

# Impact des anomalies sur la sûreté

Analyse du risque de rupture  
brutale et  
appréciation des marges



Crédit photo : ASN

24 février 2017

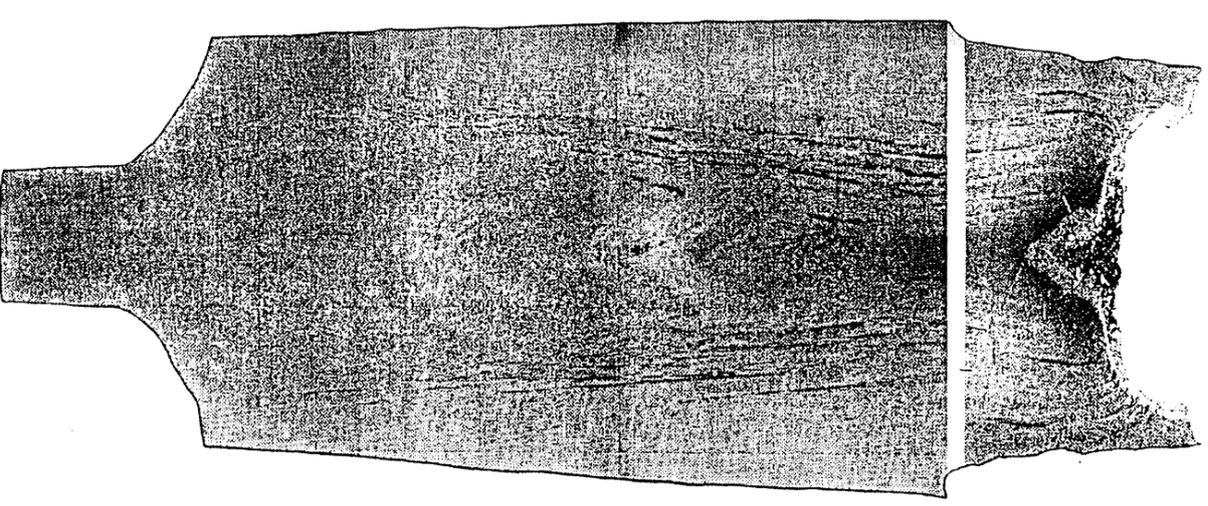
© IRSN

- Constat de départ
- Analyse du risque de rupture brutale
- Deux premiers avis IRSN (été 2016)
- Résultats EDF - été 2016
- Avis de l'IRSN - 30 novembre 2016

Qu'est-ce qu'implique la présence d'une ségrégation dans un composant forgé ?  
Quels ont été la nature et l'objet de l'évaluation menée par l'IRSN ?

# Le constat

- EDF : Recherche des composants avec un processus d'élaboration comparable aux calottes de FLA3
  - Pièces forgées à partir d'un lingot conventionnel
- Fonds primaires de GV forgés à partir de lingots conventionnels
  - Fonds forgés par AREVA Creusot Forge
  - Fonds forgés par JCFC
    - Lingots de 90 t / 120 t
- Mesures de carbone en surface fonds en service (demande ASN du 22.4.2016)
  - Premières mesures en juin
  - Confirmation présence de ségrégation de C



# Conséquences

- Localement [C] > 0,22 % (RCC-M)
  - Influence sur les propriétés de résilience, ténacité, ductilité

Les données de comportement du matériau  
prises en compte à la conception sont mises en cause

Ténacité = f(température)

- Conception : quelles études impactées ?

- Pourquoi est-ce remis en cause?

- Qu'est-ce qui a été pris en compte à la conception ?

# Conséquences

- Reprendre les études de nocivité de défaut :

Analyses du risque de rupture brutale (mécanique)

- En tenant compte d'une  $RT_{NDT}$  caractéristique du comportement du matériau dans sa zone la plus ségréguée et non en zone de recette
  - Problème : elle n'a pas été caractérisée...
- Seule la zone ségréguée est à étudier
  - Caractériser son étendue est un préalable

# Analyse du risque de rupture brutale ?

## ■ Objectif :

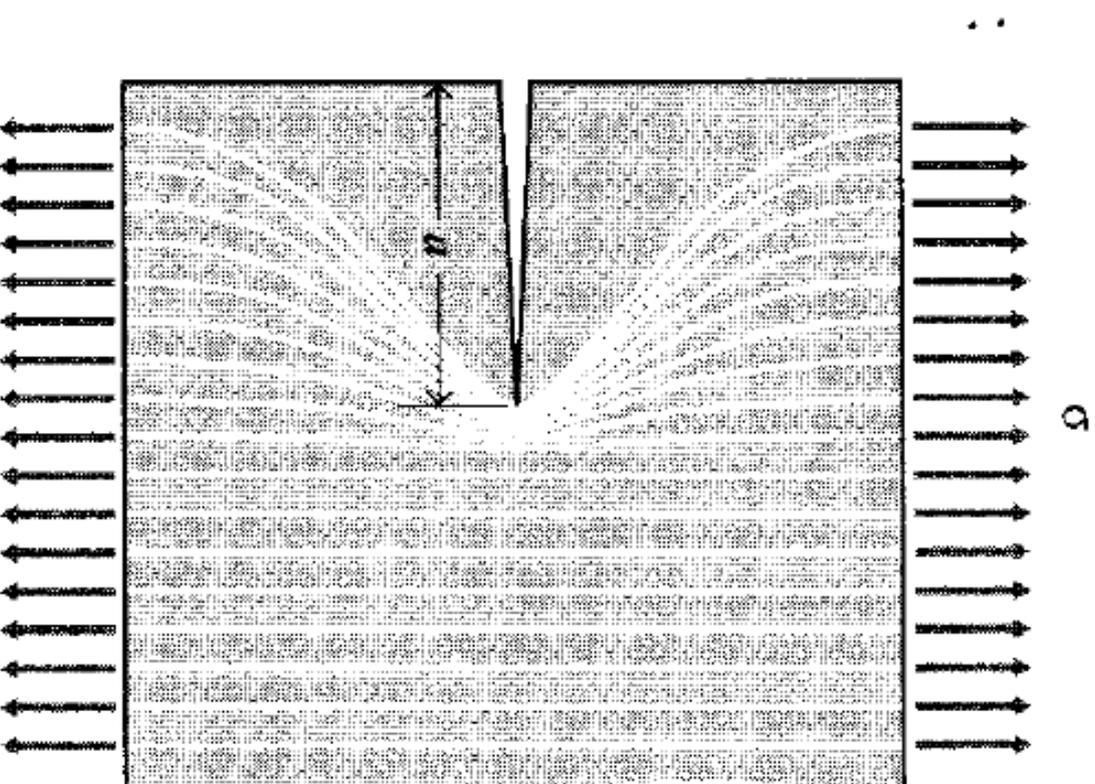
Montrer que le **matériau** constitutif du composant étudié est tel qu'un **défaut** qui n'aurait pas été **détecté** ne présente aucun risque de **s'amorcer** sous l'effet des **chargements** induits en service

## ■ Les données d'entrée

- **Matériau** : propriétés mécaniques, notamment ténacité =  $f(T) \Rightarrow RT_{NDT}$
- **Défaut** : dimensions, position
- **Chargements** : température, pression, coefficients de sécurité

## ■ Démarche codifiée (RCC-M, annexe ZG)

# Analyse du risque de rupture brutale ?



# Analyse du risque de rupture brutale ?

## ■ Objectif :

Montrer que le matériau constitutif du composant étudié est tel qu'un défaut qui n'aurait pas été détecté ne présente aucun risque de s'amorcer sous l'effet des chargements induits en service

## ■ Les données d'entrée

**Modifiées par la présence de ségrégation**

- Matériau : propriétés mécaniques, notamment ténacité =  $f(T) \Rightarrow RT_{NDT}$
- Défaut : dimensions, position
- Chargements : température, pression, coefficients de sécurité

Non Modifiés par la présence de ségrégation  
Réévalués néanmoins (défense en profondeur)

# Grandes lignes de la démarche EDF (juin 2016)

## ■ Réacteurs concernés

- Étendue de la zone ségrégée
  - Mesures superficielles de teneur en carbone

- Comportement du matériau
  - Hypothèses similaires au dossier calottes EPR FLA3

- Absence de défauts
  - Relecture des rapports de fin de fabrication (RFF)
  - Nouveaux contrôles : technique TOFD

- Reprendre les calculs, réévaluer les chargements

# Premiers avis de l'IRSN - été 2016

- Dossier d'EDF : réacteur n°2 Chinon B
  - Analyse du risque de rupture brutale
  - Contexte : épreuve hydraulique 3e visite décennale

## ■ Hypothèses

- Zone ségréguée localisée en face externe du fond
- Décalage RT<sub>NDT</sub> de 35 °C et 70 °C
  - Identique dossier calottes EPR FLA3
- Défauts
  - 5 x 30 et 10 x 60
  - Zone courante du fond
- Chargement
  - Épreuve hydraulique

# Premiers avis de l'IRSN - été 2016

## ■ Avis de l'IRSN du 29 juin 2016

- Facteurs de marge calculés
  - Supérieurs à 1 ⇒ Stabilité des défauts (postulés)
- ⇒ Absence de risque de rupture brutale lors de l'épreuve hydraulique
- Décalage de  $RT_{NDT}$  cohérent avec les hypothèses calottes EPR FLA3
  - Rappel :  $[C] \leq 0,30\%$  sur calottes EPR FLA3
    - À confirmer par les mesures à réaliser sur les fonds
- Taille de défaut inférieure à la taille de défaut conventionnel RCC-M
  - Acceptable moyennant des contrôles ad-hoc (TOFD)

# Premiers avis de l'IRSN - été 2016

- Dossier d'EDF : réacteur n°2 Chinon B
  - Analyse du risque de rupture brutale
  - Toutes situations d'exploitation
  - Chargement ⇨ Transitoires TH ⇨ Situations ⇨ Catégories
  - Défaut en paroi externe : analyse des « [chocs](#) » ([thermique](#)) [chaud](#)
  - Nécessite d'étudier des situations additionnelles en plus de celles du DDS
    - État froid initial (< 100 °C), puis réchauffement
    - État refroidi (choc froid), puis réchauffement
    - Sources chaudes : puissance résiduelle, arrivée de « bouchons » d'eau chaude, etc.

# Premiers avis de l'IRSN - été 2016

## ■ Avis de l'IRSN du 11 août 2016

- Retenir d'autres sources chaudes : [réchauffement des épingles GV](#)
- Caractère enveloppe des transitoires étudiés par EDF, discutable en première approche
- Mesures compensatoires pour garantir l'exclusion des situations induisant des chargements dépassant les transitoires étudiées

## ■ [Mesures compensatoires](#) mises en œuvre par EDF

- Limiter les écarts de température entre GV et RRA
- Exclure redémarrage intempestif des pompes primaires

## ■ Démarche et conclusions généralisables à tous les fonds respectant les hypothèses EPR FLA3

# Résultats des mesures EDF - été 2016

## ■ Ressuage, TOFD

- Confirme l'absence de défauts

## ■ Cartographies C ([spectrométrie d'étincelage optique](#))

- Valident les hypothèses pour les fonds Creusot Forge
- Hypothèses **dépassées** sur les fonds JCFC + tubulures
- Ex : [TRI1](#)

## ■ Les différences

- **Taux de carbone au-delà des hypothèses calottes EPR FLA3**
- **Ségrégations au niveau tubulures**

NB : Prélèvements de copeaux [C] < [C] SEO

# Analyse du risque de rupture brutale ?

## ■ Objectif :

Montrer que le matériau constitutif du composant étudié est tel qu'un défaut qui n'aurait pas été détecté ne présente aucun risque de s'amorcer sous l'effet des chargements induits en service

## ■ Les données d'entrée

**Modifiées par la présence de ségrégation**

- Matériau : propriétés mécaniques, notamment ténacité =  $f(T) \Rightarrow RT_{NDT}$
- Défaut : dimensions, position
- Chargements : température, pression, coefficients de sécurité

Non Modifiés par la présence de ségrégation  
Réévalués néanmoins (défense en profondeur)

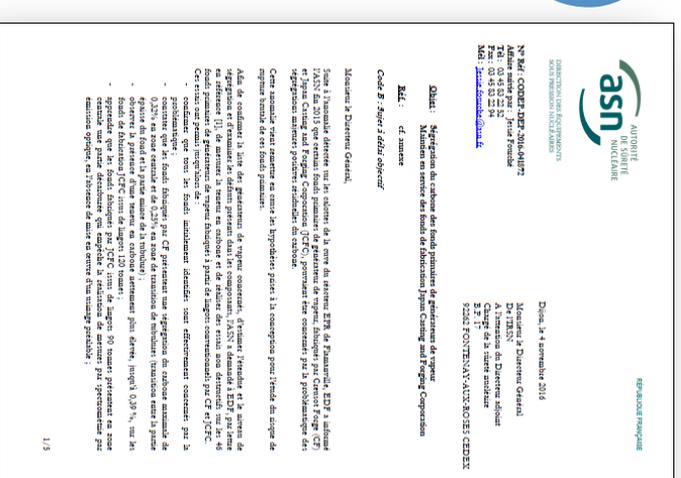
# Conséquences : nécessité d'un nouveau dossier

- Matériau : [C] ~ 0,39 % ⇒ quelles propriétés ?
  - EDF : extrapolation du décalage  $RT_{NDT}$
  - Demande ASN + IRSN : disposer de résultats d'essais
- Extension de la ségrégation ?
  - Pas de caractérisation possible en face interne (revêtement)
  - Postulat : défauts en face interne (robustesse de l'étude)
- Défauts
  - Nouvelles zones à contrôler : tubulures
- Chargements
  - Prise en compte des chocs froids

# Saisine de l'IRSN (4.11.2016)

## (1) Absence de défauts

- Pertinence de l'ensemble des mesures prises par EDF pour s'assurer de l'absence de défauts
- Adéquation entre les défauts postulés dans les calculs et les défauts détectables



# Saisine de l'IRSN (4.11.2016)

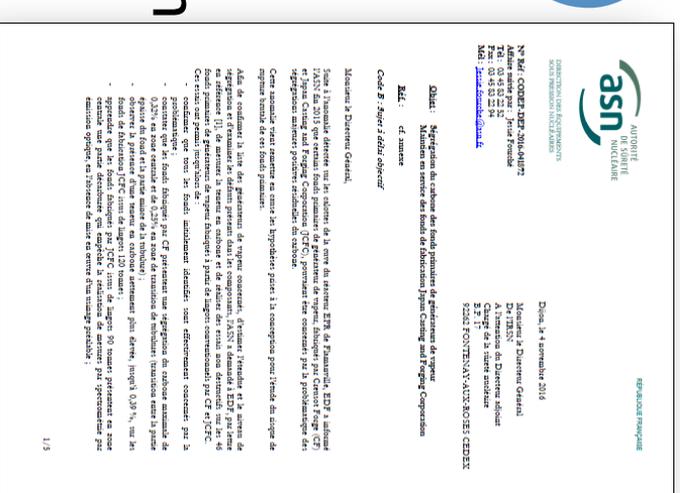
## (2) Comportement du matériau

■ Caractère approprié et conservatif du décalage de RTNDT établi par EDF en présence d'une ségrégation du carbone proche de 0,4 %

■ Caractère approprié et conservatif du décalage de RTNDT établi par EDF en face interne du bol

■ Pertinence de la courbe de l'annexe ZG du code RCC-M, dans le contexte d'un matériau fortement ségrégré pouvant présenter un décalage de RTNDT inhabituel (supérieur à 100 °C)

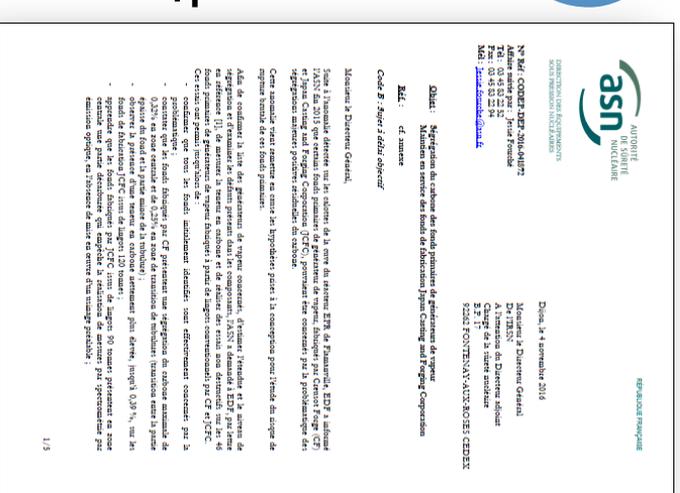
■ Hypothèses retenues dans l'analyse mécanique permettant d'évaluer les marges vis-à-vis de l'initiation d'un défaut



# Saisine de l'IRSN (4.11.2016)

## (3) Modélisation et calculs

- Exhaustivité et pertinence de la caractérisation des transitoires de chocs froids sélectionnés par EDF
- Efficacité des mesures compensatoires proposées par EDF en cas de chocs froid
- Modélisation des fonds, conditions aux limites, chargements
- Pertinence de la localisation des défauts et des sections de dépouillement
- Résultats des calculs de mécanique



# Avis de l'IRSN - 30 novembre 2016

## ■ Caractéristiques du matériau ségrégré

- Données d'extrapolation : décalage  $RT_{NDT} = 11^{\circ}C / 0,01\%$

	Calottes FLA3	Fonds JCFC
[C]	0,29 %	0,39 %
$\Delta RT_{NDT}$	70 °C	70 + 110 = <b>180 °C</b>

- Position IRSN : données insuffisantes pour valider l'hypothèse (conservatisme)

## ■ Essais complémentaires

- Échantillons prélevés dans la masselotte VB335-B
- Essais de résilience : estimation du décalage de  $RT_{NDT}$
- Essais de ténacité + influence de l'effet de trempe

# Avis de l'IRSN - 30 novembre 2016

## ■ Matériau : conclusion

- Données d'extrapolation validées car conservatives (11 °C / 0,01 %)
- Hypothèse décalage de  $RT_{NDT}$  de 180 °C en face externe : validée
- Hypothèse décalage de  $RT_{NDT}$  de 70 °C en face interne : validée
  - [C] estimée à 0,26 % (positionnement de la pièce / lingot)
- Approche annexe ZG : applicable pour de tels décalages

## ■ Conclusions confortées par une analyse externe (Belv)

# Avis de l'IRSN - 30 novembre 2016

## ■ Défauts / contrôles

- [Contrôles fabrication + contrôles complémentaires adaptés](#)
  - Confirment l'absence de défauts
- Défauts postulés dans les analyse de mécanique : enveloppes des plus grands défauts non détectables

## ■ Chargements

- Situations de « [chocs](#) » [froids](#) étudiées et prises en compte
- [Mesures compensatoires](#) ou préventives pour exclure des transitoires au-delà de ceux étudiés
- [Recommandations de l'IRSN](#)
  - Affiner l'estimation des coefficients d'échange fluide-paroi
  - Dispositions pour éviter le redémarrage intempêtif GMPP
  - Mesure supplémentaire / cyclage GV

# Analyse du risque de rupture brutale ?

## ■ Objectif :

Montrer que le matériau constitutif du composant étudié est tel qu'un défaut qui n'aurait pas été détecté ne présente aucun risque de s'amorcer sous l'effet des chargements induits en service

## ■ Les données d'entrée

**Modifiées par la présence de ségrégation**

- Matériau : propriétés mécaniques, notamment ténacité =  $f(T) \Rightarrow RT_{NDT}$
- Défaut : dimensions, position
- Chargements : température, pression, coefficients de sécurité

Non Modifiés par la présence de ségrégation  
Réévalués néanmoins (défense en profondeur)

# Avis de l'IRSN - 30 novembre 2016

## Conclusion

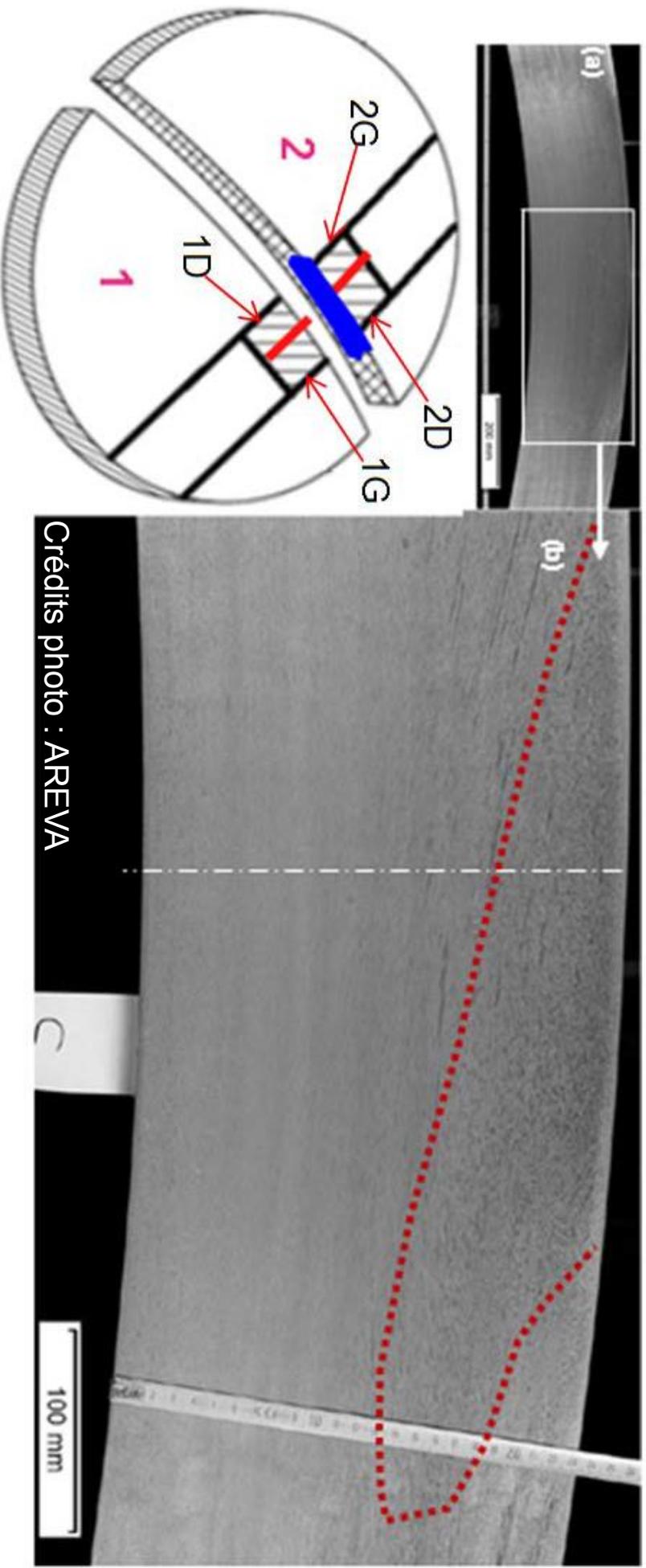
- Hypothèses présentées pour analyse du risque de rupture brutale
    - Propriétés du matériau
    - Défauts postulés
  - Méthode de traitement, critères inchangés
    - ⇒ **Acceptables**
  - Compléments d'analyse demandés pour valider les chargements pris en compte
    - + Mesures compensatoires
- **Dossiers validés : les analyses transmises au 30/11**
- Tous réacteurs 900 MWe sauf : FES1, BUG4, TRI4
- **Programme sacrificiel nécessaire pour affiner les hypothèses**



# Annexes

# Qu'est-ce qu'une ségrégation ?

- Examen Macrographique par empreinte au soufre (Baumann) d'une ségrégation de carbone dans une calottes sacrificielle

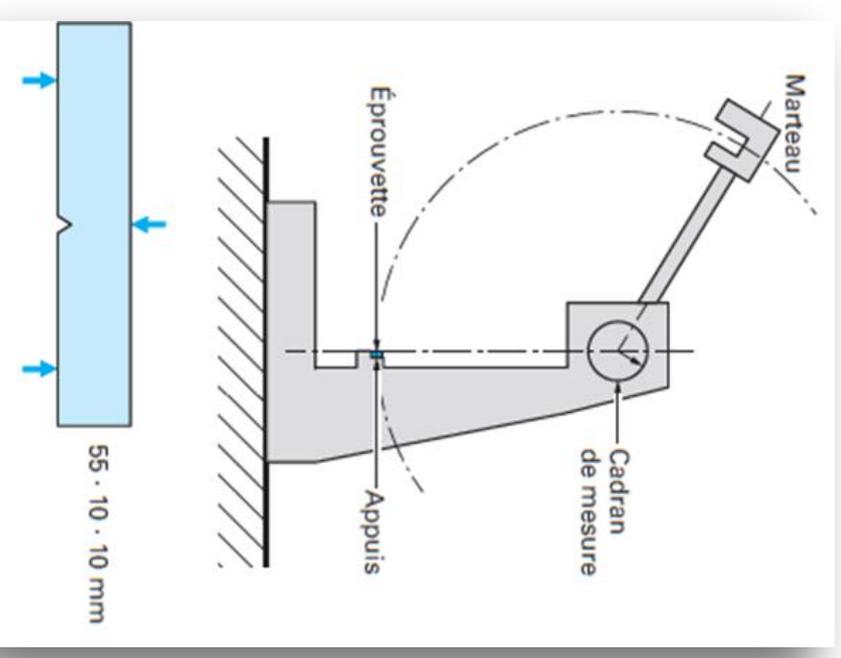
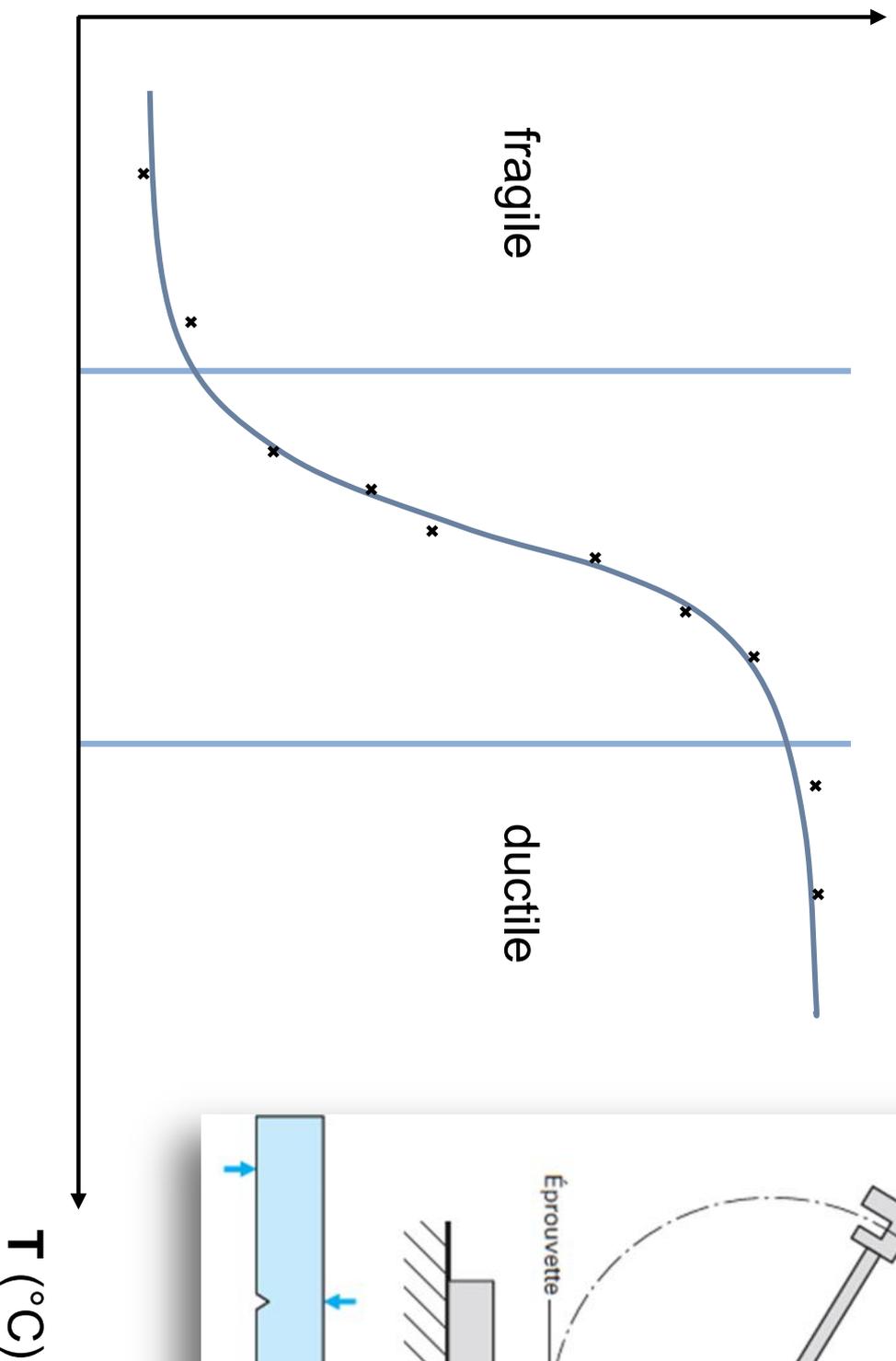


Crédits photo : AREVA

# Résistance à la rupture = résilience

Énergie de rupture

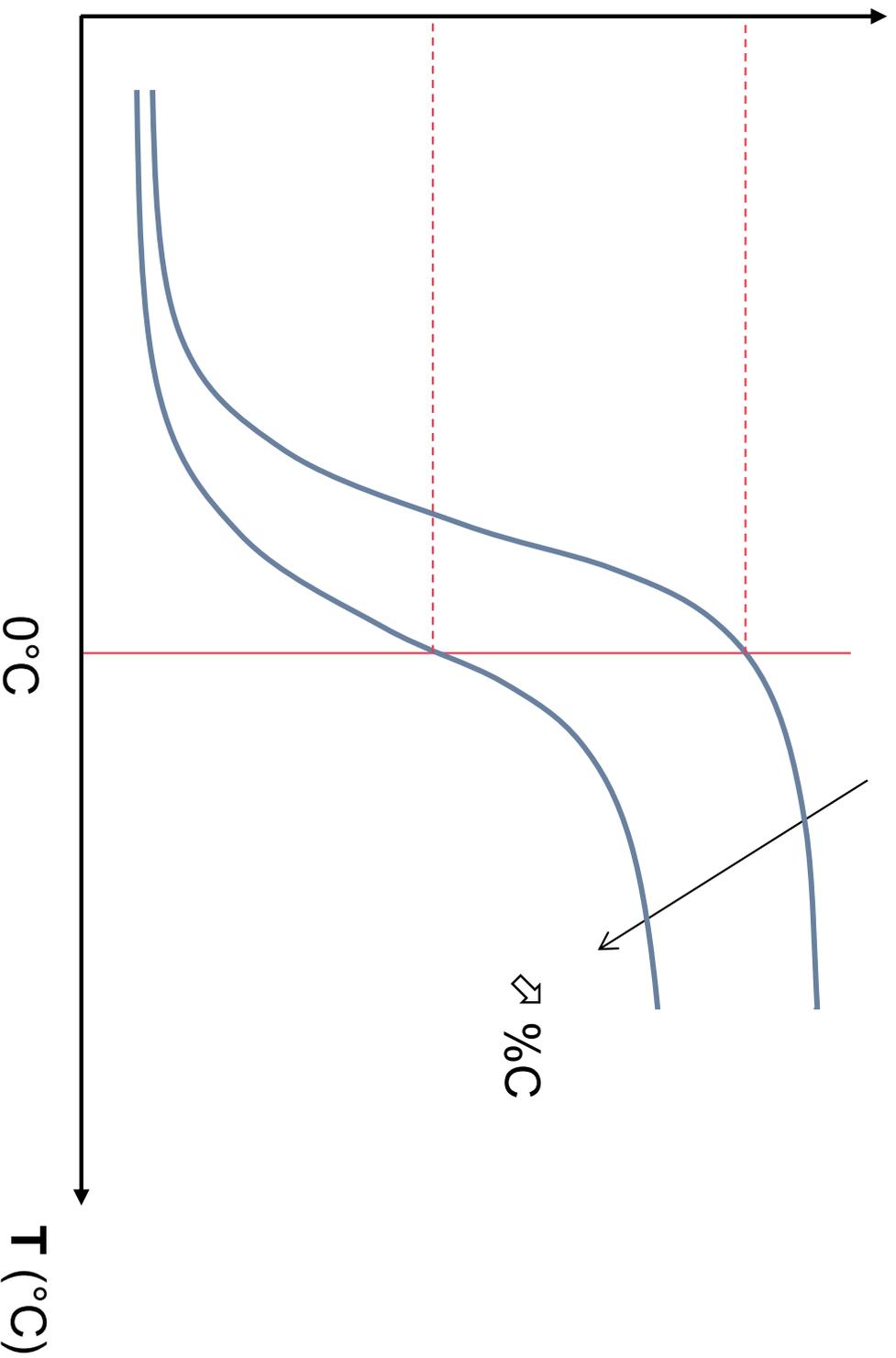
$K_{cv}$  (J)



# Influence du taux de carbone (% C)

Énergie de rupture

$K_{cv}$  (J)



# Conception : quelles études impactées ?

## ■ Baisse de résilience

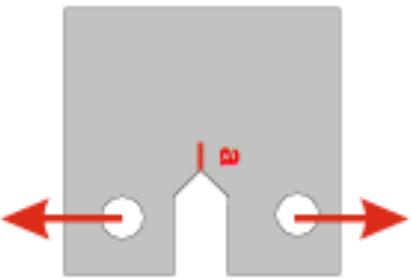
- ↗ ductilité
- ↗ tolérance à la présence de défauts
- Mais...
  - Résilience  $\neq$  propriété intrinsèque du matériau
  - Pas de vérification mécanique possible

## ■ Résilience = indicateur de la ductilité et de la tolérance aux défauts

## ■ Prévention du risque de rupture

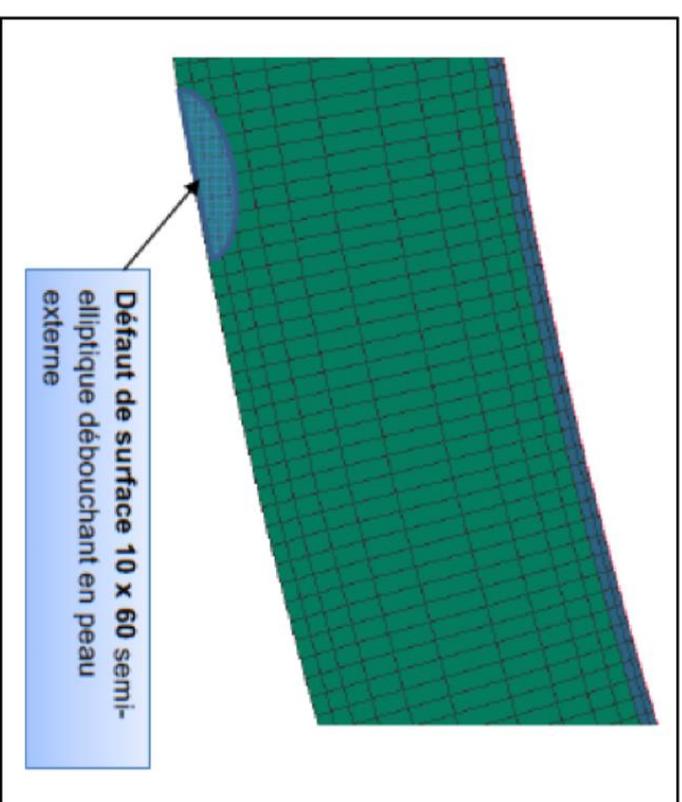
- Ténacité
  - Capacité intrinsèque d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure

# Conception : quelles études impactées ?



$\sigma_c$  : rupture

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

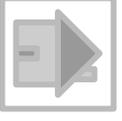
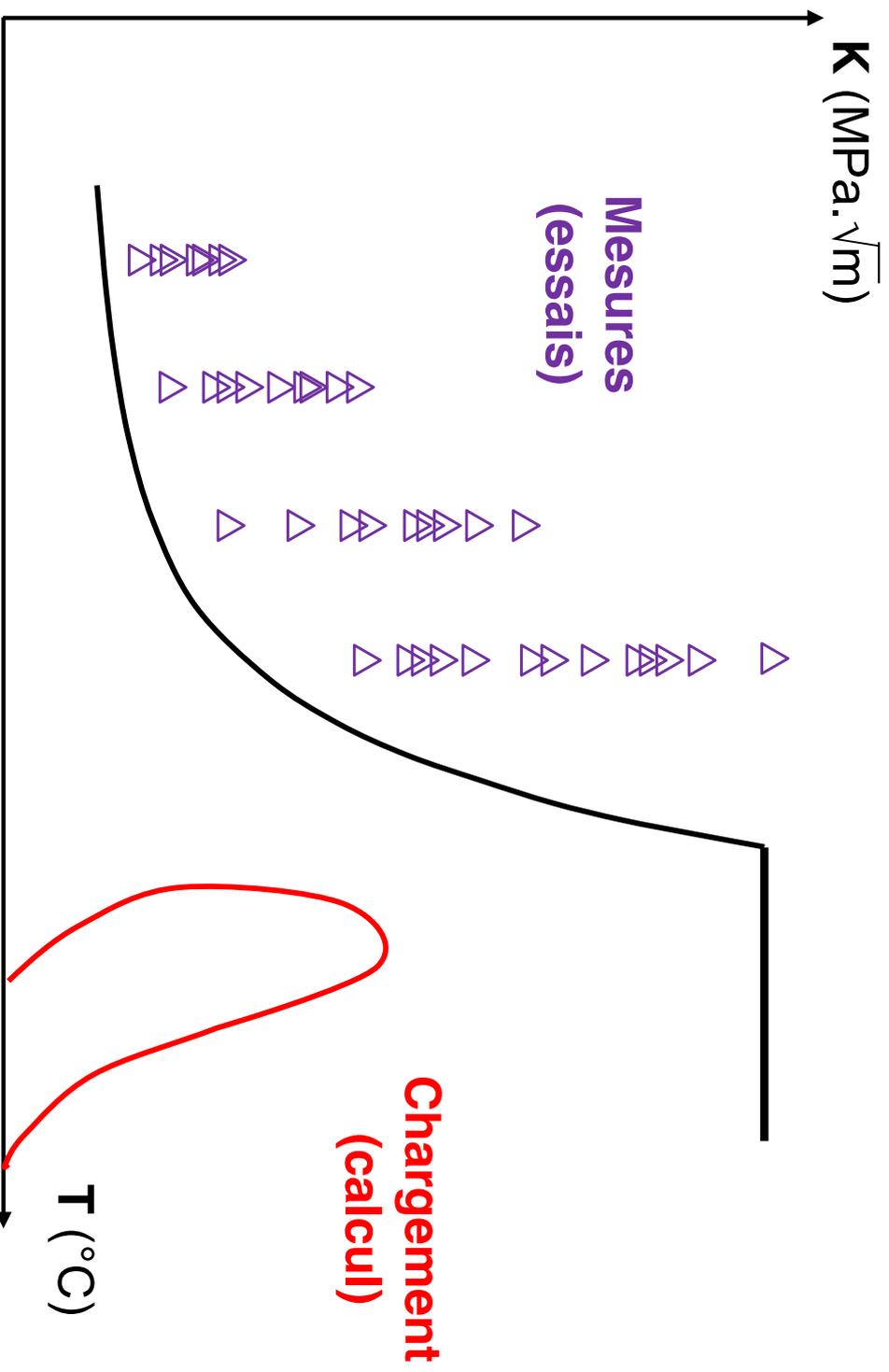


Mesure de la force nécessaire à la propagation de la fissure : ténacité

Calcul des contraintes induites par un défaut postulé dans une structure

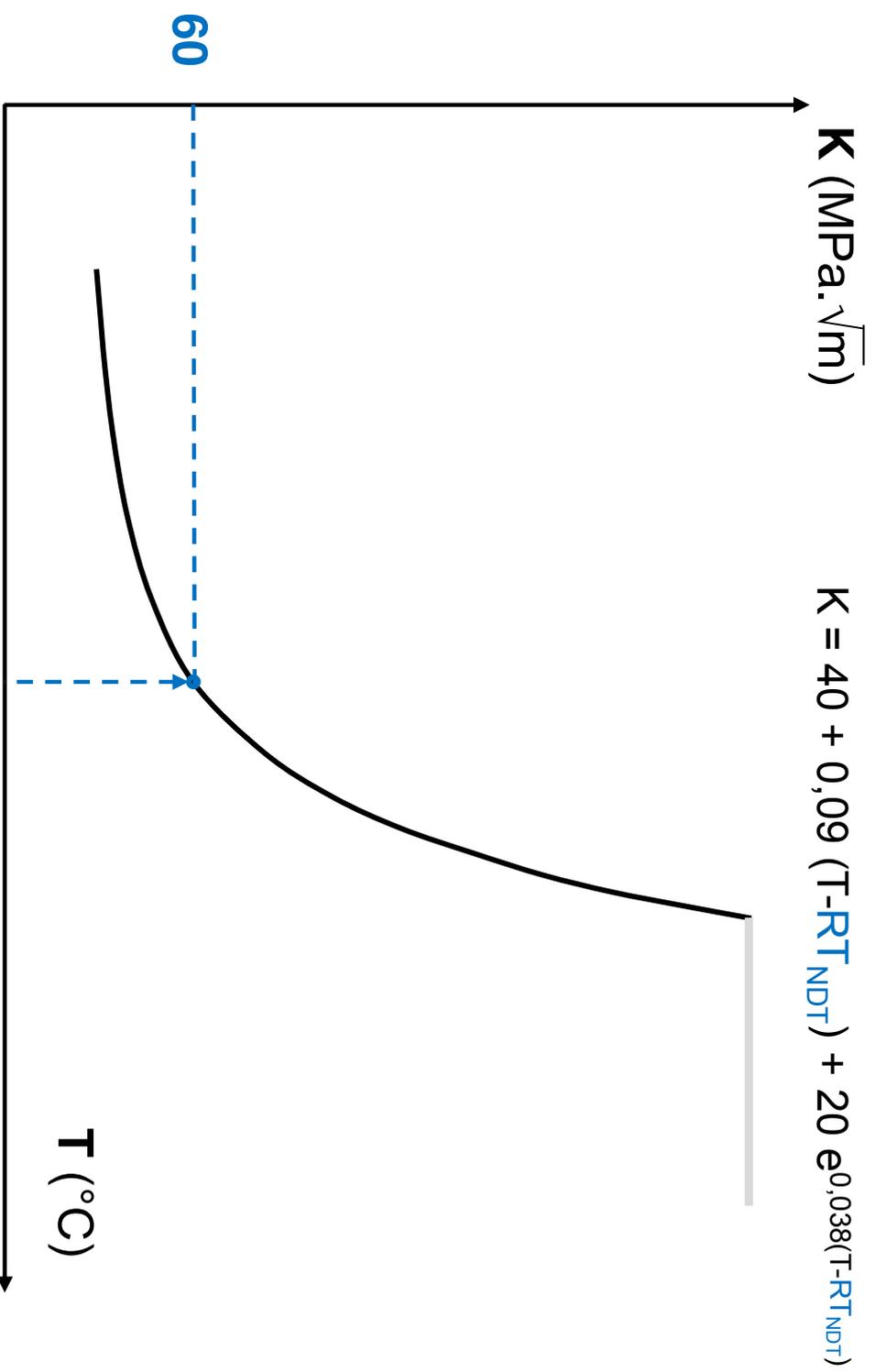


# Conception : quelles études impactées ?



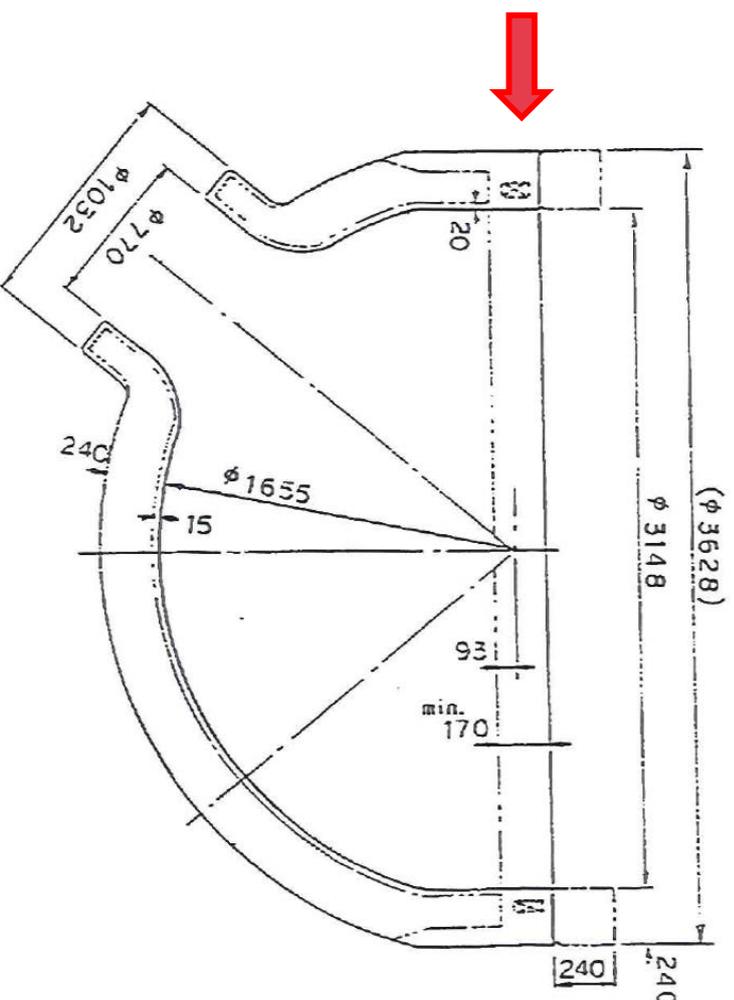
# Qu'est-ce qui a été pris en compte à la conception ?

- Courbe de ténacité = f(T) [RCC-M, annexe ZG 6110]

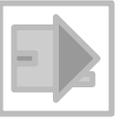


# Qu'est-ce qui a été pris en compte à la conception ?

- RT<sub>NDT</sub> déterminée sur des coupons prélevés en **zones de recette**



- Approche acceptable uniquement si le matériau est **homogène** dans tout la pièce (RCC-M)

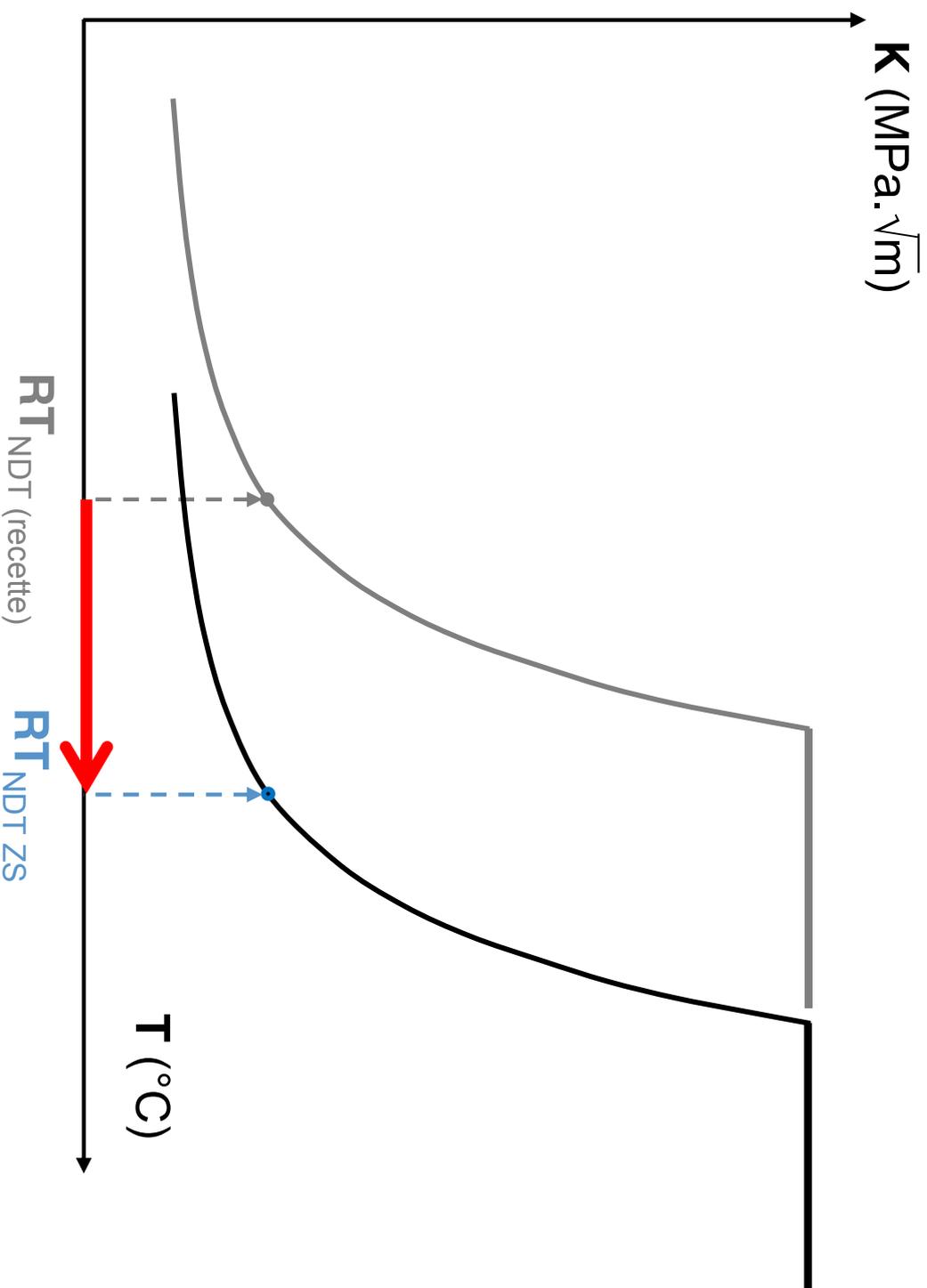


# GV et réacteurs concernés

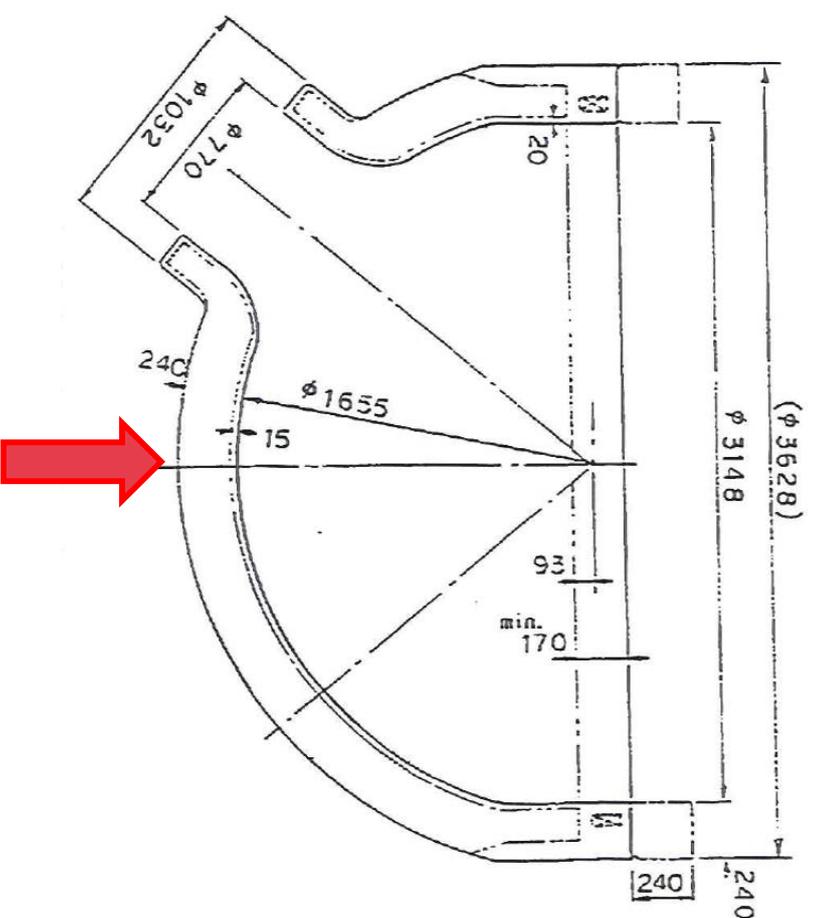
		Ségrégations fond primaire		
		Nb GV concernés		
		ACF	JCFC 90T	JCFC 120T
900		Blayais 1	3	
		Bugey 4	1	2
		Chinon B1	3	
		Chinon B2	3	
		Dampierre 2	3	
		Dampierre 3		2
		Dampierre 4	3	
		Fessenheim 1		3
		Gravelines 2		1
		Gravelines 4		3
		Saint Laurent B1		2
		Saint Laurent B2	3	
		Tricastin 1		3
		Tricastin 2		2
		Tricastin 3	1	1
		Tricastin 4		3
N4		Civaux 1		2
		Civaux 2		2
			20	8
				18
			Total GV	46
			8	4
				8
			Total Réacteurs	18



# Décalage de $RT_{NDT}$

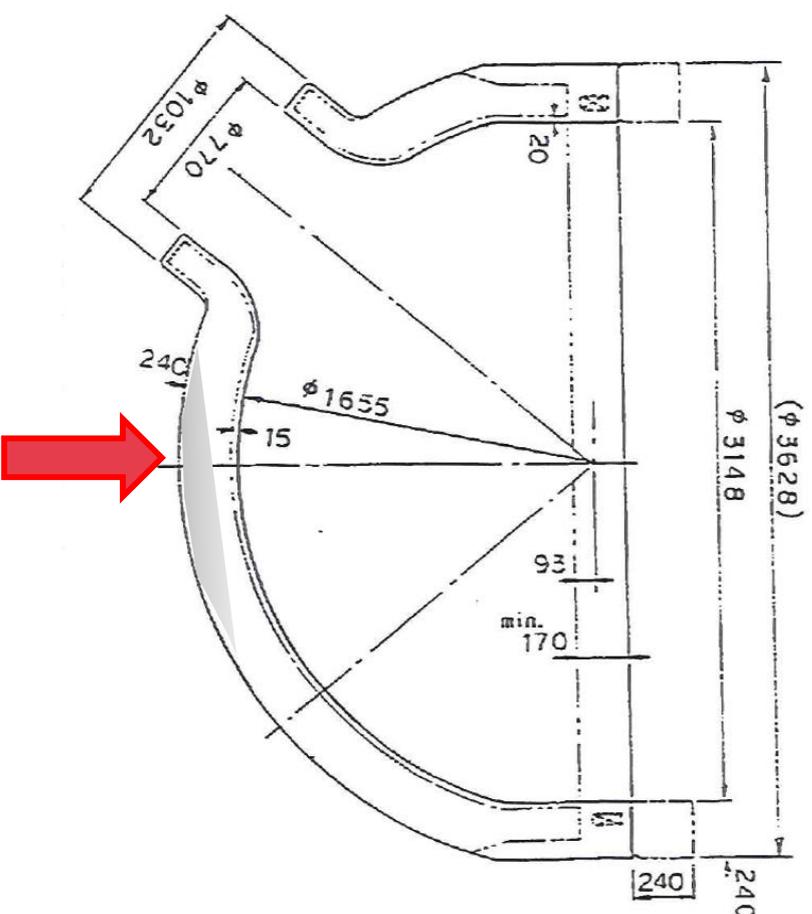


# Position des défauts en zone courante



# Chargements à considérer

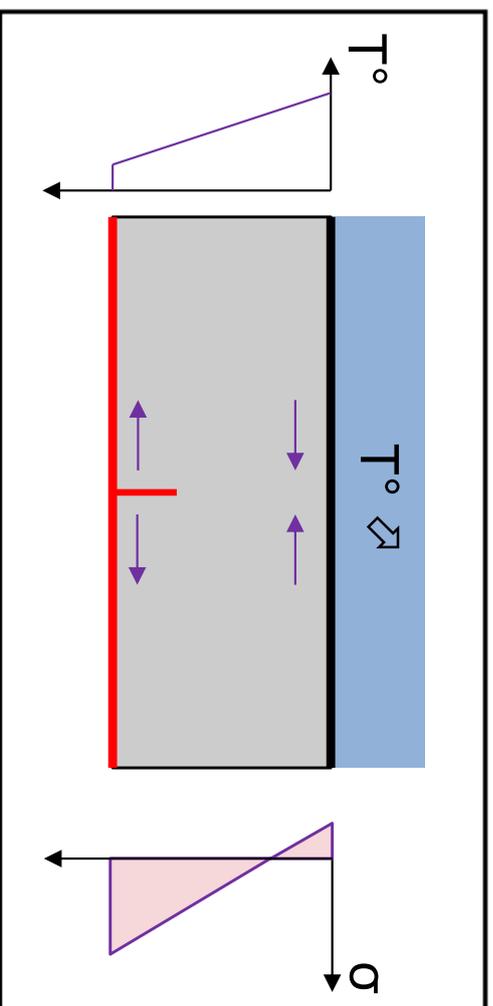
- Défaut postulé dans la zone ségréguée : i.e. en peau externe



# Chargements à considérer

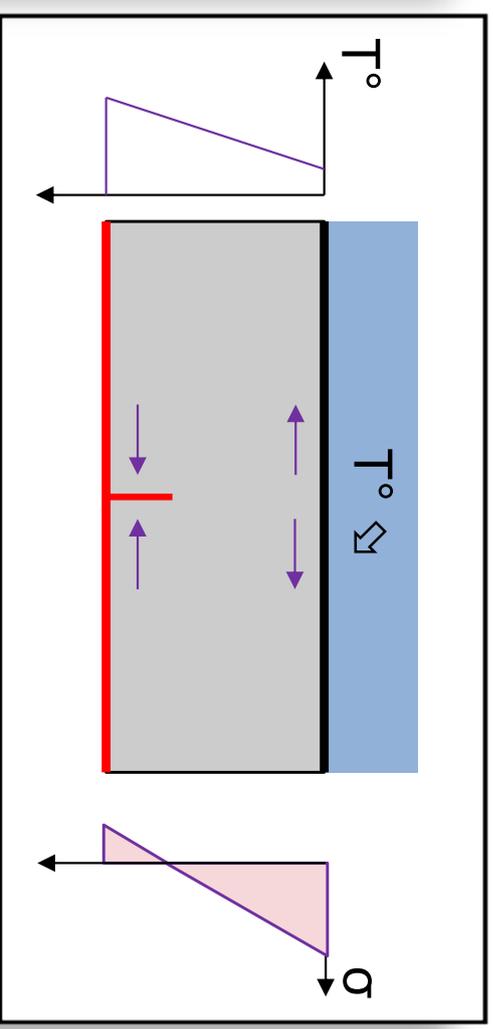
⇒ Défaut postulé en **peau externe**

Échauffement de l'eau



⇒ Ouverture du défaut

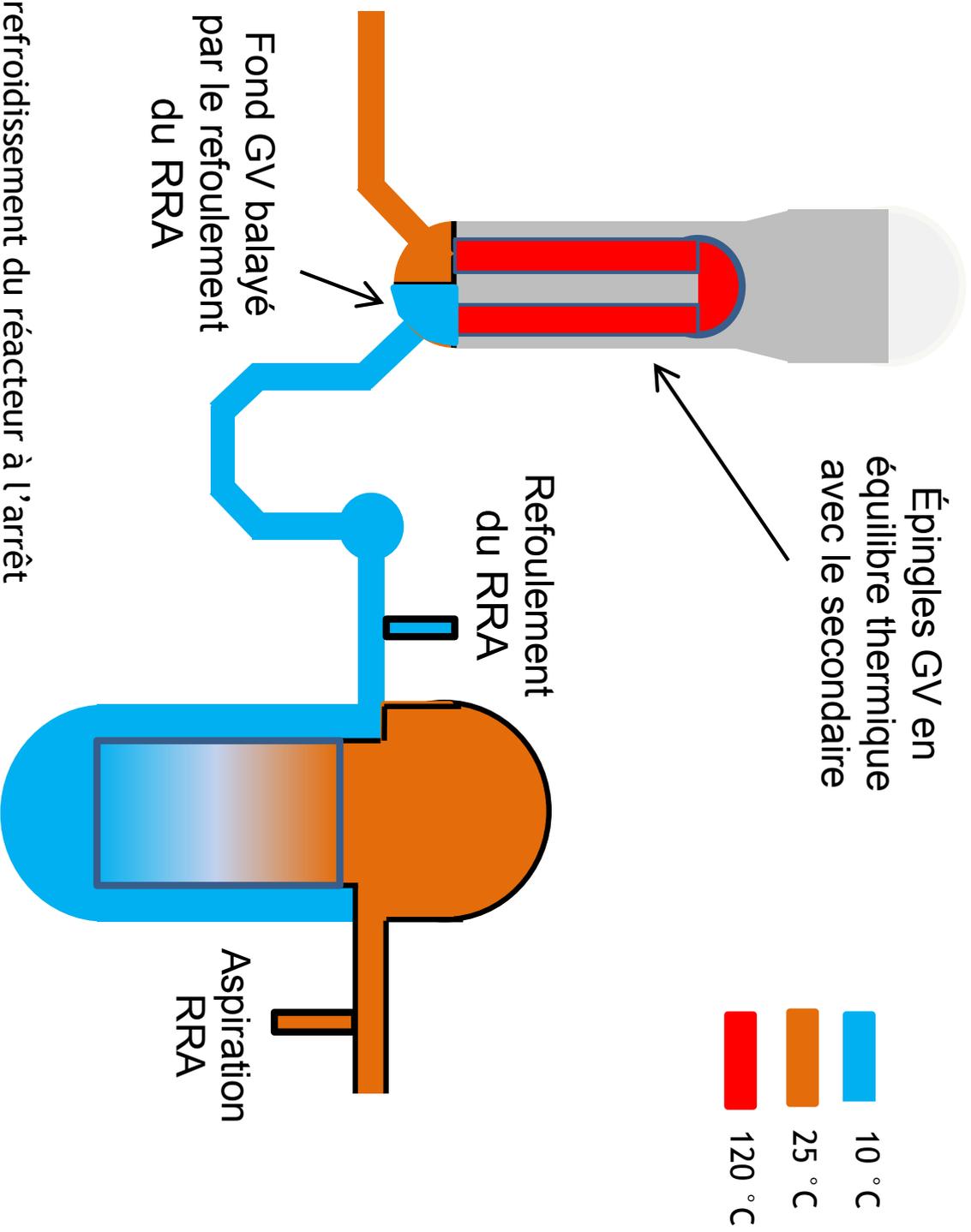
Refroidissement



⇒ Fermeture du défaut



# Exemple de situation de choc chaud



RRA : circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt



### Prescription 5.7.c

L'arrêt du dernier GMPP doit être réalisé dans les conditions suivantes :

- La température du primaire doit être supérieure à 35°C,
- L'écart de température entre les branches froides et la température de refoulement du RRA doit être inférieure ou égale à 10°C.

Suite à l'arrêt du dernier GMPP, la baisse de température ne sera entreprise qu'après avoir baissé la pression primaire à la valeur limite du domaine d'exploitation (4 bar relatifs).

### Mesures compensatoires à garantir pour la mise à l'arrêt

Lors de la confirmation du noyage de la bulle au pressuriseur, s'assurer que conformément aux prescriptions déclinées dans les RCN AR1 (séquences 4 et 5), les vannes d'aspersion principales sont ouvertes afin d'homogénéiser les températures pressuriseur et primaire :  $|T_{\text{phase liquide PZR}} - T_{\text{RIC}}| < 15^{\circ}\text{C}$ .

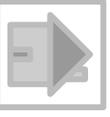
En cas d'inefficacité de l'aspersion normale, utiliser l'aspersion auxiliaire si  $T_{\text{phase liquide PZR}} - \min(T_{\text{RCV}}, 20^{\circ}\text{C}) < 20^{\circ}\text{C}$ . Si ce critère n'est pas vérifié, remonter la température RCV (lue sur RCV 019 MT) au-dessus de 20°C et continuer à refroidir le PZR jusqu'à  $T_{\text{phase liquide PZR}} < 40^{\circ}\text{C}$ .

En fonctionnement normal, les pompes RCP 002 et 003 PO doivent être arrêtées à une température proche de 60°C (ou dès la phase de purification primaire terminée).

RCP 001 PO doit être la dernière à être arrêtée (voir également prescription 5.7.c des RCN) dans les conditions suivantes :

- La température au refoulement des pompes RRA doit être maintenue au dessus de 30°C, et ce tant que le circuit primaire est pressurisable,
- Les GV sont en équilibre thermique : l'écart entre les températures métal des GV (ou lignes vapeur) et la température refoulement RRA est inférieur à 30°C ( $T_{\text{métal GV}} - T_{\text{aval RRA}} < 30^{\circ}\text{C}$ ).

Dès qu'un GMPP est arrêté, la cellule de son moteur doit être débroschée pour se prémunir d'une remise en service inappropriée.

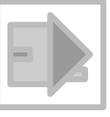


# Mesures compensatoires

## Mesures compensatoires à garantir au redémarrage

L'application des mesures compensatoires ci-dessous garantissent la prévention des transitoires décrits dans les sections IV.2.1 à IV.2.3.

- Avant démarrage du premier GMPP, RCP 001 PO, s'assurer que :
  - T refoulement RRA > 30°C,
  - Écart de température amont/aval RF RRA < 30°C par réglage de RRA 012 VP,
  - GV en équilibre thermique : l'écart entre les températures métal des GV (ou lignes vapeur) et refoulement RRA est inférieur à 30°C ( $T_{\text{métal GV}} - T_{\text{AVL RRA}} < 30^\circ\text{C}$ ).
- Après démarrage du premier GMPP :
  - Après démarrage de RCP 001 PO, chauffer le circuit primaire avec un gradient de température ne dépassant pas 14°C/h jusqu'à ce que la température branche froide soit supérieure à 60°C,
  - Mettre en service les autres GMPP lorsque la température primaire branche froide est supérieure à 60°C.



# Contrôles sur site : Ressuage, TOFD

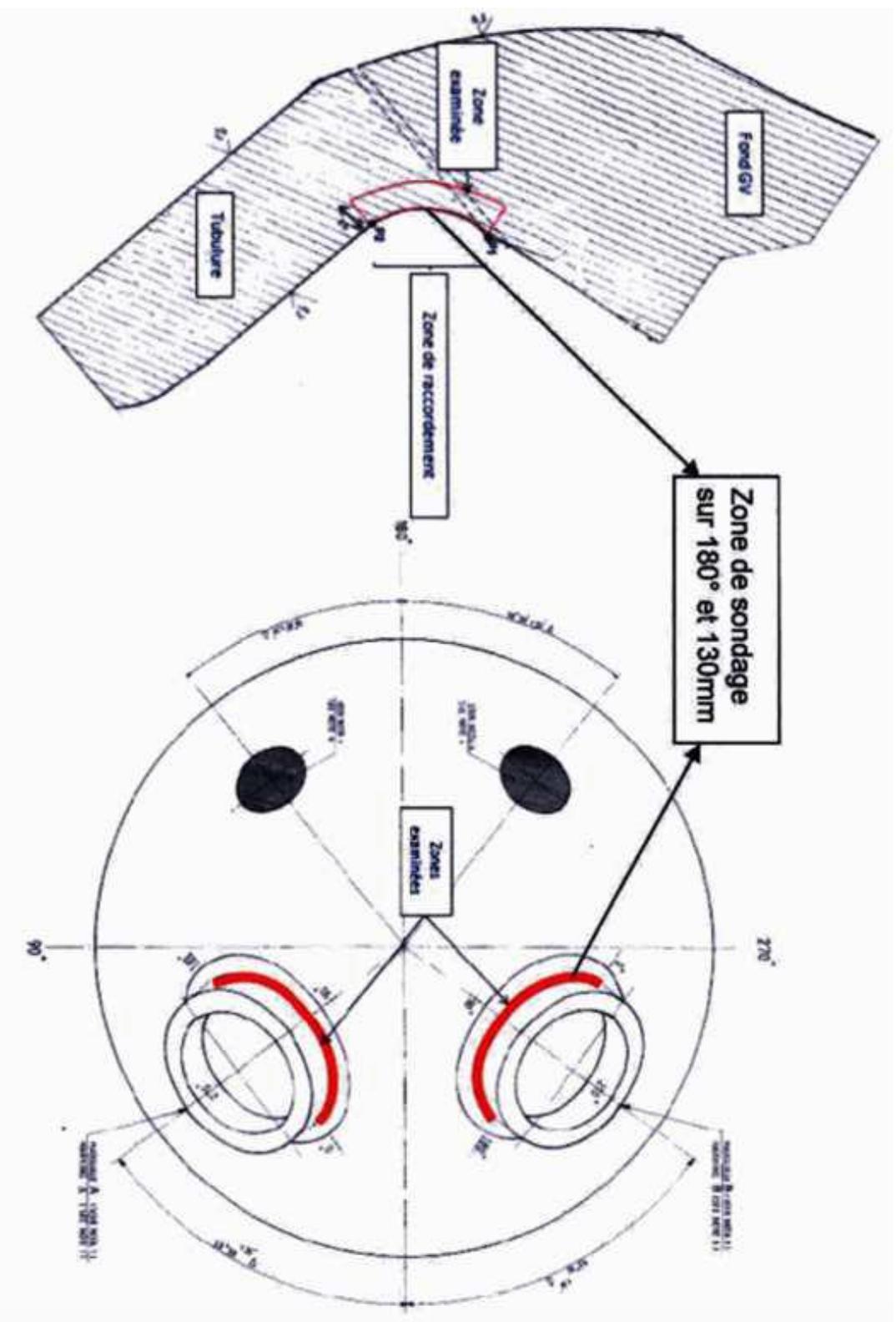


Crédit s photo : EDF

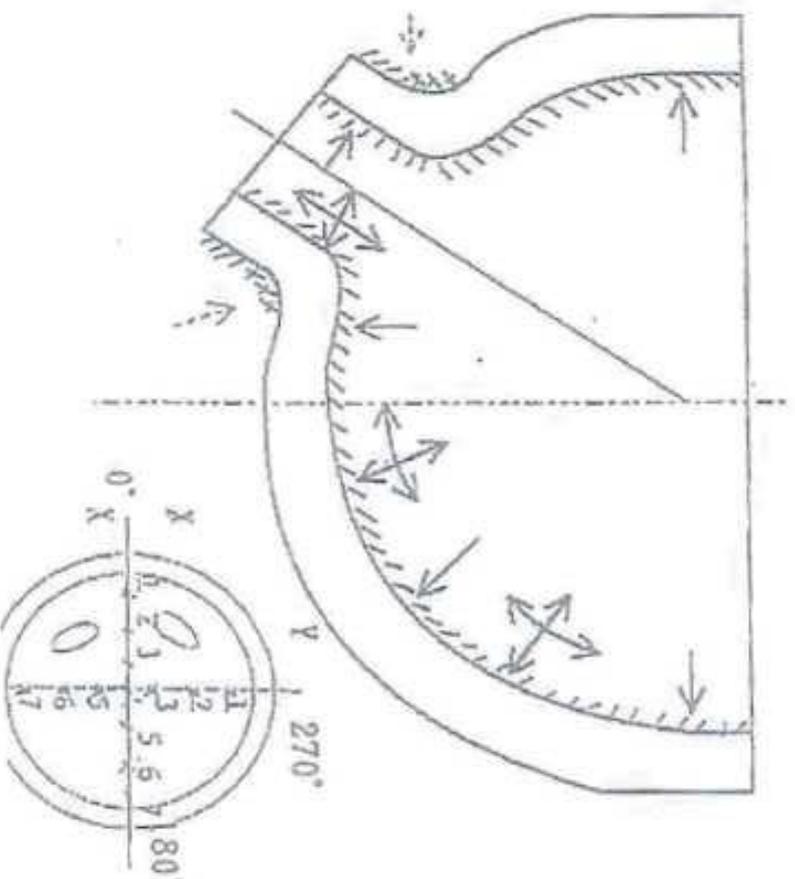


Crédits photo : EDF

# Contrôles complémentaires tubulaires



# Rappel : contrôles fabrication



## 1. Examination areas

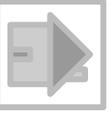
Entire Inner surface & Outer Surface  
of Nozzle(/// Parts)

(xxx Paris : MWB45-2(E))

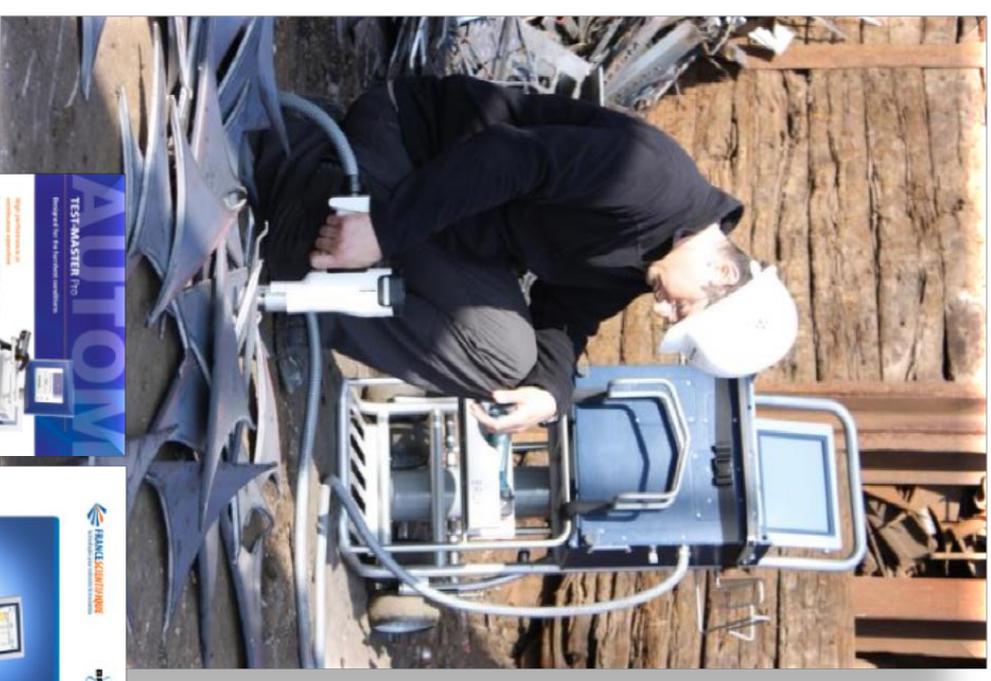
## 2. Beam Direction

a) Straight Beam method : 

b) Angle Beam method : 



# Spectrométrie d'émission optique portative

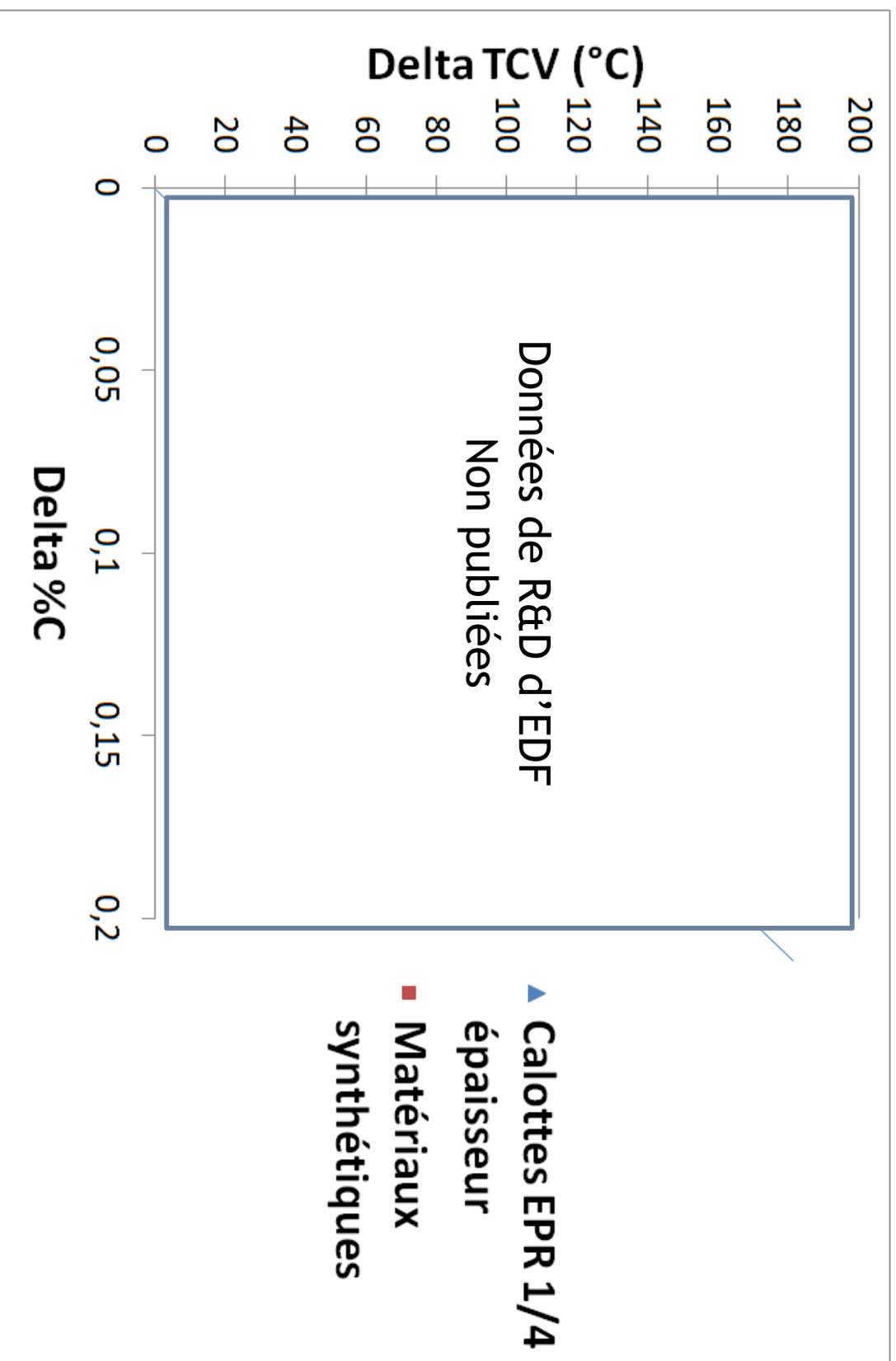


Product information for two portable optical emission spectrometers:

- AUTOM TEST-MASTER Pro**: A portable optical emission spectrometer for field use. It features a large screen, a keyboard, and a printer. It is designed for easy operation and is suitable for a wide range of applications.
- Q4 MOBILE**: A portable optical emission spectrometer for field use. It features a large screen, a keyboard, and a printer. It is designed for easy operation and is suitable for a wide range of applications.



# Données d'extrapolation



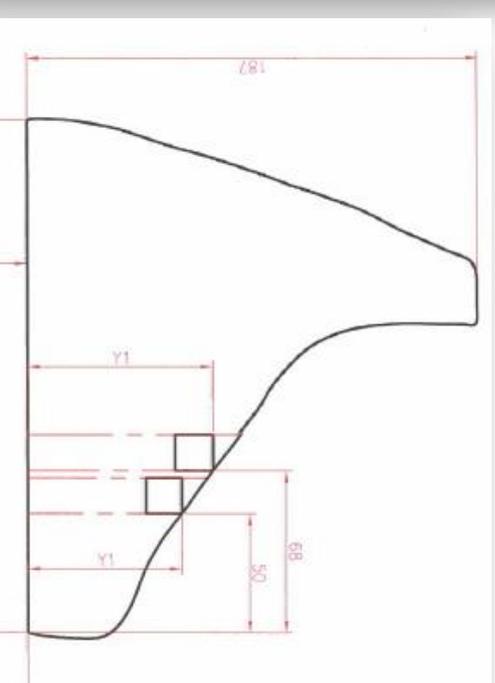
# VB3335-B - Masselotte



Crédits photo : AREVA

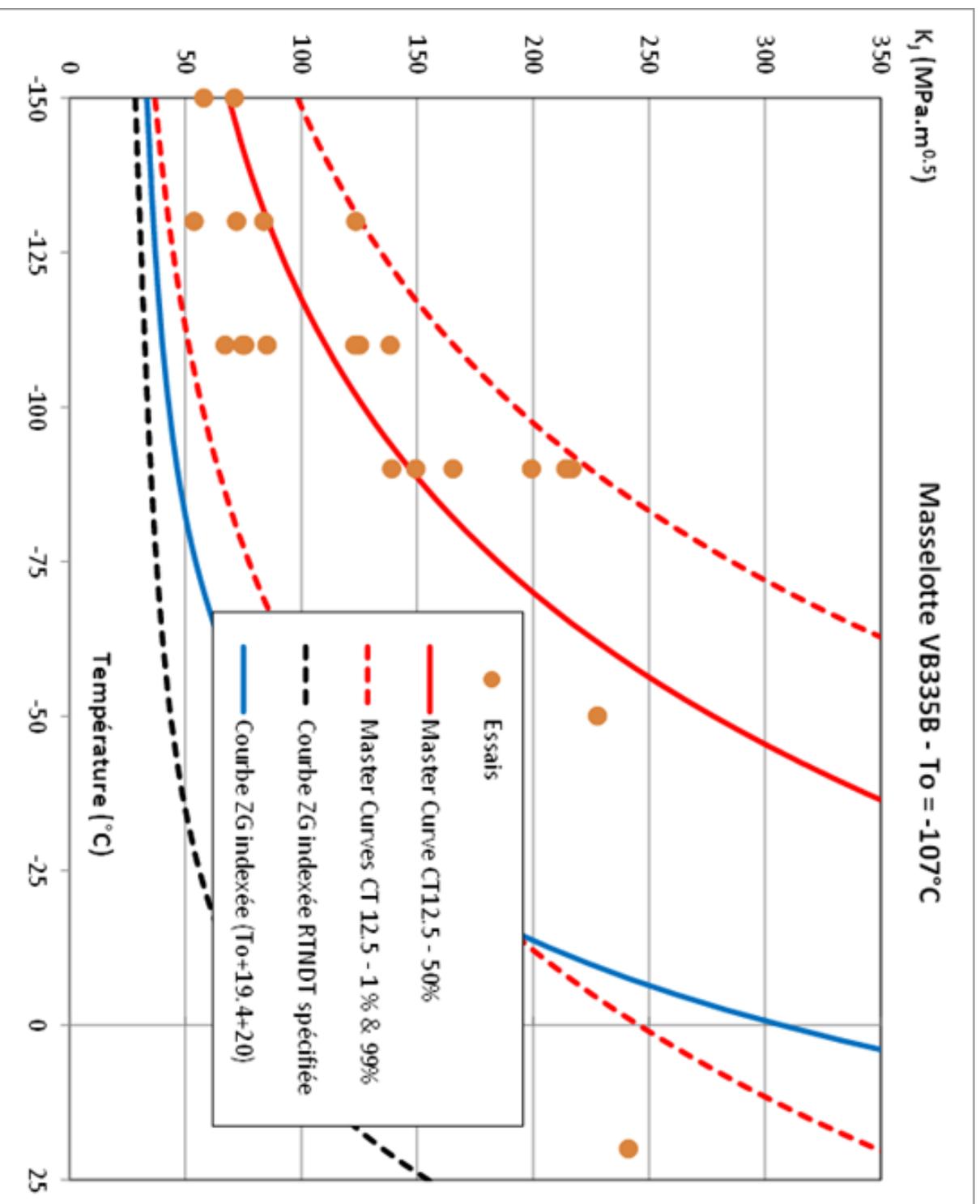


Crédits photo : AREVA





# Résultats : essais de ténacité

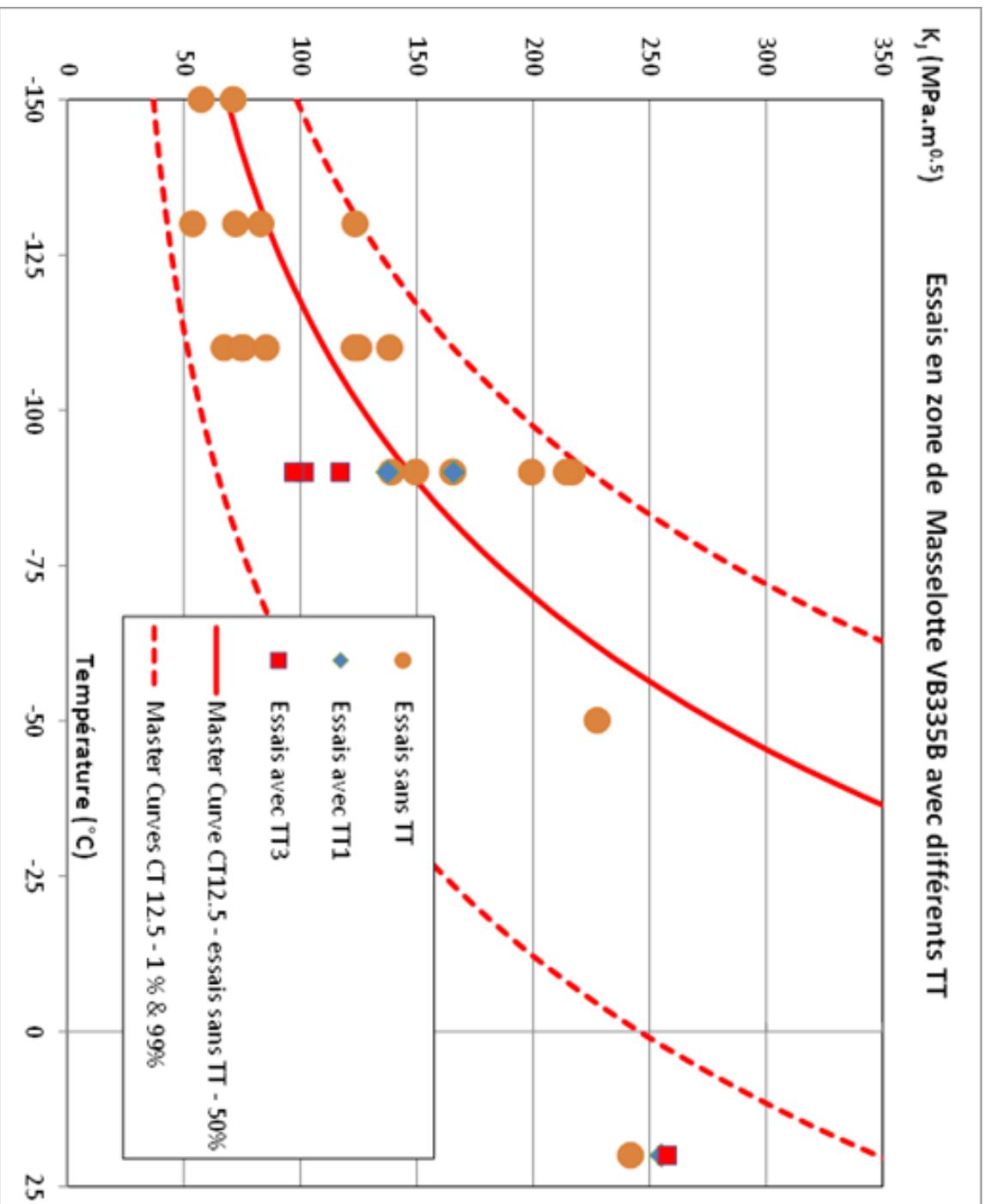


# Influence de l'effet de trempe

Tableau 3 : Vitesse de trempe des échantillons de masselotte de la VB335-B ayant fait l'objet d'essais de ténacité

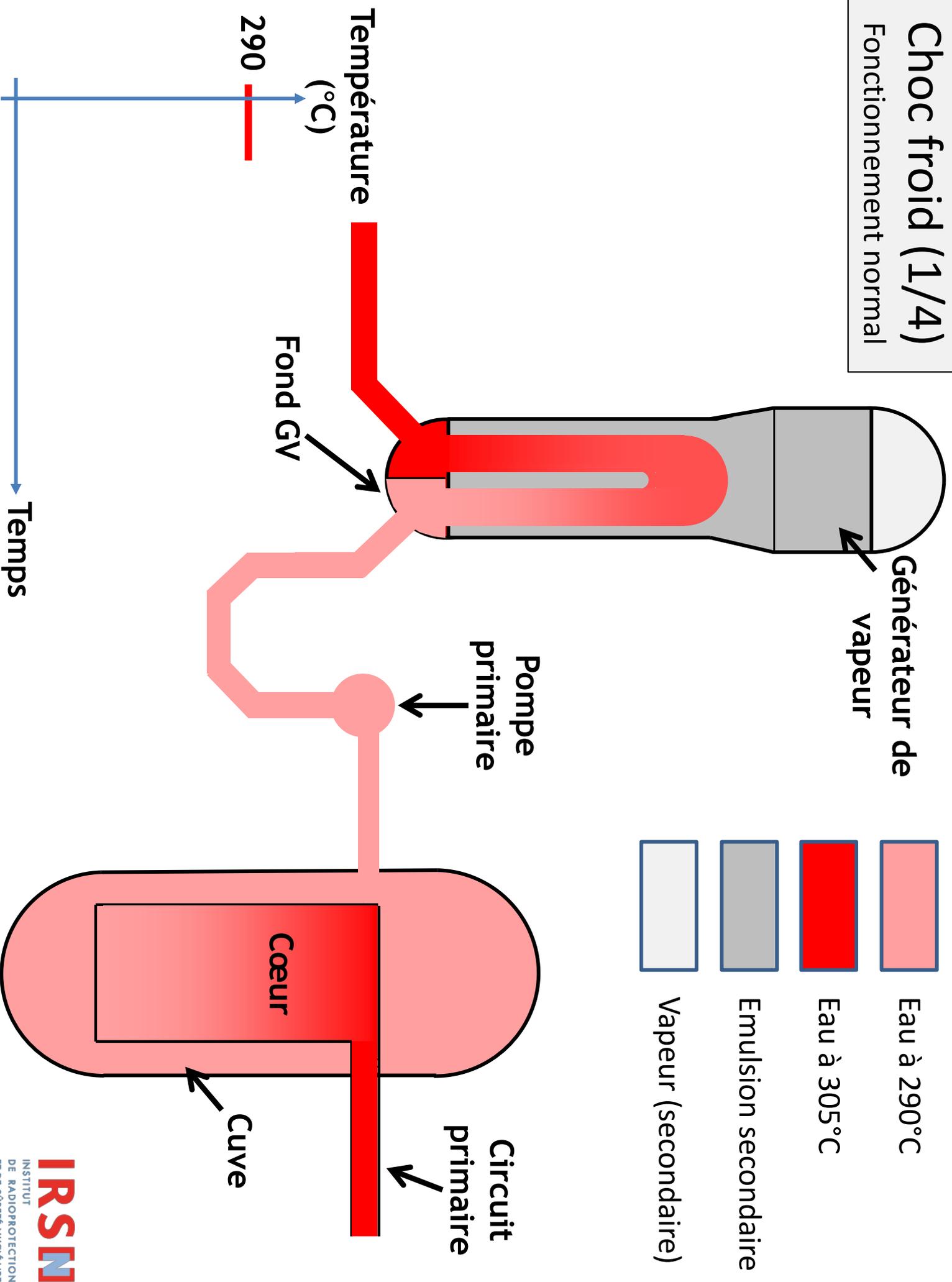
Essais de ténacité	1 <sup>er</sup> lot	2 <sup>e</sup> lot	3 <sup>e</sup> lot
Traitement thermique complémentaire	Sans	TT1	TT3
Nb essais	21	3	4
Vitesse de trempe	> 7000 °C/h (Peau)	3000 °C/h	2400 °C/h (~1/4 T)
Teneur en carbone	0,38 % à 0,46 % Moyenne = 0,42%	0,39% et 0,40 %	> 0,43 %

# Influence de l'effet de trempe



# Choc froid (1/4)

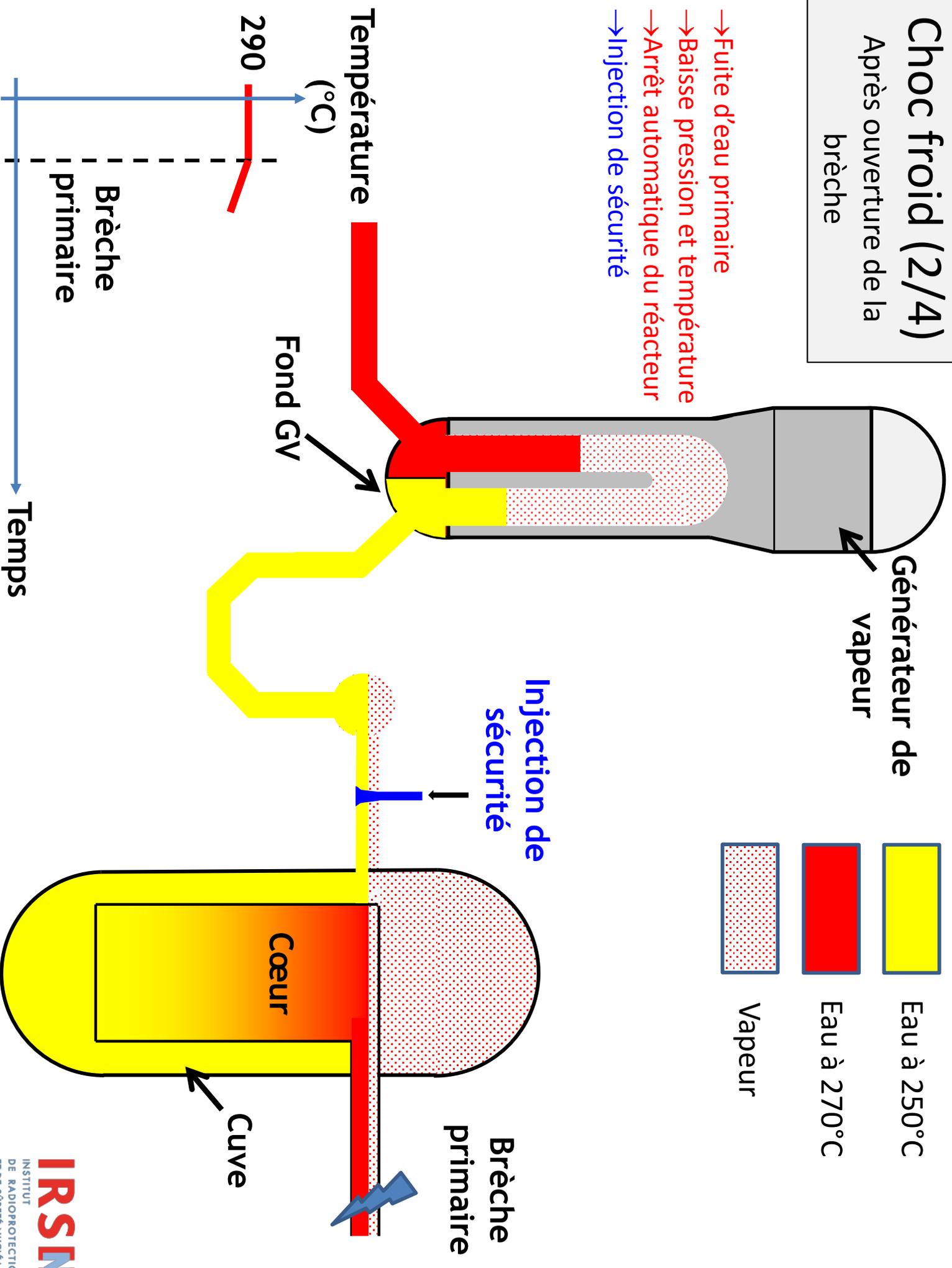
Fonctionnement normal



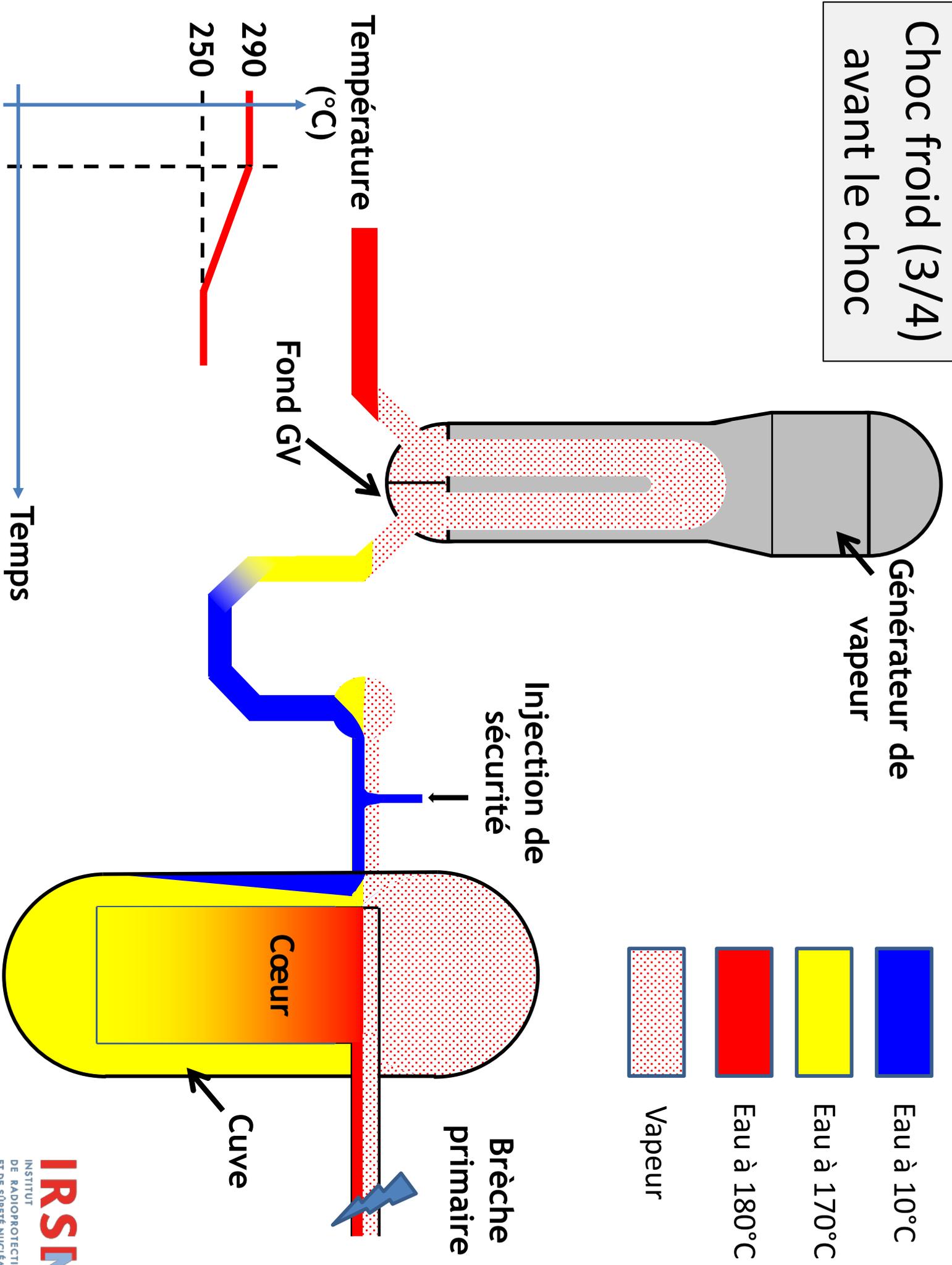
# Choc froid (2/4)

Après ouverture de la brèche

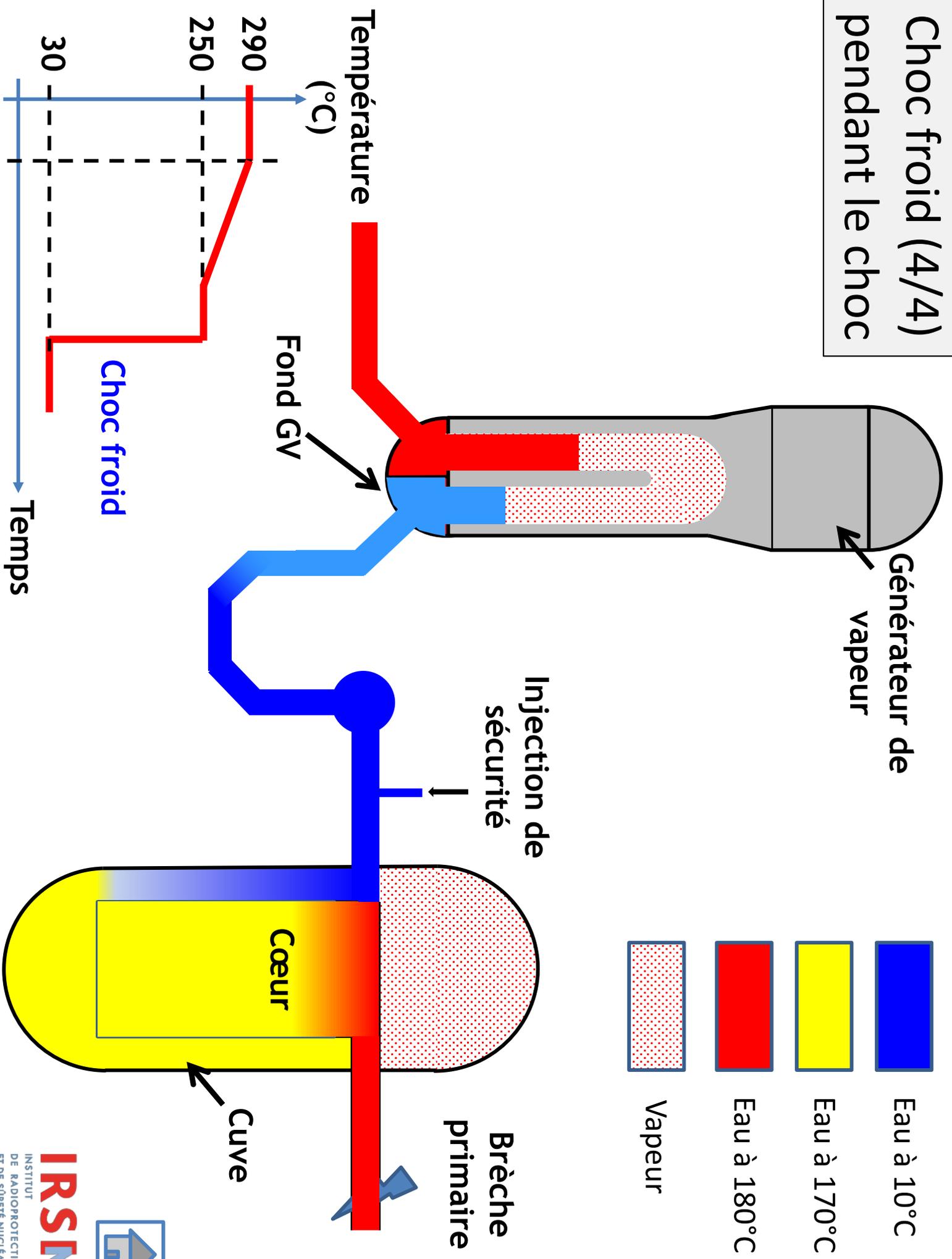
- Fuite d'eau primaire
- Baisse pression et température
- Arrêt automatique du réacteur
- Injection de sécurité



# Choc froid (3/4) avant le choc



# Choc froid (4/4) pendant le choc



# Recommandations (in extenso)

## Recommandation n° 1

- L'IRSN recommande qu'EDF définisse, sous six mois, une caractérisation enveloppe des situations de petite brèche primaire (avec et sans reprise de la circulation naturelle), de suppression primaire à froid ainsi que de toutes les situations faisant appel à la conduite en « gavé-ouvert », pour couvrir les chocs froids potentiels correspondants sur les fonds de GV, et réévalue les facteurs de marge associés en justifiant le conservatisme des hypothèses et de la méthode de calcul retenues.

## Recommandation n° 2

- L'IRSN recommande qu'EDF retienne des dispositions visant à diminuer la probabilité d'un redémarrage inopportun d'une pompe primaire par l'opérateur à la suite d'un événement d'ouverture intempestive de la vanne qui régule le débit dans les échangeurs du circuit de refroidissement à l'arrêt ayant conduit à arrêter la pompe primaire en fonctionnement.

## Recommandation n° 3

- L'IRSN recommande qu'EDF définisse, sous un mois, une mesure compensatoire visant à limiter l'écart entre la température au refoulement du circuit de refroidissement à l'arrêt et la température de l'eau de l'alimentation de secours des générateurs de vapeur dans les situations où un cyclage de ces générateurs est mis en œuvre.



# Mesures compensatoires (choc froid)

■ Mesures à appliquer lors des arrêts de tranche dès lors que le circuit primaire est monophasique :

- mesure n° 1 : la vitesse de refroidissement du fluide primaire doit être inférieure à 14 °C/h jusqu'à l'arrêt de la dernière pompe primaire
- mesure n° 2 : en conduite normale, dès qu'une pompe primaire est arrêtée, la cellule de son moteur doit être débouchée pour se prémunir d'une remise en service inappropriée. Si le débit d'eau dans le circuit primaire est nul, il faut s'assurer que l'écart entre la température de l'eau injectée aux joints des pompes primaires et la « température du primaire » est inférieur à 15 °C
- mesure n° 3 : après arrêt de la dernière pompe primaire, la pression sera amenée à une valeur inférieure ou égale à 7 bar dans les plus brefs délais compatibles avec les contraintes d'exploitation (et notamment avec la réalisation des essais périodiques du chapitre IX des règles générales d'exploitation)

■ Mesure à appliquer lors des redémarrages de tranches : si les pompes primaires sont arrêtées, il faut s'assurer que l'écart entre la température de l'eau injectée aux joints des pompes primaires et la « température du primaire » est inférieur à 15 °C

