

FA3

Calottes de cuve

18 juin 2015
HCTSIN



Synthèse

- La cuve de l'EPR présente des progrès de conception sur des points significatifs.
- La possibilité de ségrégation dans certaines zones des pièces forgées épaisses est un phénomène classique, bien connu.
- Sur les calottes de la cuve de Flamanville 3, la ségrégation engendrée par le procédé employé est, par conception, placée dans une zone non sensible.
- Les contrôles ont montré que les calottes sont exemptes de défauts (fissures).
- Les chargements mécaniques sont limités.

A la demande de l'ASN, AREVA bâtit un dossier justificatif complet

- ✓ *expertise métallurgique d'une pièce identique (ductilité du métal)*
- ✓ *analyses exhaustives de comportement mécanique*



***Les données et analyses apportées à ce jour montrent la qualité
et la robustesse de la cuve de Flamanville 3***

Sommaire

Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

Conclusion



Cuve de l'EPR : innovations de conception

Matériaux de la cuve

- *baisse des teneurs Soufre, Phosphore*
- *Inconel 690 à la place de 600*

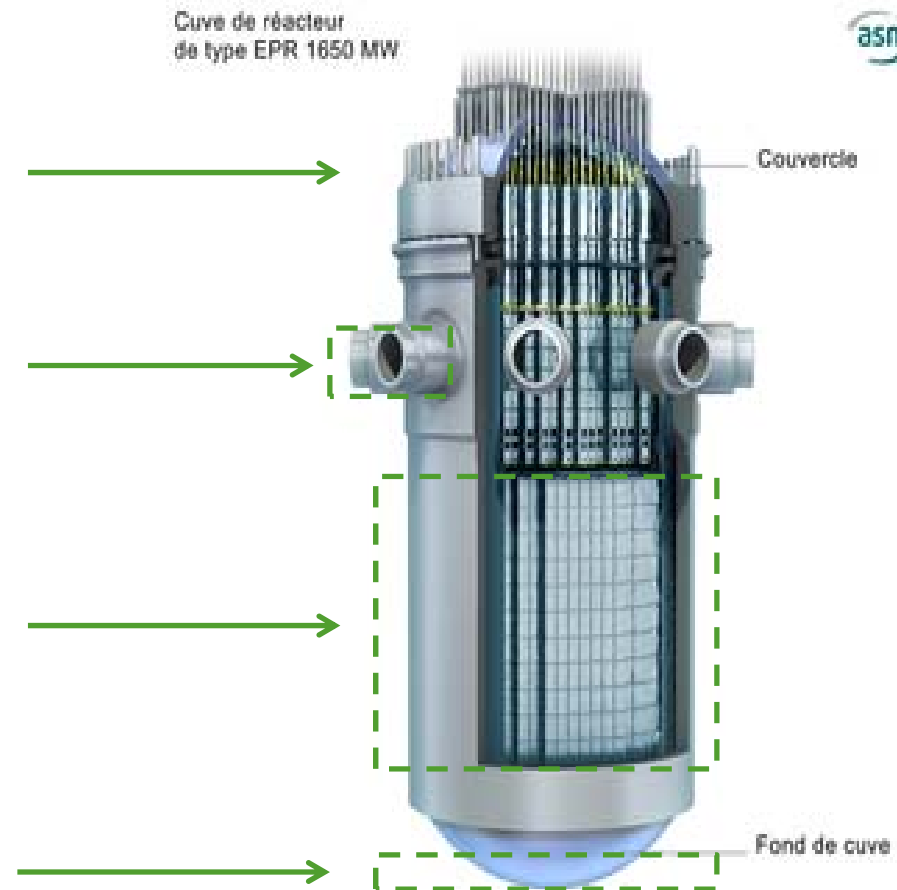
Circuit primaire

- *tubulures « set on »*
- *« piquages » sur les tuyauteries primaires : forgés et non soudés*

Baisse du flux de neutrons sur la cuve

- *réflecteur « lourd » de neutrons*
- *plus grande épaisseur d'eau*

Pas de traversées en fond de cuve



Des innovations substantielles dans les domaines les plus significatifs

Enjeux de conception des cuves

➤ Tenue à la pression en fonctionnement normal et incidentel

- ✓ *résistance mécanique de l'acier*
- ✓ *épaisseur des pièces*

➤ Robustesse par rapport au risque de rupture fragile

- ✓ *Éliminer les défauts*
 - ✓ *pièces forgées*
 - ✓ *limiter le nombre de soudures*
 - ✓ *éviter la propagation de défauts par fatigue*
- ✓ *Ductilité de l'acier*
 - ✓ *résilience, ténacité, « RTNDT »*
 - ✓ *limiter l'irradiation en zone de cœur*
- ✓ *Minimiser les contraintes*
 - ✓ *limiter les chocs thermiques*
 - ✓ *protéger le circuit contre les surpressions à froid*

Risque de rupture brutale si :

- défaut (fissure)
- température basse (*)
- contraintes fortes

(*) *au regard des propriétés de l'acier*

Sommaire

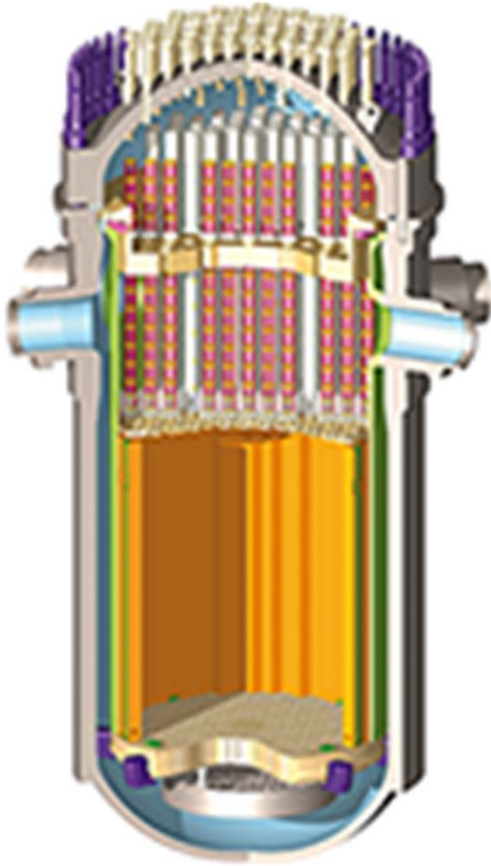
Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

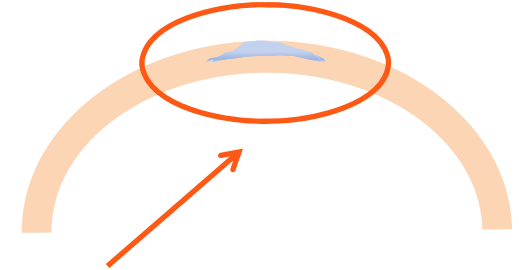
Conclusion



De quoi parle-t-on ?

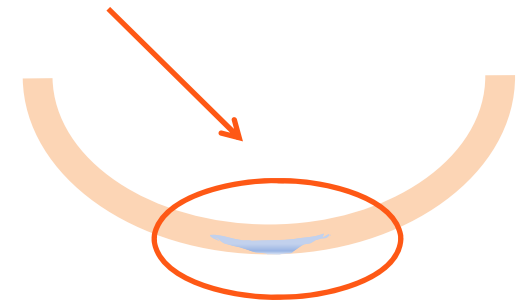


CALOTTE SUPÉRIEURE



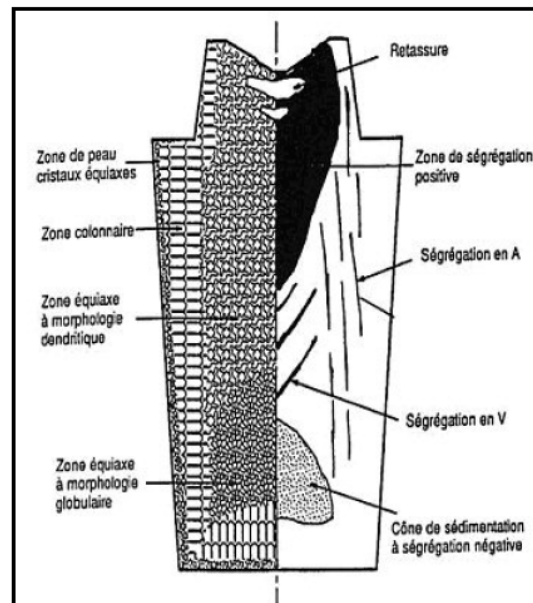
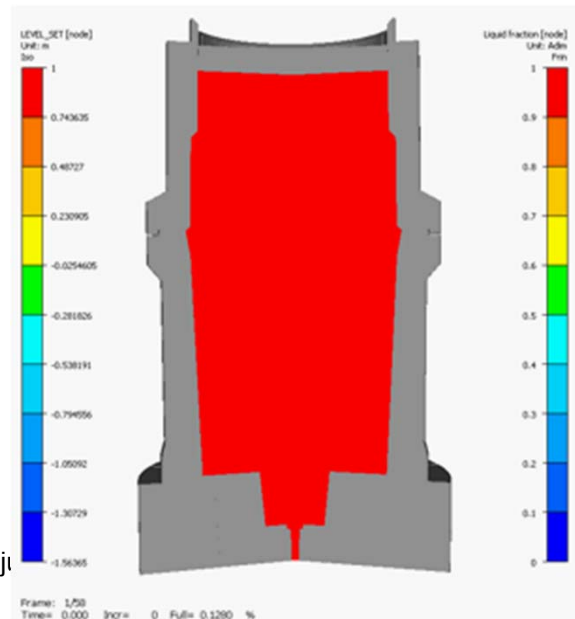
Ségrégation positive
(Concentration en carbone supérieure à la moyenne)
Au centre et en peau externe

CALOTTE INFÉRIEURE



Origine de la ségrégation

- ❖ Lors du refroidissement d'un lingot, le carbone « migre » vers les zones les plus chaudes, celles qui se solidifient le plus tardivement.
- ❖ Phénomène classique sur les pièces épaisses, étudié depuis le début des années 80.
- ❖ Le phénomène dépend de la taille de la pièce et du lingot.
- ❖ EPR : pièces + grosses, utilisation d'un lingot classique de grande taille.
- ❖ Lors du forgeage, la ségrégation se concentre au milieu en partie externe de la pièce



Sommaire

Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

Conclusion



Enjeux et prise en compte de la ségrégation

➤ Conséquences d'une zone de ségrégation positive

✓ *L'augmentation de la concentration en carbone durcit le matériau.*

✓ *La valeur de la résilience baisse.*

➤ Comment le risque a-t-il été pris en compte à la conception?

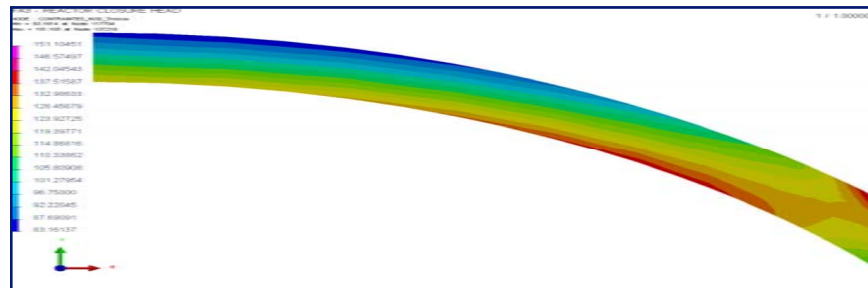
✓ *Le forgeron localise la zone concernée au centre et à l'extérieur, dans une zone où*

✓ *les contraintes sont faibles*

✓ *les éventuels « chocs froids » sont sans conséquence (refermeture des défauts)*

✓ *il n'est pas réalisé de soudure d'assemblage ou de revêtement.*

✓ *Vérification de caractéristiques mécaniques exigeantes là où existe un risque de création de défaut ou de chargement mécanique important (« zones de recette »)*



Contraintes dans la
calotte supérieure

Sommaire

Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

Conclusion



Essais complémentaires de 2014

➤ Contrôles et essais de fin de fabrication (2007)

- caractéristiques mécaniques en **zone de recette** : conformes
- contrôle à 100% du volume et de la surface de la pièce : pas de défauts

➤ Les essais complémentaires (demande ASN)

- Vérifier **en tout point de la pièce** les caractéristiques du matériau
 - déclinaison des exigences ESPN
- Essais réalisés en 2014 sur une pièce représentative des calottes de FA3
 - un couvercle EPR réalisé suivant le même processus de fabrication
 - mesures de résilience en zone centrale : moyenne 52 Joules (critère : 60 J)
 - caractérisation de la chimie du matériaux (concentration en carbone)
- Zone ségrégée confirmée au centre de la partie extérieure de la calotte



Evolution du référentiel et de la pratique : des zones sensibles à la rupture brutale vers une justification en tous points

Quelques valeurs chiffrées

Carbone

- Spécification [0,18% - 0,22%]
- Moyenne coulée : 0,18%
- Peau interne : [0,16% - 0,18%]
- Peau externe : **0,28%**

	20	21	22	23	24	25	26	27	28
C	0.163	0.168	0.179	0.177	0.180	0.178	0.175	0.178	0.176
S	<0.000 3	<0.000 3	<0.000 3	<0.000 3	0.0004	0.0009	0.0006	<0.000 3	<0.000 3
P	0.004	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	<0.00 2

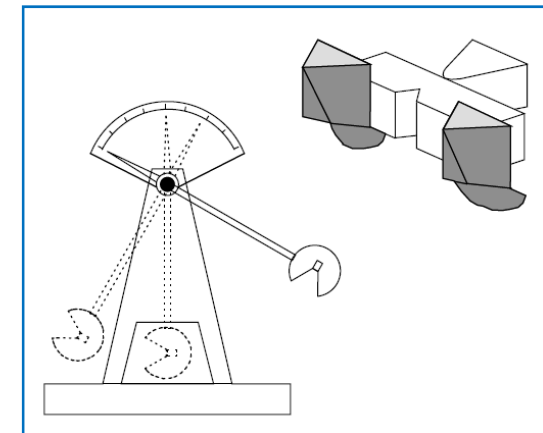
Teneur en carbone à la coulée = 0,18%

TABLE 7: CALOTTE DE CUVE EPR - CARBONE EN SURFACE INTERNE - AXE 0/180°

Résilience

- Aptitude à résister au choc
 - Spécification > 60 Joules
 - Propriété très locale et variable
- Mesure sur 3 éprouvettes

Éprouvettes « Charpy »



Specimen N°	Position	Individual	Average
K31 – 32 – 33	Outside	70 – 76 – 73 J	73 J
K34 – 35 – 36	3/4T	36 – 52 – 48 J	46J
K49 – 50 – 51	Additional test 3/4T	47 – 62 – 64 J	58 J

Peau externe

Specimen N°	Position	Individual	Average
K40 – 41 – 42	Inside	161 – 171 -202 J	178 J
K37 – 38 – 39	1/4T	114 – 154 – 140 J	136 J

Peau interne

Sommaire

Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

Conclusion



Programme complémentaire

❑ S'ajoutant aux données déjà acquises (pour mémoire) :

- ❖ *Les calottes de la cuve de Fa3 sont exemptes de défauts (fissures).*
- ❖ *Les caractéristiques mécaniques sont conformes dans les zones qui pourraient être sensibles au risque de rupture brutale (par leur chargement mécanique).*

❑ Volet connaissance des caractéristiques mécaniques

- ❖ *Programme complet de caractérisation des propriétés mécaniques (ténacité), chimiques et métallurgiques, dans toute l'épaisseur d'une calotte identique.*

❑ Volet conception:

- ❖ *Montrer l'absence de sollicitations pouvant conduire à un risque de rupture brutale.*
- ❖ *Montrer que les caractéristiques mécaniques maintiennent en toutes circonstances le métal dans une plage de ductilité suffisante.*
- ❖ *Démontrer que la présence d'un défaut hypothétique ne remettrait pas en cause la tenue de la cuve, dans les situations les plus pénalisantes.*



Suivant la démarche définie par le Groupe Permanent ESPN en 2011

Evaluation des caractéristiques du matériau

➤ La résilience et l'allongement à la rupture

- illustrent la ductilité du matériau
- sont appropriés aux essais de recette
- donnent une image conservative

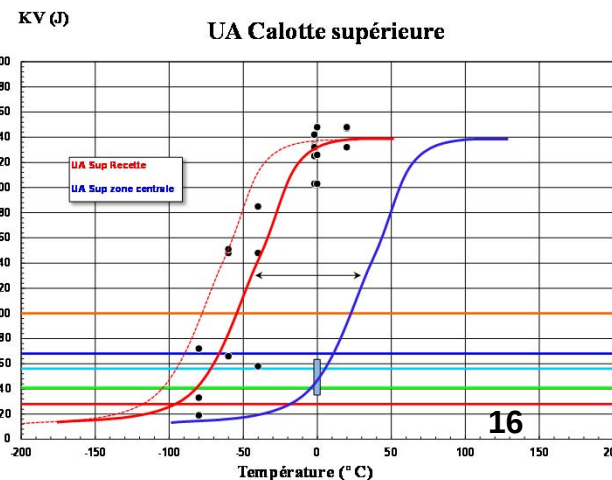
La grandeur représentative est la **ténacité** :
capacité d'un matériau à résister à la
propagation d'une fissure

➤ Lorsque ces paramètres n'atteignent pas les spécifications, **essais de ténacité**.

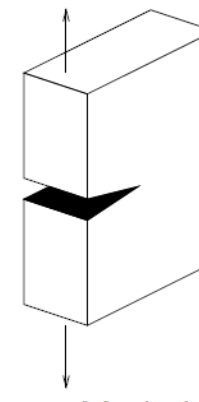
➤ La ténacité (comme la résilience) **dépend de la température**

- en dessous d'une certaine température, les aciers sont « fragiles ».
- au-dessus de la « **température de transition** » ou RTNDT, l'acier est ductile.
- avec la ségrégation (ou l'irradiation), la RTNDT augmente.

Décalage de RTNDT



18 juin 2015 - HCTSIN



Essai de ténacité

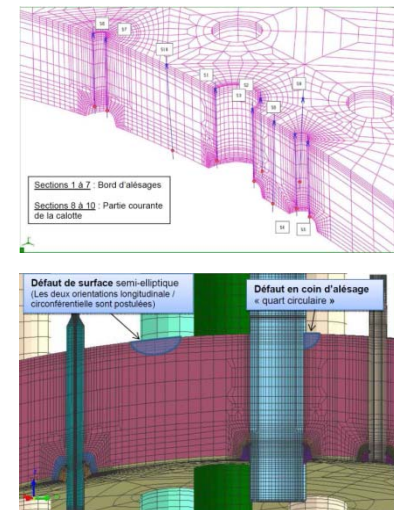
Analyse des chargements mécaniques

Le programme complémentaire comprend l'analyse de tous les chargements mécaniques pouvant affecter les calottes (*surpressions, chocs thermiques*).

En supposant un défaut hypothétique.

Les modélisations déjà réalisées montrent des marges importantes.

- ✓ **Chocs froids** (*injection de sécurité*) : « referment » les défauts
- ✓ **Surpressions à froid** : risque écarté (*dispositifs de protection*)
- ✓ **Epreuves hydrauliques** : marges importantes (+ cœur déchargé)
- ✓ **Montée en température** depuis l'arrêt à froid : marges importantes mises en évidence par les modélisations réalisées.



Analyse exhaustive des chargements mécaniques en cours.

Incorporera les caractéristiques des matériaux établies par les essais.

Sommaire

Synthèse

1. La cuve de l'EPR
2. Ségrégation dans les calottes
3. Enjeux et prise en compte à la conception
4. Essais complémentaires de 2014
5. Programme de travail

Conclusion



Conclusion

- La cuve de l'EPR présente des progrès de conception significatifs.
- La possibilité de ségrégation dans certaines zones des pièces forgées épaisses est un phénomène classique, bien connu.
- Sur les calottes de la cuve de Flamanville 3, la ségrégation engendrée par le procédé est, par conception, placée dans une zone peu sensible aux risques de rupture brutale.
- Les contrôles ont montré que les calottes sont exemptes de défauts (fissures).
- Les chargements mécaniques sont limités.

***AREVA bâtit un dossier justificatif complet,
suivant la démarche définie par le GP ESPN en 2011 (lettre ASN de 2012).***

- ✓ *expertise métallurgique complète d'une pièce identique (ductilité du métal)*
- ✓ *analyse des chargements et des chocs thermiques les plus pénalisants*
- ✓ *calculs de mécanique de la rupture sur des défauts hypothétique « enveloppes »*

**» *Les données et analyses apportées à ce jour montrent la qualité
et la robustesse de la cuve de Flamanville 3***

Sommaire

Annexe



Forgeage et assemblage des composants lourds de la boucle primaire



CREUSOT FORGE

- Fabrication pièces forgées et moulées (viroles de cuves, fonds primaires, tubulures)
- 270 employés
- Plus de 2 900 pièces nucléaire livrées depuis 1970



SAINT MARCEL

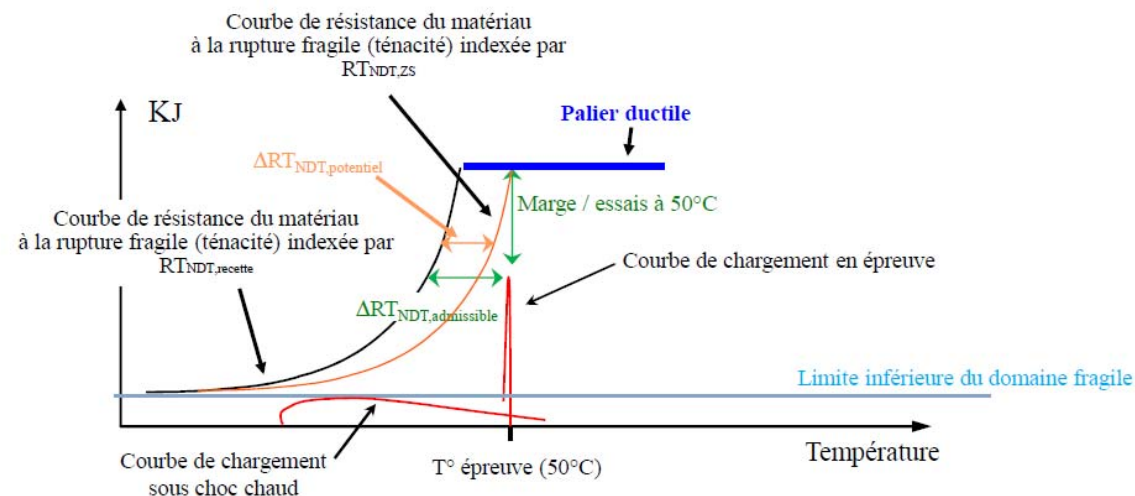
- Fabrication : générateurs de vapeur, cuves, couvercles, internes, pressuriseurs , etc.
- 900 employés
- Plus de 660 composants lourds livrés depuis 1975

Evaluation du risque de rupture brutale

Pour qu'il y ait risque de rupture brutale, il faut :

- Supposer un défaut (fissure).
- Des contraintes mécaniques en fond de fissure (*) dépassant la limite admissible par le matériau à cette température (*ténacité*).
- Donc, un matériau trop peu ductile, une température basse (au regard de la température de transition du matériau) et des chargements importants.

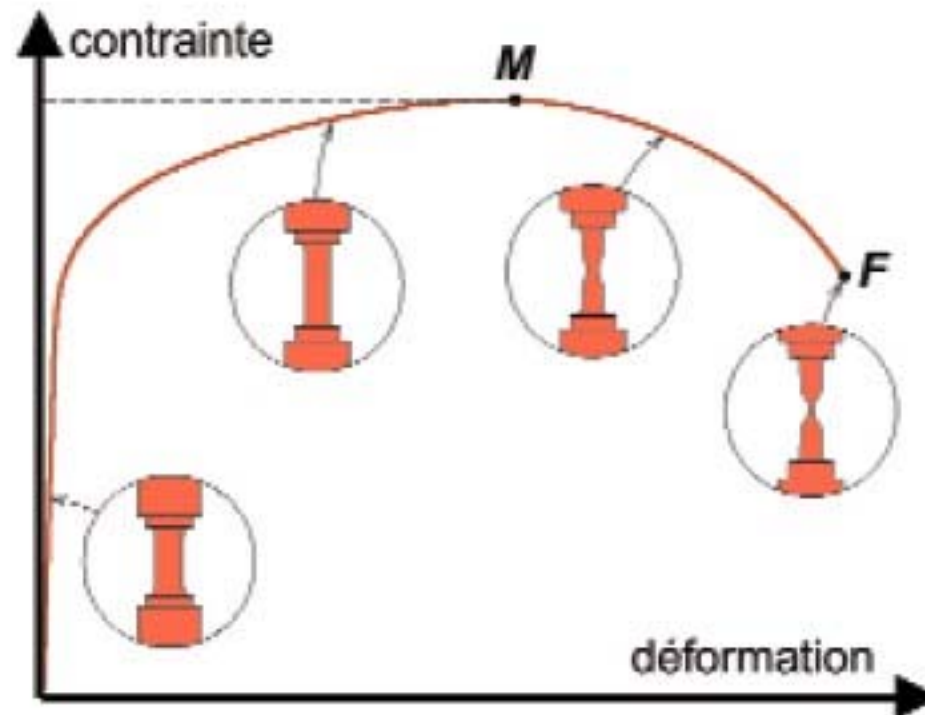
La modélisation est bien sûr un peu complexe !



Quelques définitions

❑ Qu'est-ce que la ductilité ?

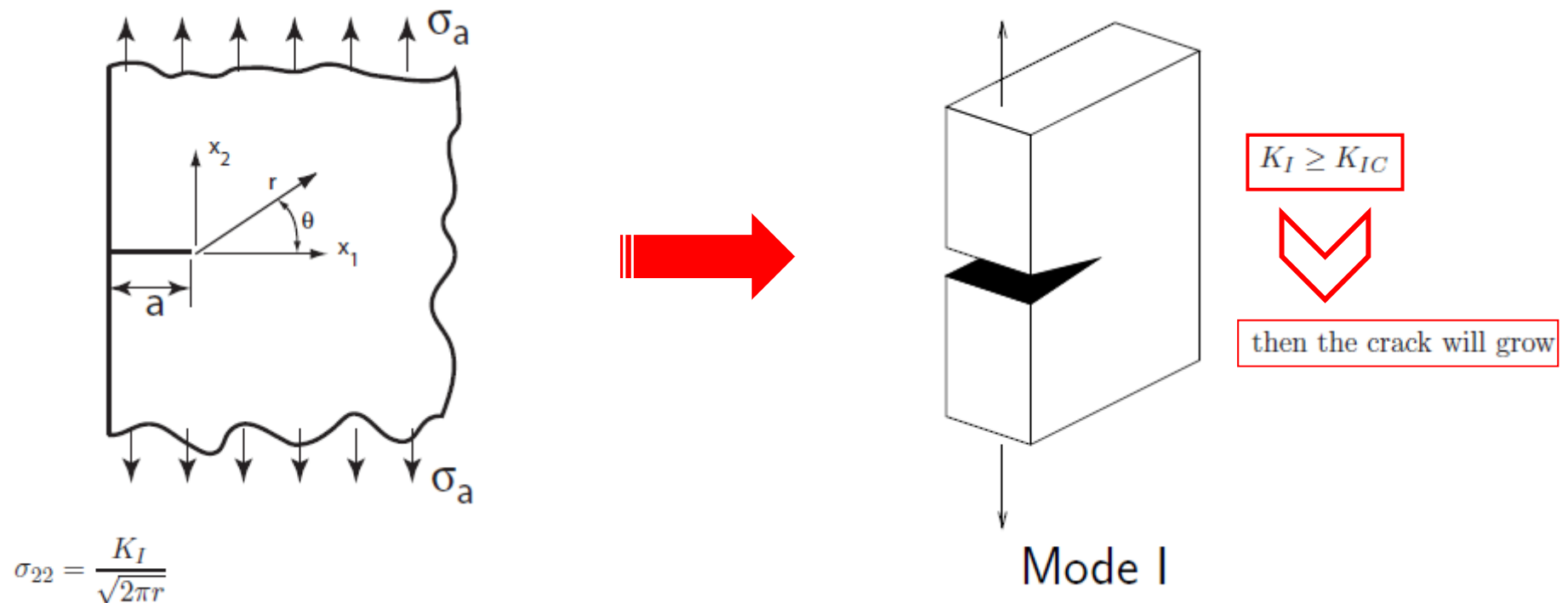
La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer sans rompre



Quelques définitions

□ Qu'est-ce que la ténacité ?

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure sous contrainte mécanique

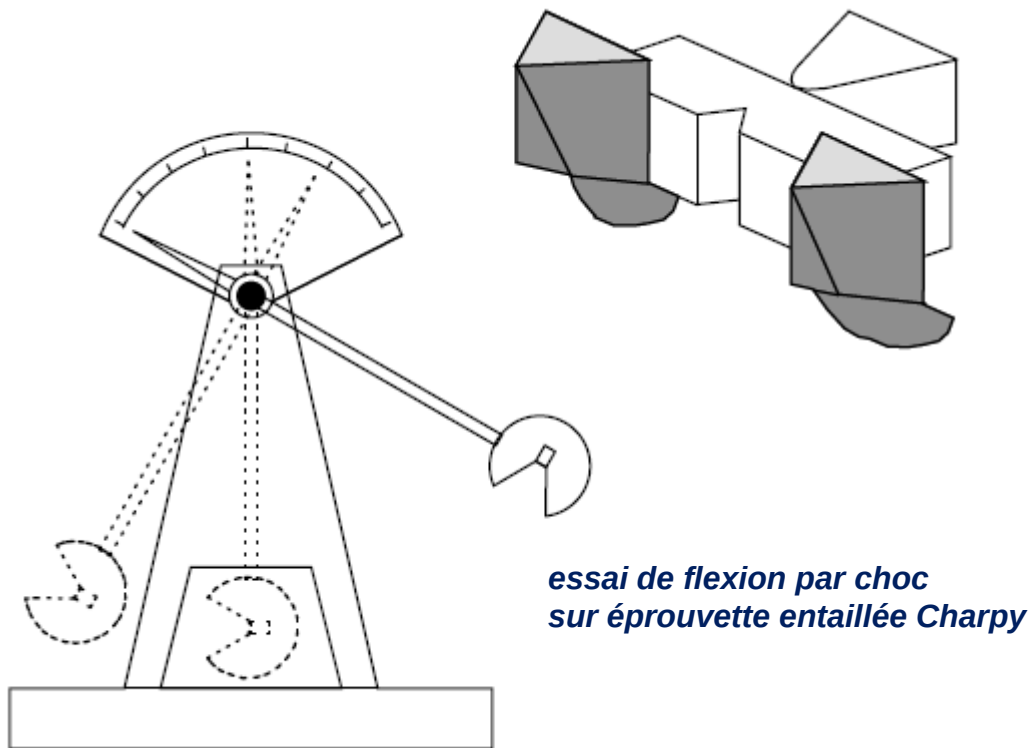


where r is the distance from the crack tip and K_I is related to the applied stress by $K_I = 1.12\sigma_a\sqrt{\pi a}$.

Quelques définitions

❑ Qu'est-ce que la résilience ?

La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie sous l'effet d'un choc



**Résilience K_v
en Joule (*)**

(*) initialement en J/cm²