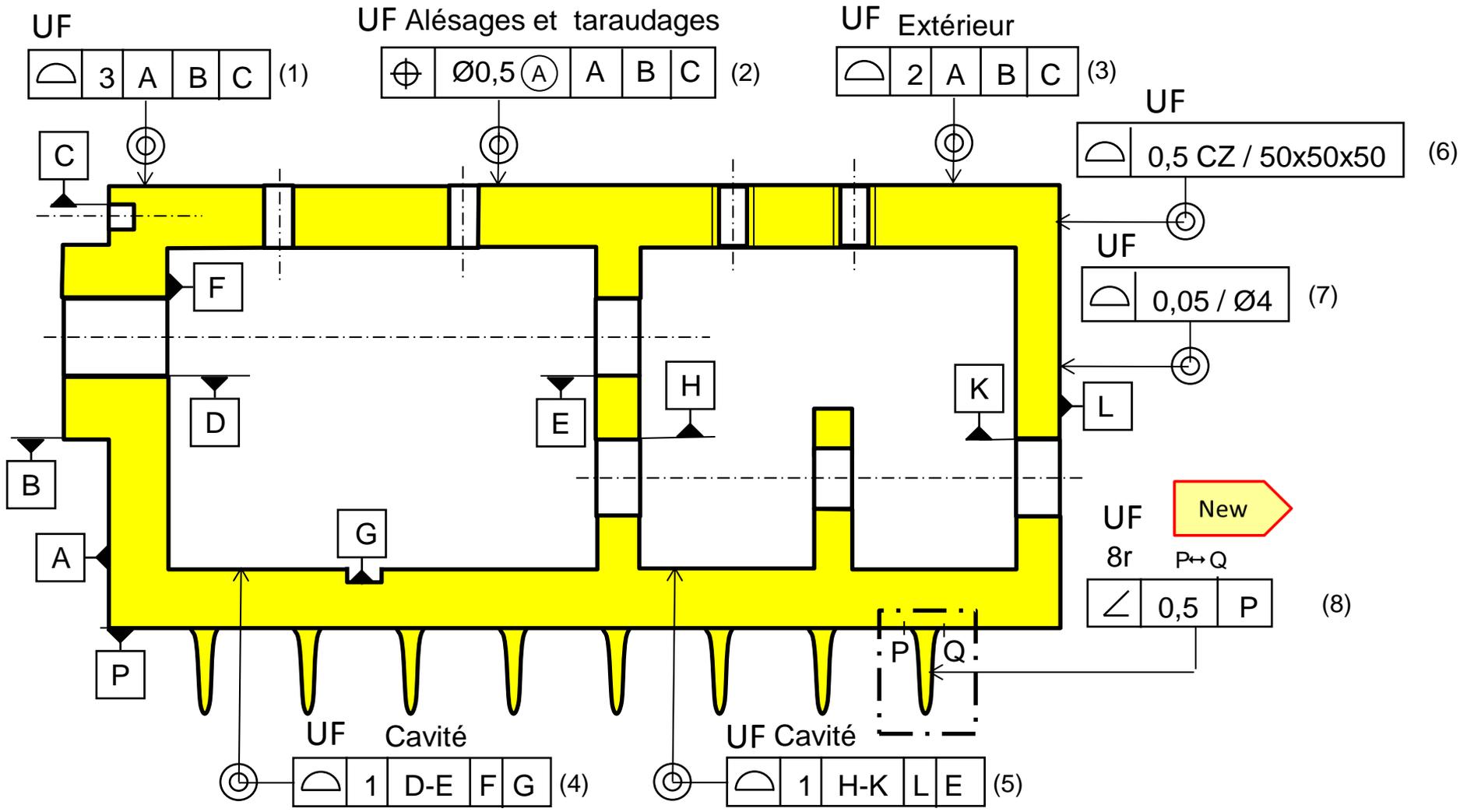
"Forme et position relative, avec
contrainte d'orientation"

UF



	0,5 >< / SØ5	A
---	--------------	---

TOLERANCEMENT GENERAL



PROBLEME DE DESIGNATION DES SURFACES

New

(a)

UF Toutes les surfaces en bleu

	0,8	A	B	C
---	-----	---	---	---



(b)

UF

	0,8	A	B	C
	2	A	B	C

Sur toutes les surfaces usinées

Sur toutes les surfaces non usinées

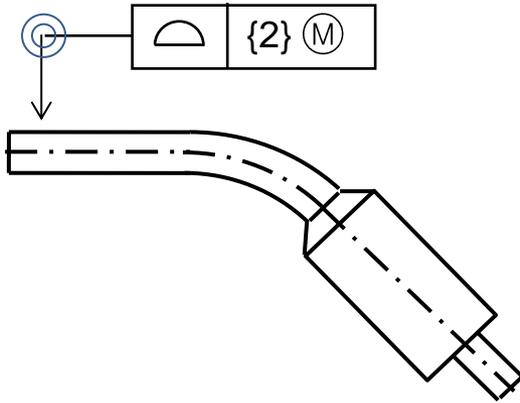


MAXIMUM ET MINIMUM DE MATIERE

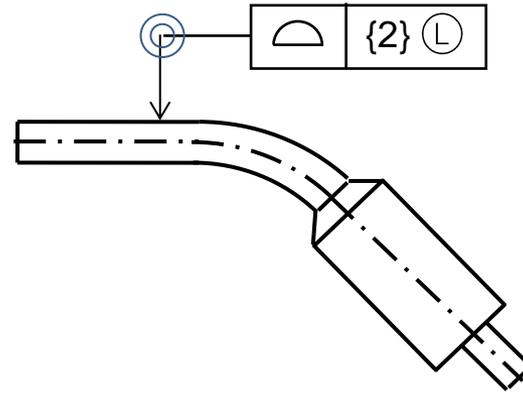
(M)(L) => CZ implicite !

New

Volume englobant

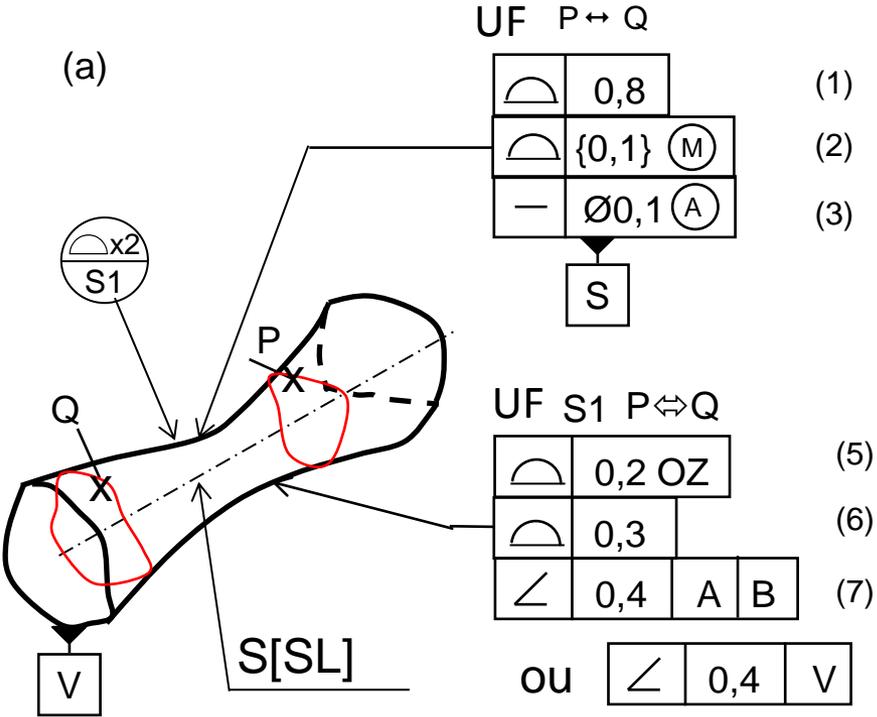


RDM

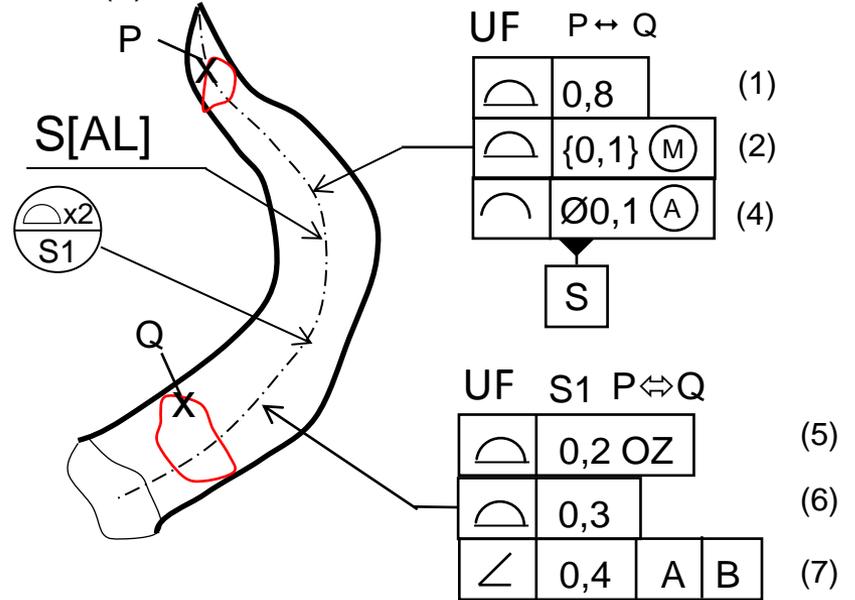


SPECIFICATION D'UN BRAS

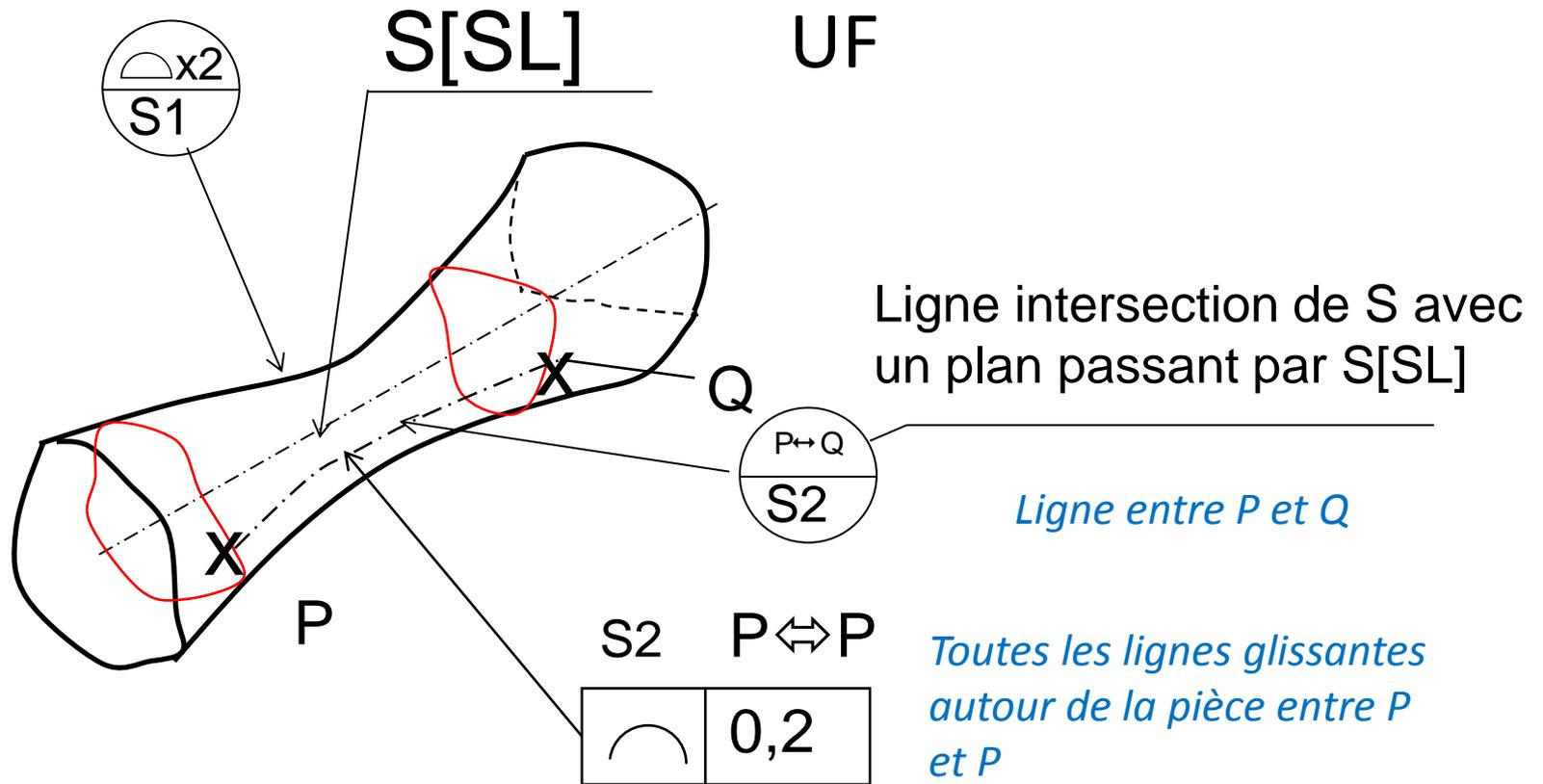
(a)



(b)



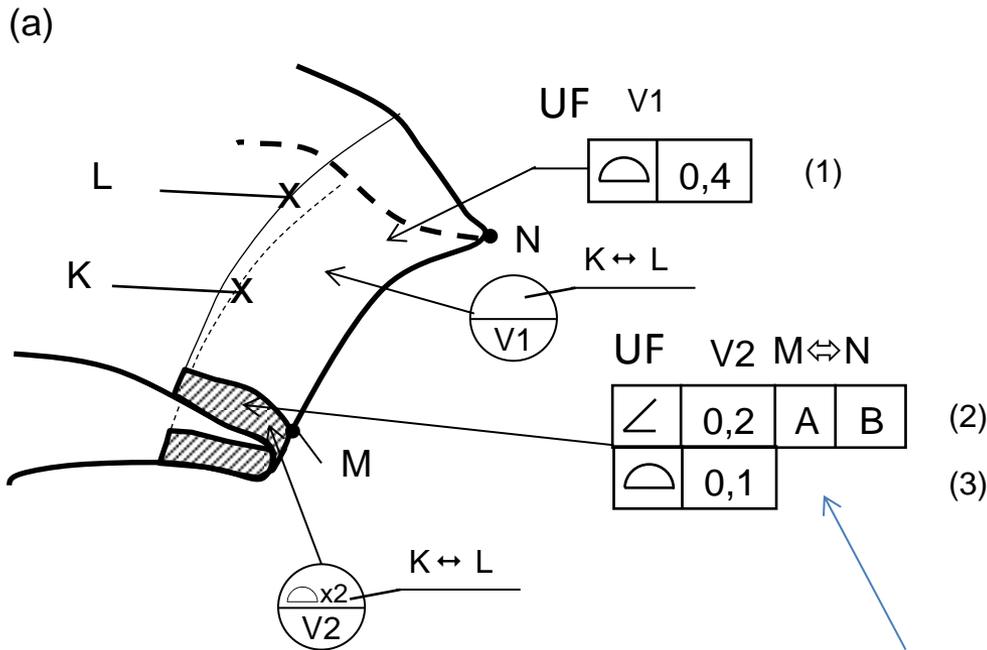
SPECIFICATION D'UNE BANDE SUR UN BRAS



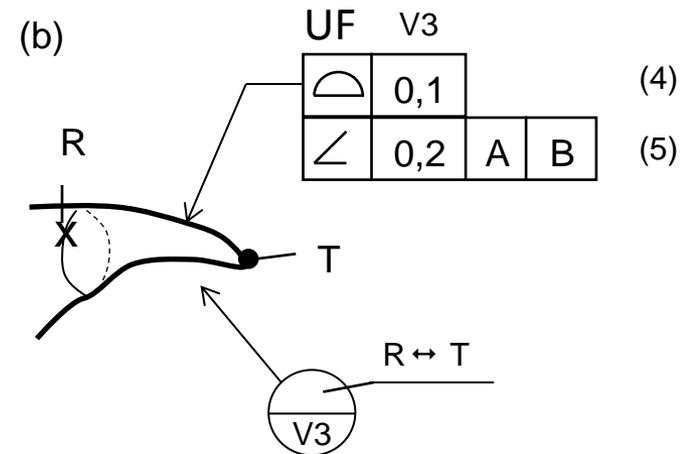
SPECIFICATION D'UN BORD OU D'UNE EXTREMITÉ

Spécification des surfaces au voisinage d'un bord ou d'une extrémité en forme, en orientation et éventuellement en position.

Sur toute la zone partielle V1



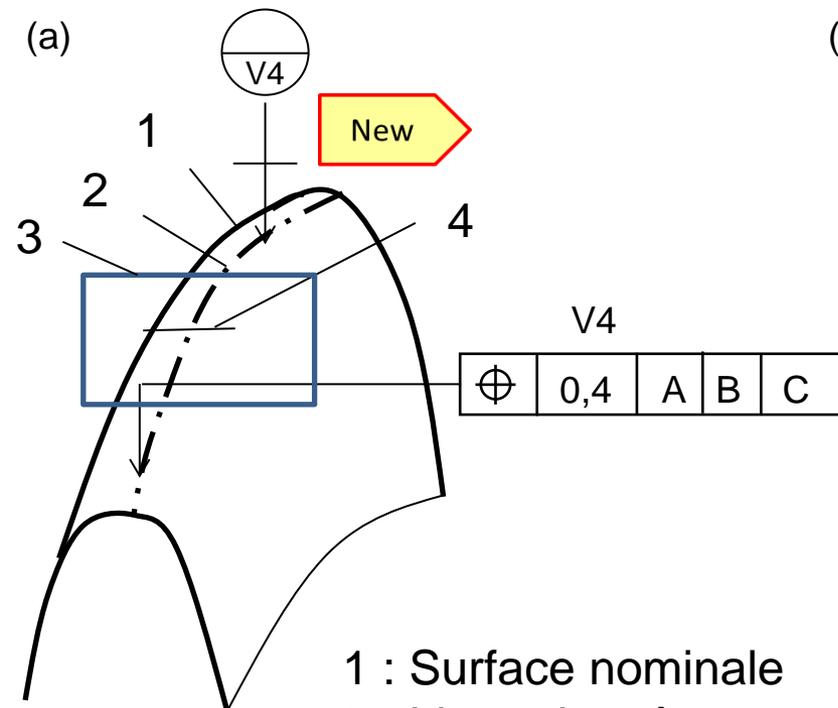
Sur un tronçon glissant de largeur 2 mm entre M et N



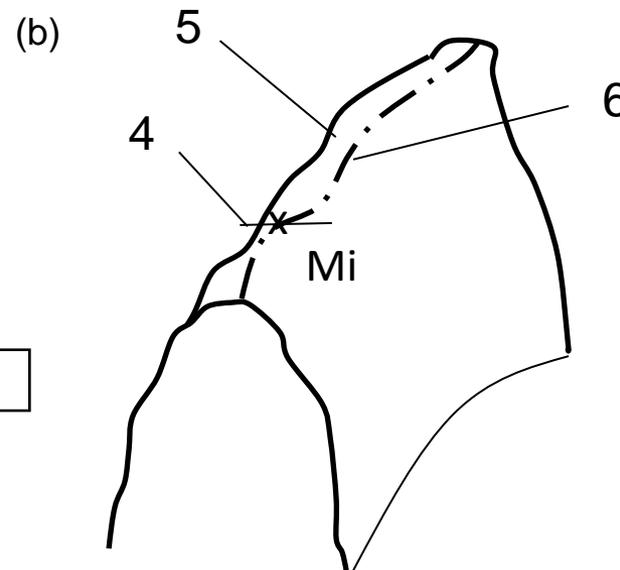
SPECIFICATION D'UNE LIGNE DE CRETE

La ligne de crête est définie dans le nominal. En chaque point de la ligne de crête, on a la normale à la surface, ce qui définit la zone de tolérance et la tangente à la crête et dans le plan perpendiculaire à la ligne de crête.

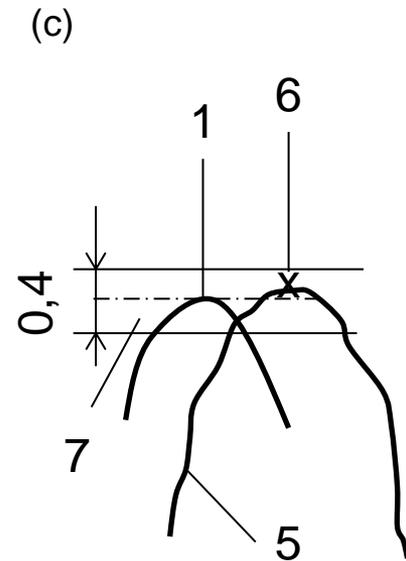
Dans ce plan d'intersection, le point M_i de la surface tolérancée est le point tel que la tangente à la surface soit parallèle à la tangente à la crête.



- 1 : Surface nominale
- 2 : Ligne de crête
- 3 : Plan d'intersection
- 4 : Tangente à la crête

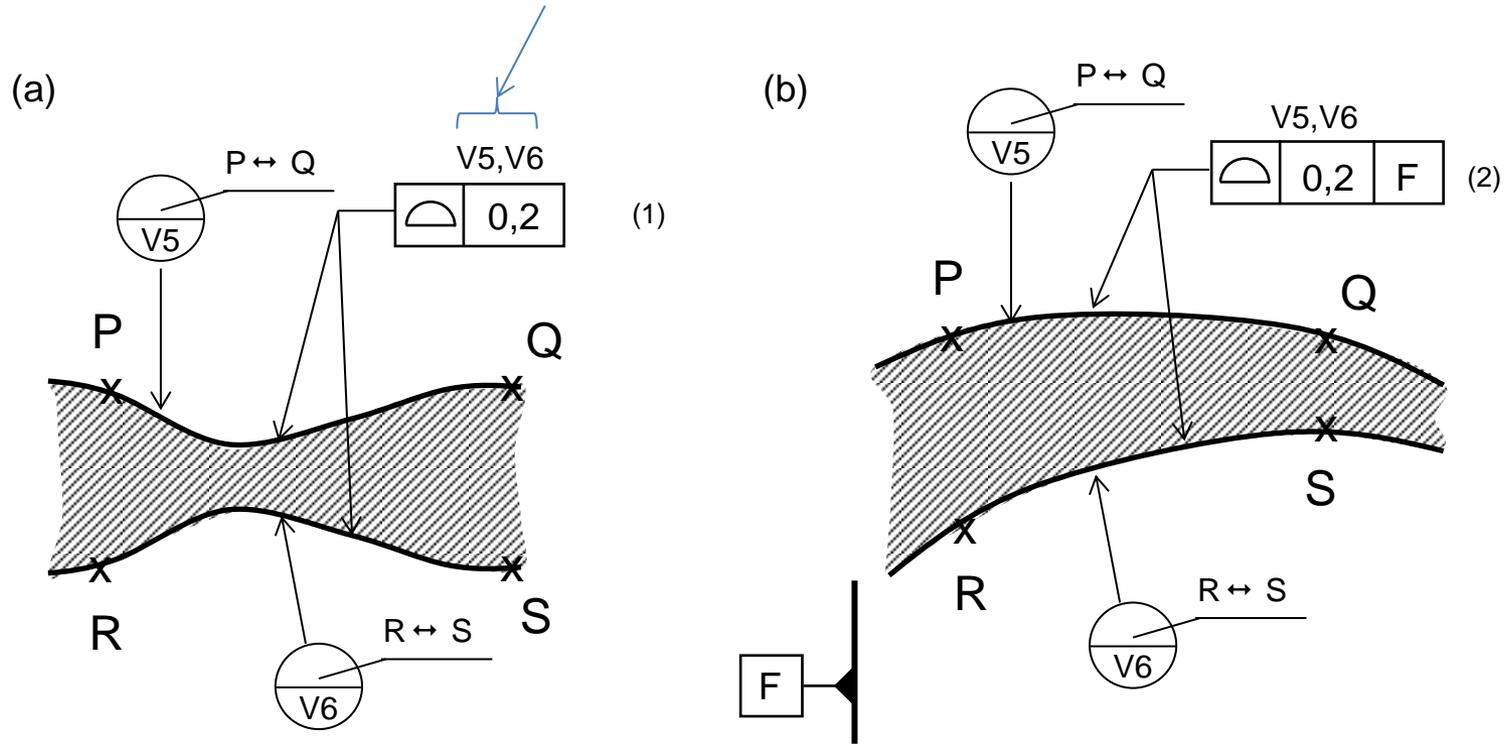


- 5 : Surface réelle
- 6 : Élément tolérancé
- 7 : Zone de tolérance

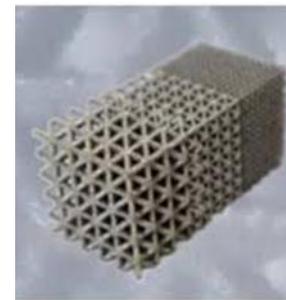


SPECIFICATION D'UNE EPAISSEUR

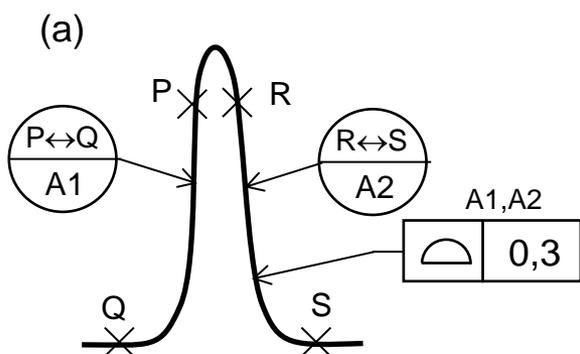
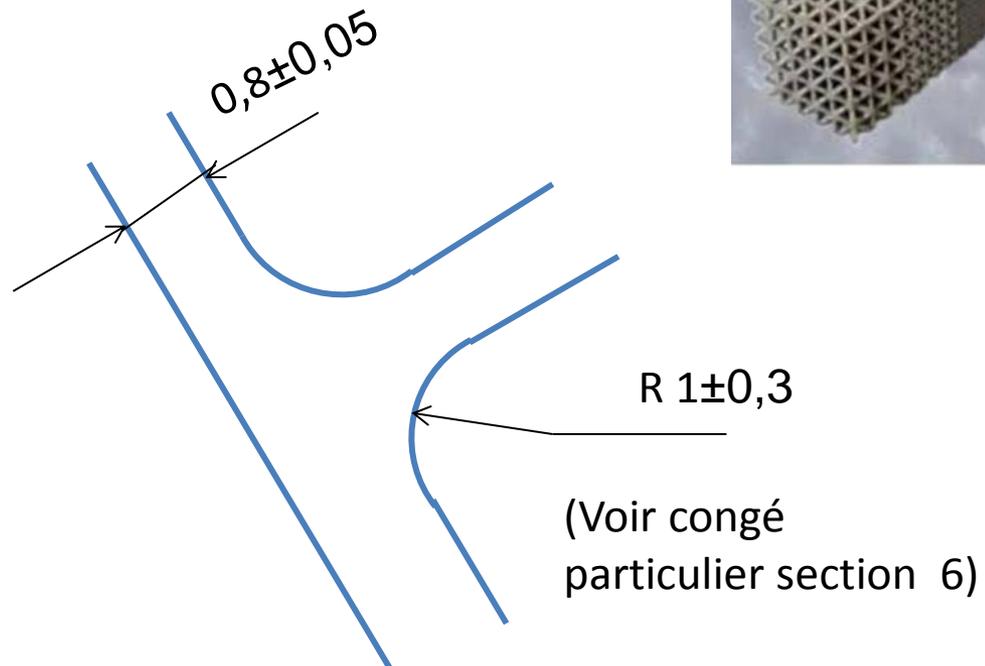
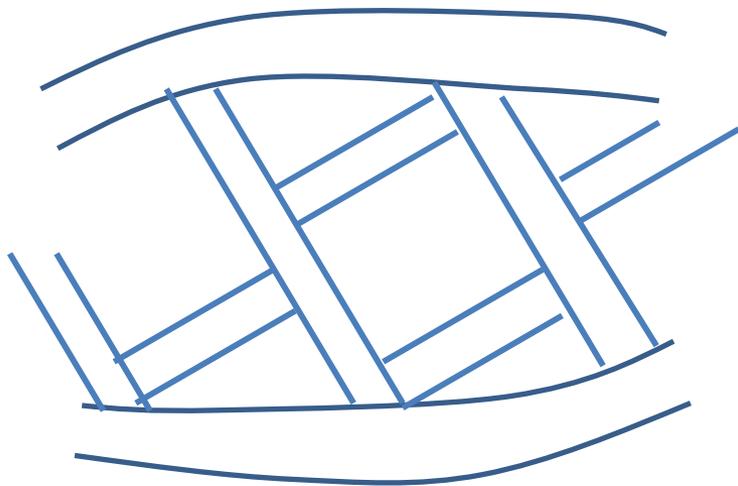
Les zones partielles formes une seule surface



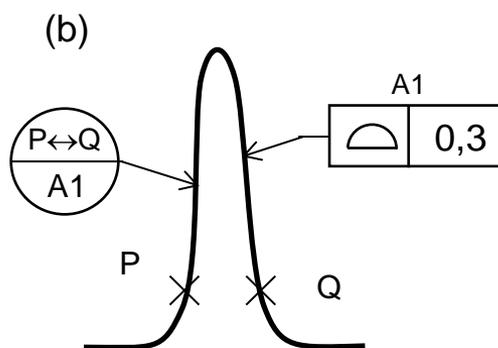
SPECIFICATION D'UN TREILLIS



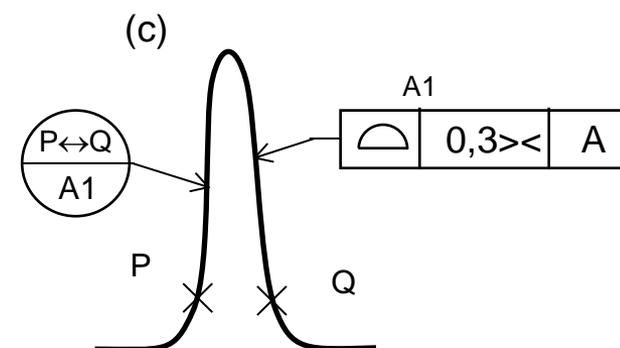
Cas simple



Epaisseur par rapport au pied



Epaisseur par rapport au sommet



orientation

PLAN

1. Zones de tolérance
2. Zones partielles
3. Références
4. Axes et surfaces médianes
5. Applications
6. Congés et chanfreins

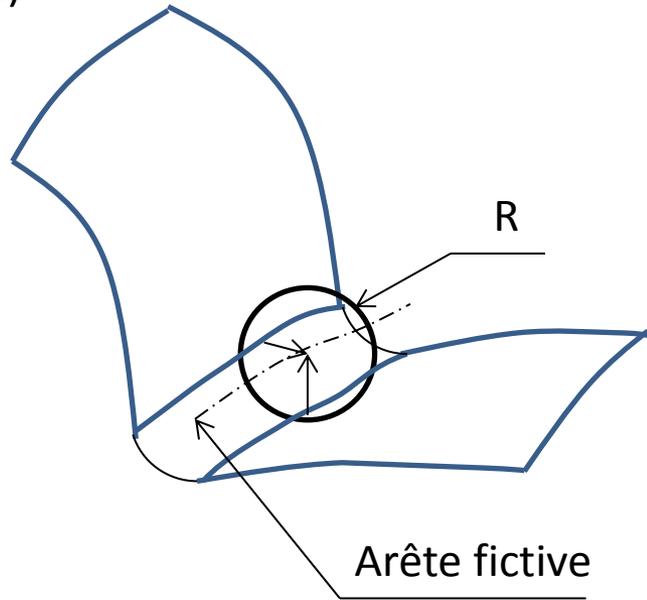


CONGE

Congé = espace balayé par une sphère bitangente aux surfaces adjacentes.

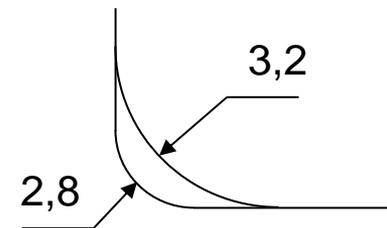
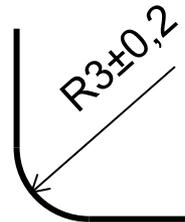
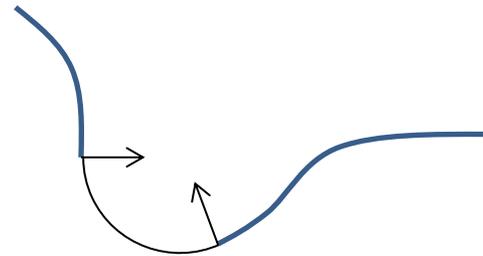
New

(a)



Vue dans le plan d'intersection

(b)



CHANFREIN

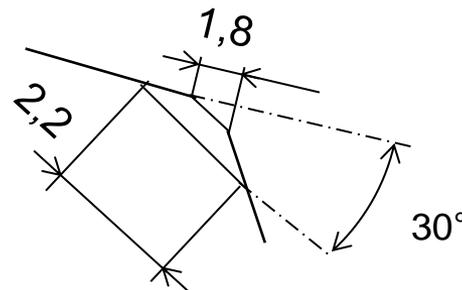
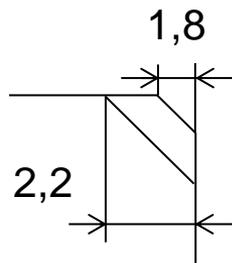
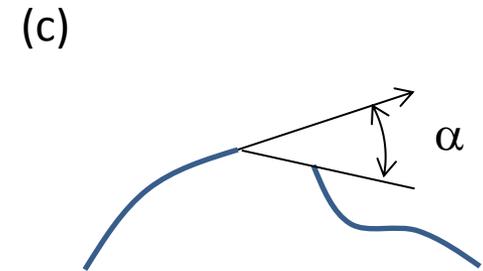
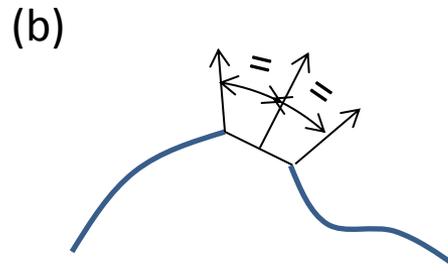
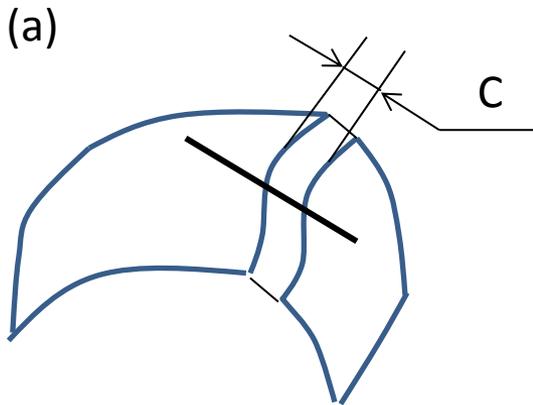
Chanfrein = espace balayé par un segment de longueur fixe.

Les normales aux points d'intersection sont concourantes.

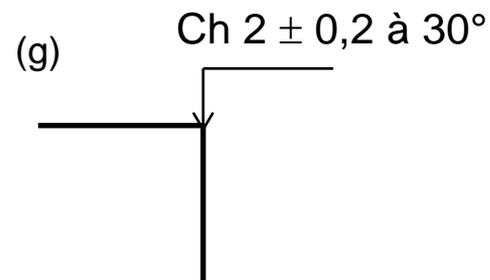
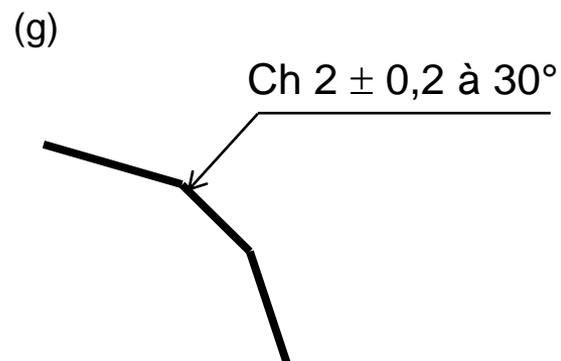
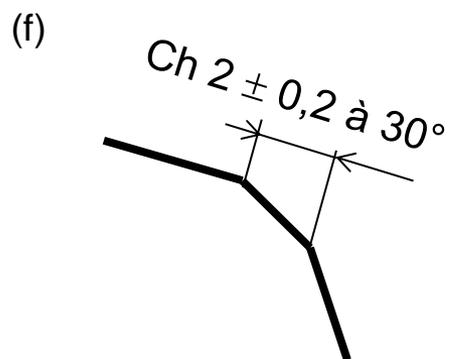
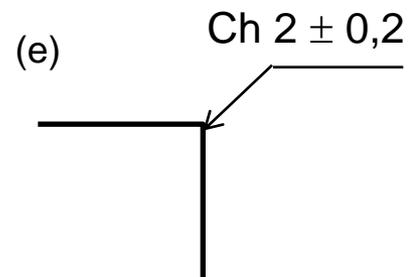
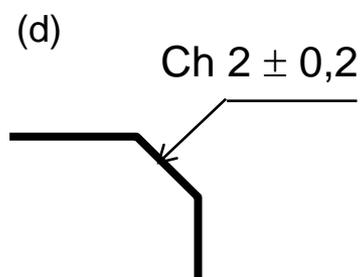
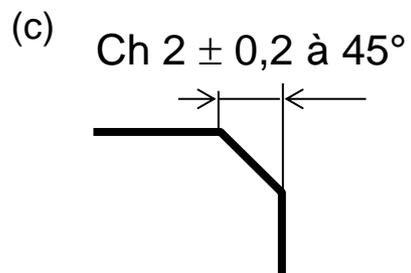
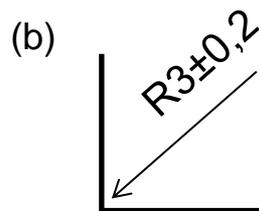
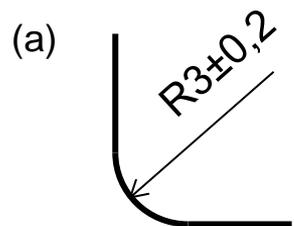
Cas 1 : Le segment est perpendiculaire à la bissectrice des normales

Cas 2: Le segment fait un angle constant avec la normale au point d'intersection de l'une des faces.

Vue dans le plan d'intersection

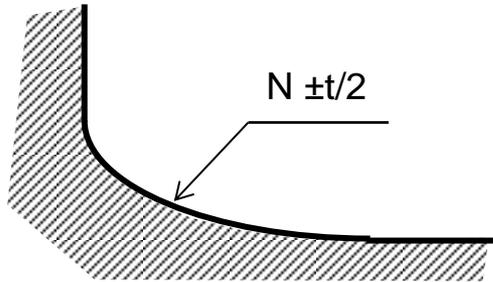


SPECIFICATION DES CONGES ET CHANFREINS

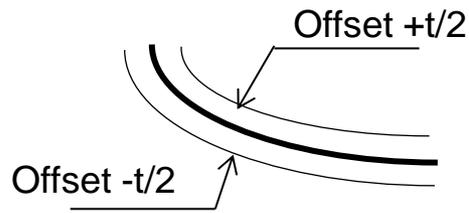


CONGE DE FORME COMPLEXE

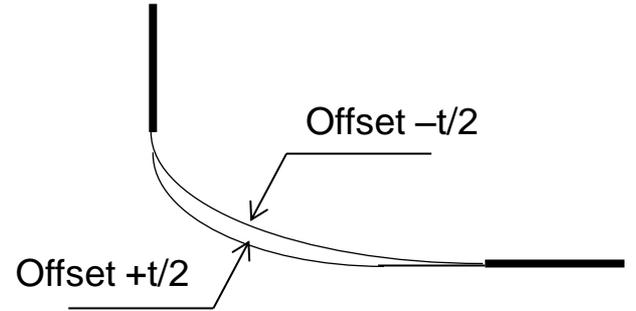
(a)



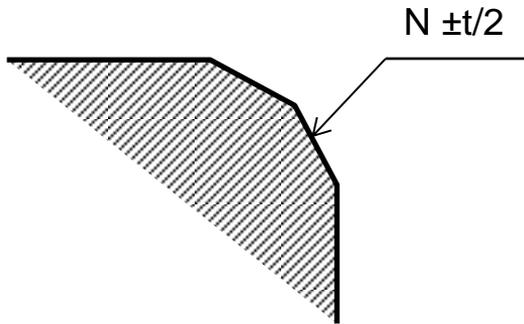
(b)



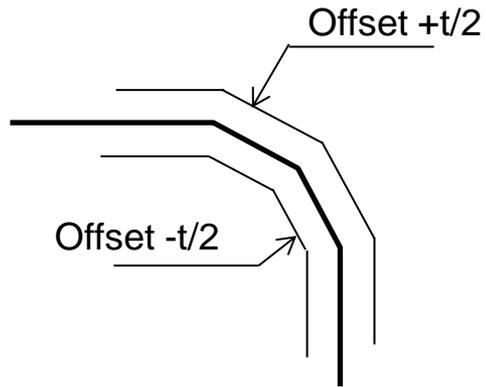
(c)



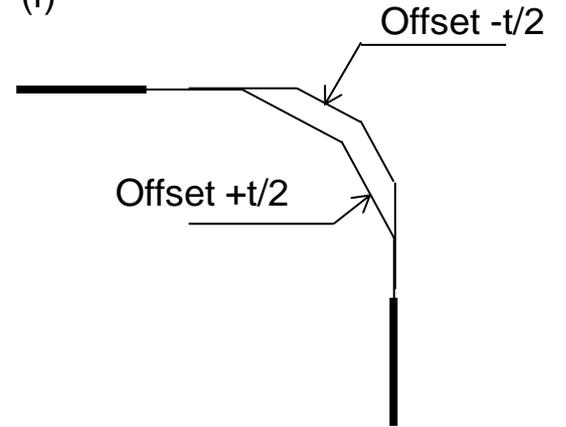
(d)



(e)

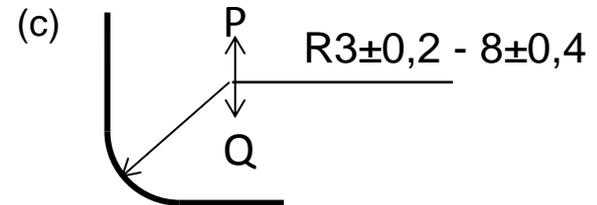
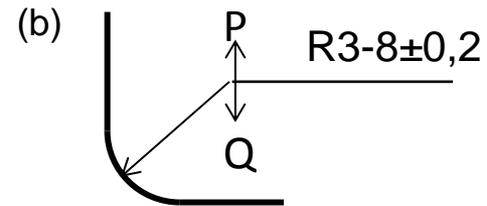
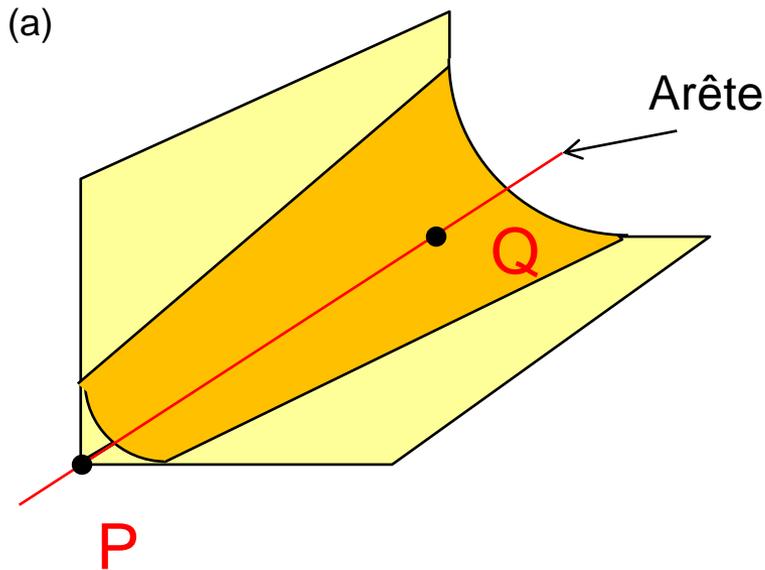


(f)



CONGE EVOLUTIF

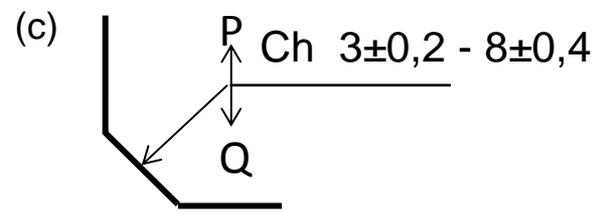
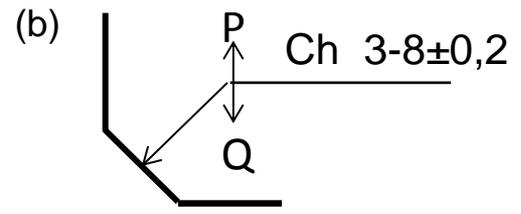
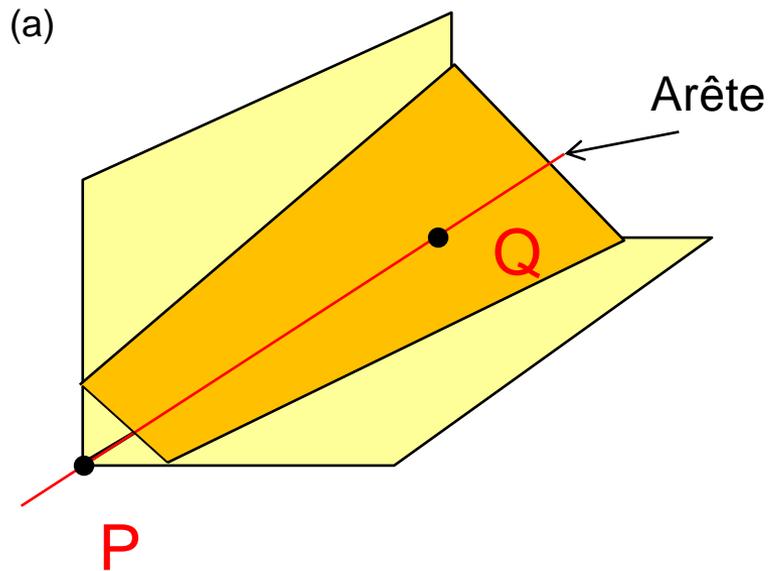
Dans un congé évolutif, le rayon varie linéairement entre 2 points identifiés sur la ligne intersection entre les faces sur lesquelles s'appuie le congé. Le rayon est mesuré dans le plan normal à cette ligne.



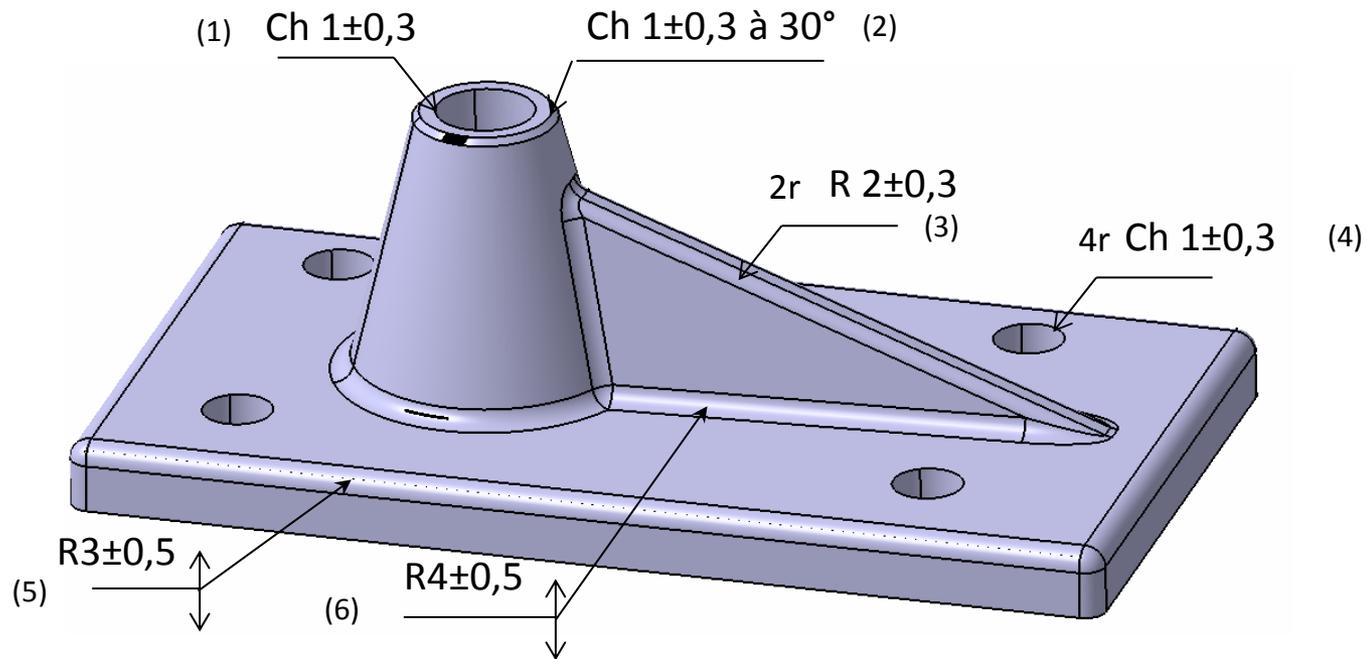
Si la variation n'est pas linéaire, un commentaire doit préciser la loi d'évolution.

Le rayon varie linéairement
de 3 à 8 mm entre P et Q

CHANFREIN EVOLUTIF



PROPAGATION DES CONGES



SUITES A DONNER

Recensement des besoins non couverts

Cas d'études suivant les besoins

Développement des outils de métrologie

Mise au point des propositions et promotion (UNM ?)

Merci de votre attention