



SFEN

*La durée de fonctionnement
des enceintes de
confinement des réacteurs*

Lyon 2023



La durée de fonctionnement des enceintes de confinement des réacteurs

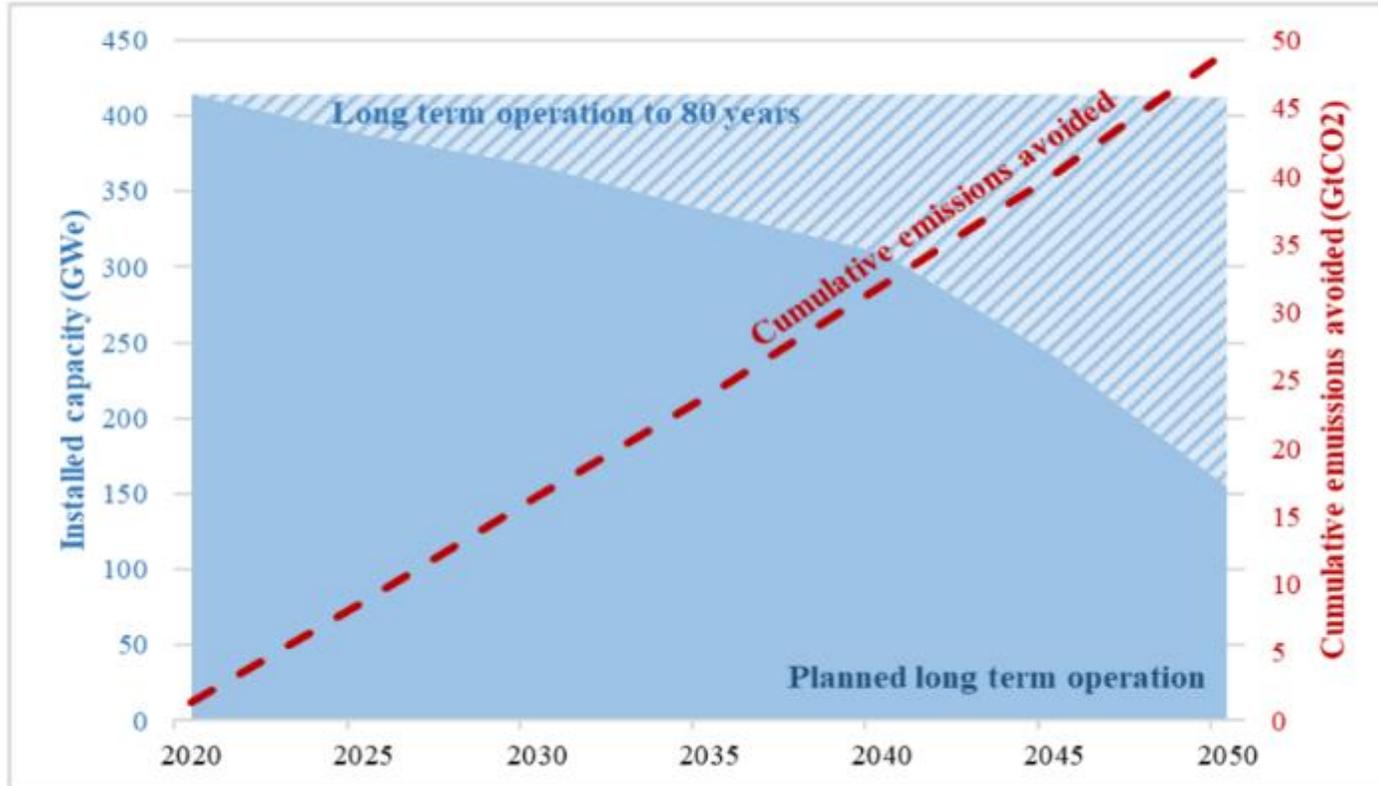


- **Pourquoi prolonger la durée de fonctionnement**
- **Comparaison des approches de ré évaluation de sûreté françaises et américaines**
- **Petits rappels**
 - **Sur nos enceintes**
 - **Sur le béton**
 - **Sur la précontrainte**
- **C'est à vous: quels mécanismes de vieillissement**
- **C'est à moi: quels mécanismes de vieillissement**
- **Le programme VERCORS pour répondre aux problématiques**
- **Les résultats**
- **Les travaux sur site**

Pour le climat



Installed capacity and cumulative carbon emissions avoided



Source: [NEA 2022](#)

Pour rester sur la trajectoire 1,5° du GIEC, prolonger le Parc US à 80 ans contribue à réduire les émissions de 10%

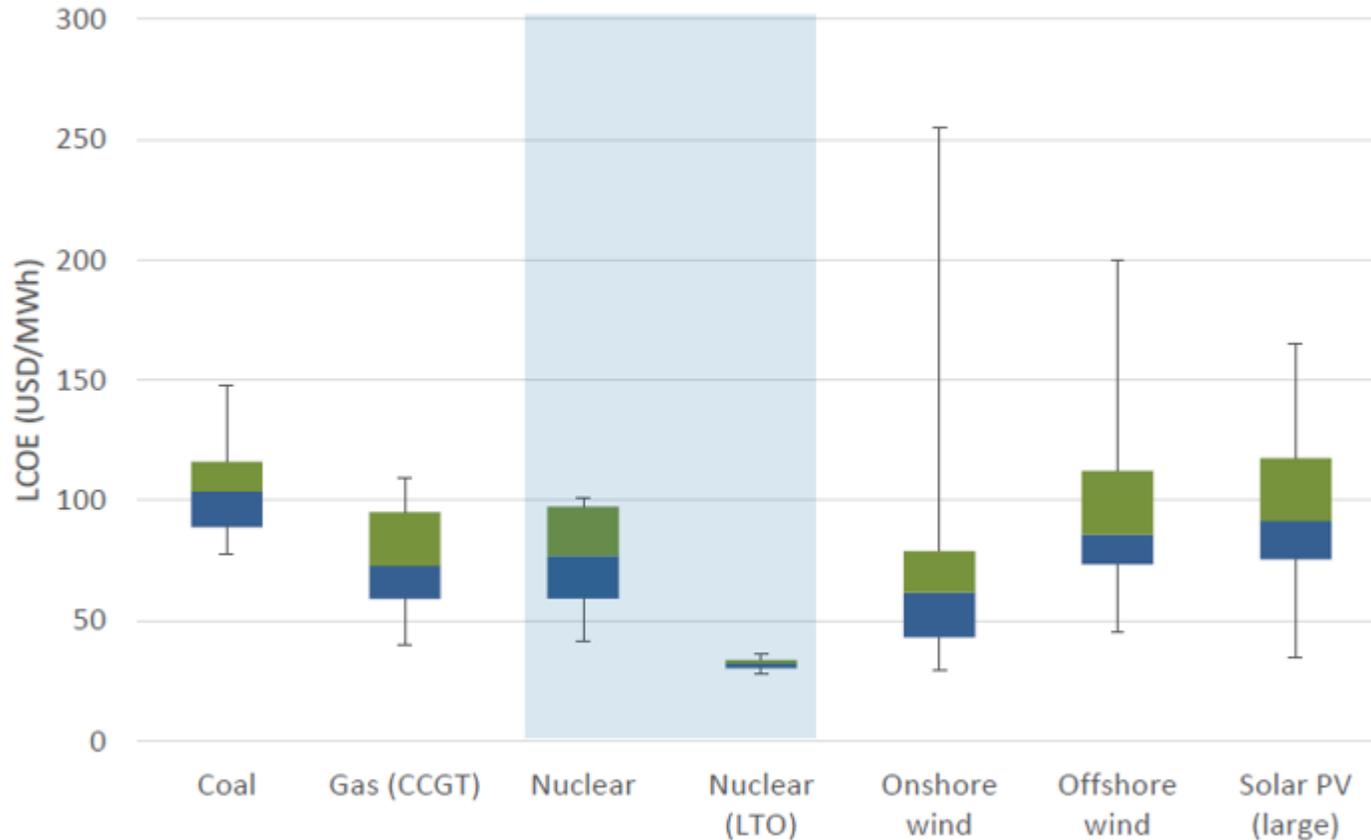
Situation encore plus favorable en France, où le Mix est déjà décarboné (évite donc de le re-carboner si on remplace le nucléaire par une source pilotable)

© EDF – reproduction interdite sans autorisation

Pour les finances



LCOE by technology, 2025



Note: Coal includes lignite plants. Discount rate of 7% and carbon price of USD30/tCO2
Source: [IEA/NEA, 2020](#)

- L'allongement de la durée de fonctionnement (LTO) est le plus rentable
- Les coûts du nucléaire existant sont fiables et prévisibles

DDF – comparaison US/FR



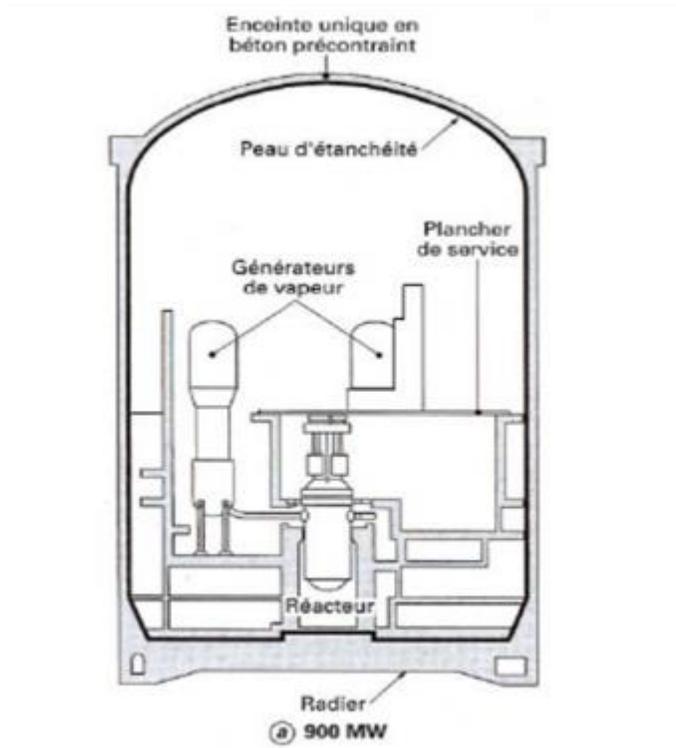
- Licence **initiale** pour **40 ans**
- Possibilité d'**extension de licence à 60 ans**, sur la base d'analyses **TLAA** (Time Limited Ageing Analysis), analyses de sûreté tenant compte des mécanismes de vieillissement des SSC (Systèmes Structures et Composants) et de la mise en place d'un programme de surveillance adapté **AMP** (aging management program)
- Démarche basée sur le **GALL** (Generic Aging Lessons Learned), donc sur le retour d'expérience
- Le **référentiel** est celui de la **construction**. Quelques évolutions à la marge suite à des événements majeurs (Fukushima)
- Possibilité d'une extension supplémentaire à **80 ans**

DDF – comparaison US/FR

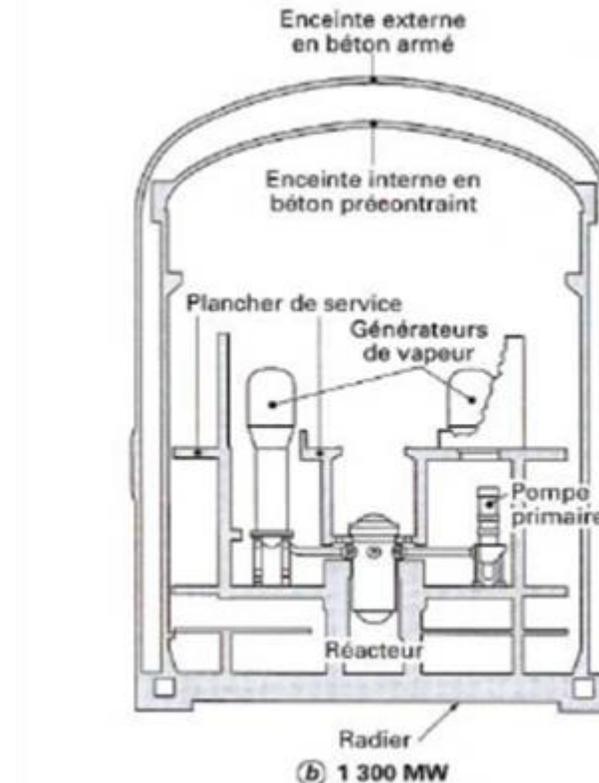


- Pas de durée de fonctionnement fixée à l'origine
- Une revue de la sûreté des tranches tous les 10 ans pour pouvoir exploiter 10 ans supplémentaires
- Les revues s'accompagnent de modifications pour se rapprocher du niveau de sûreté des réacteurs de dernière génération

Rappel: les enceintes françaises



Enceintes simples
Béton précontraint (résistance)
Liner métallique (étanchéité)



Enceintes Doubles
Béton précontraint (résistance et étanchéité)
Seconde enceinte pour collecter et filtrer les
fuites éventuelles

Rappel: les enceintes françaises



Tous les 10 ans, lors des épreuves décennales, on vérifie par une mise en pression à la pression accidentelle que l'enceinte respecte sont critère de fuite inscrit dans le Décret d'Autorisation de Création (DAC)

ESP: $DAC (0,3\%/j) \times 0,72 \text{Nikuradze} \times 0,75 \text{vieillissement} = 0,162\%/j$

EDP: $DAC (1,5\%/j) \times 1 \text{transposition} \times 0,75 \text{vieillissement} = 1,125\%/j$

NB: ESP (0,162%/j) et EDP (1,5%/j) → mêmes conséquences radiologiques en situation accidentelle

Le béton

Le béton est un matériau:

☐ composite
ciment + sable + granulats + eau + additifs

☐ poreux (donc pas parfaitement étanche)

☐ très résistant en compression



☐ peu résistant en traction



et fragile

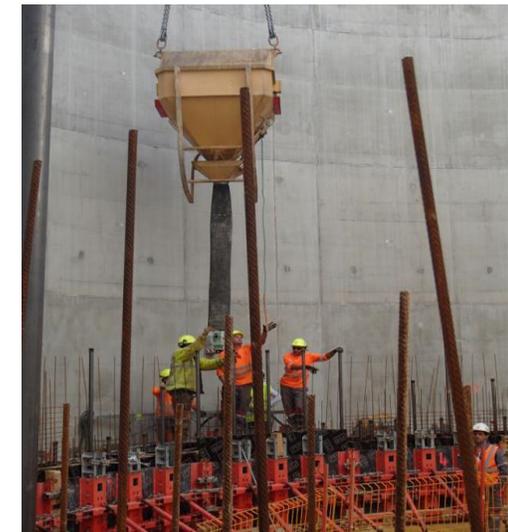
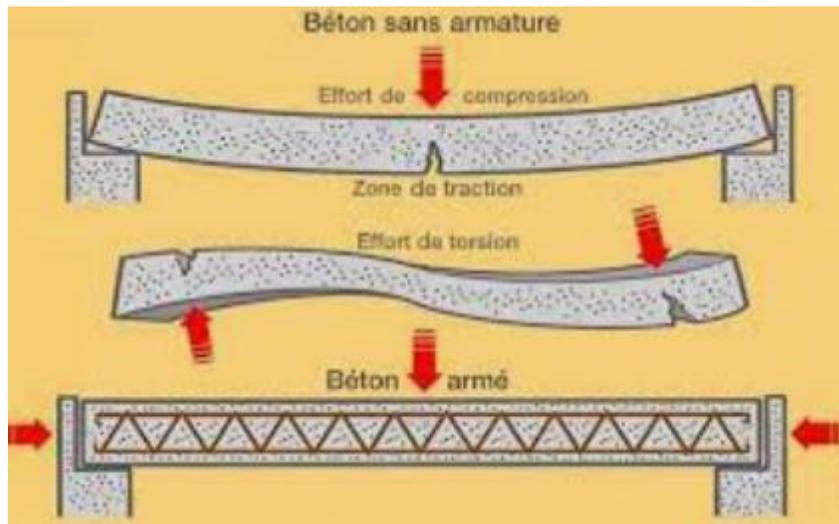
Matériel et matériaux Nécessaires
Pour la confection du béton



Le béton



Comme le béton est fragile en traction, on va le renforcer avec des aciers qui vont reprendre les efforts de traction et éviter la fracture du béton (mais pas la fissuration à partir d'un certain seuil)
C'est le **béton armé**, indispensable à toute construction



Comment concevoir une enceinte ?

En cas d'accident, la pression augmente dans l'enceinte, les parois vont être soumises à un effort de traction

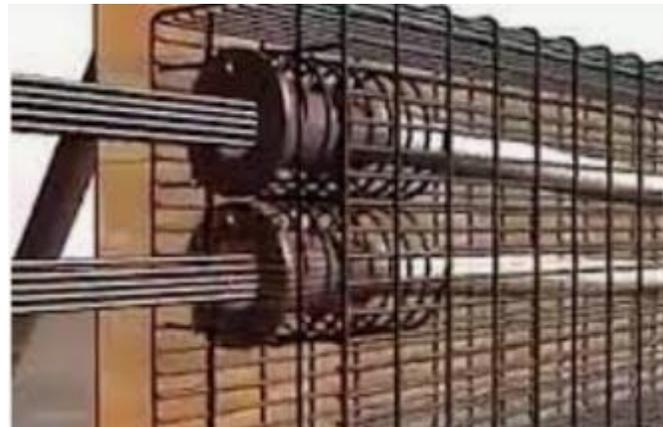
Le béton n'aime pas la traction (même le béton armé): comment faire?

Idée de Eugène Freyssinet (début 20^{ème}): lui ajouter de la compression

E. Freyssinet (1879 – 1962) est l'inventeur de la précontrainte

L'entreprise Freyssinet est leader mondial de la précontrainte

Objectif: compression ajoutée + traction en accident ~ 0 effort dans la paroi



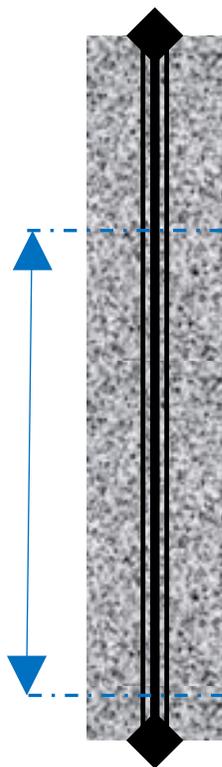


Le principe de la précontrainte

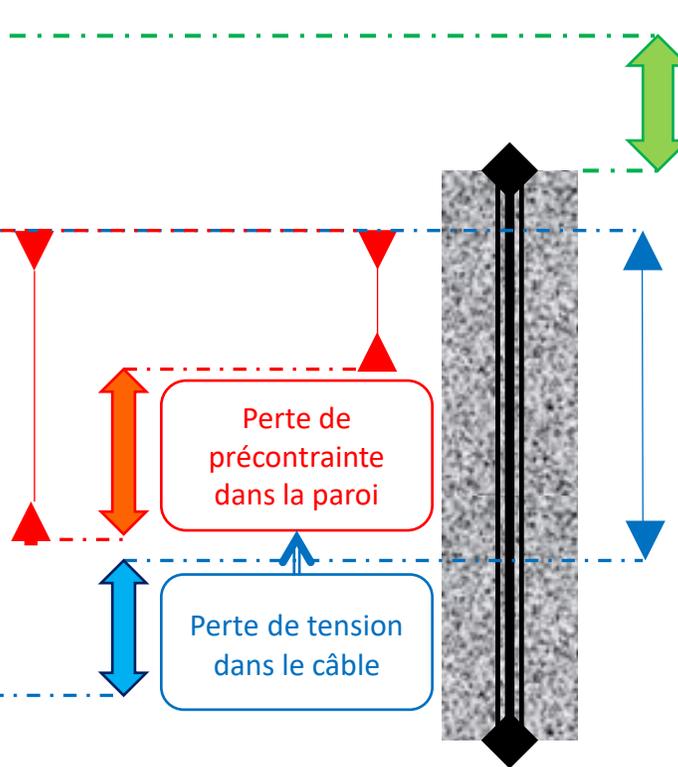
Paroi non précontrainte



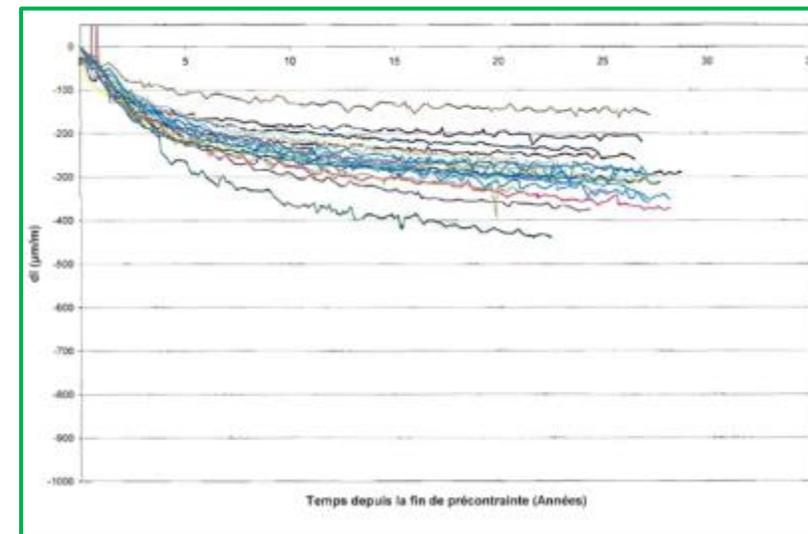
Mise en précontrainte instant (t_0)



Action des déformations différées instant ($t_0 + \Delta t$)



Déformations différées du béton



 Effort de compression dans le béton

 Effort de traction dans les câbles

Comment justifier l'enceinte ?



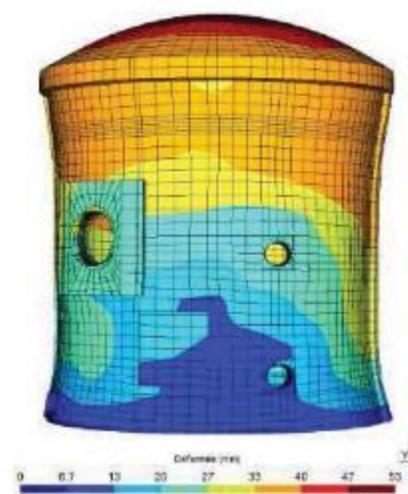
Les déformations différées ne nous arrangent pas: on perd l'effet bénéfique et nécessaire de la compression, apportée par la précontrainte, au cours du temps

Jusqu'à quand peut-on se le permettre?

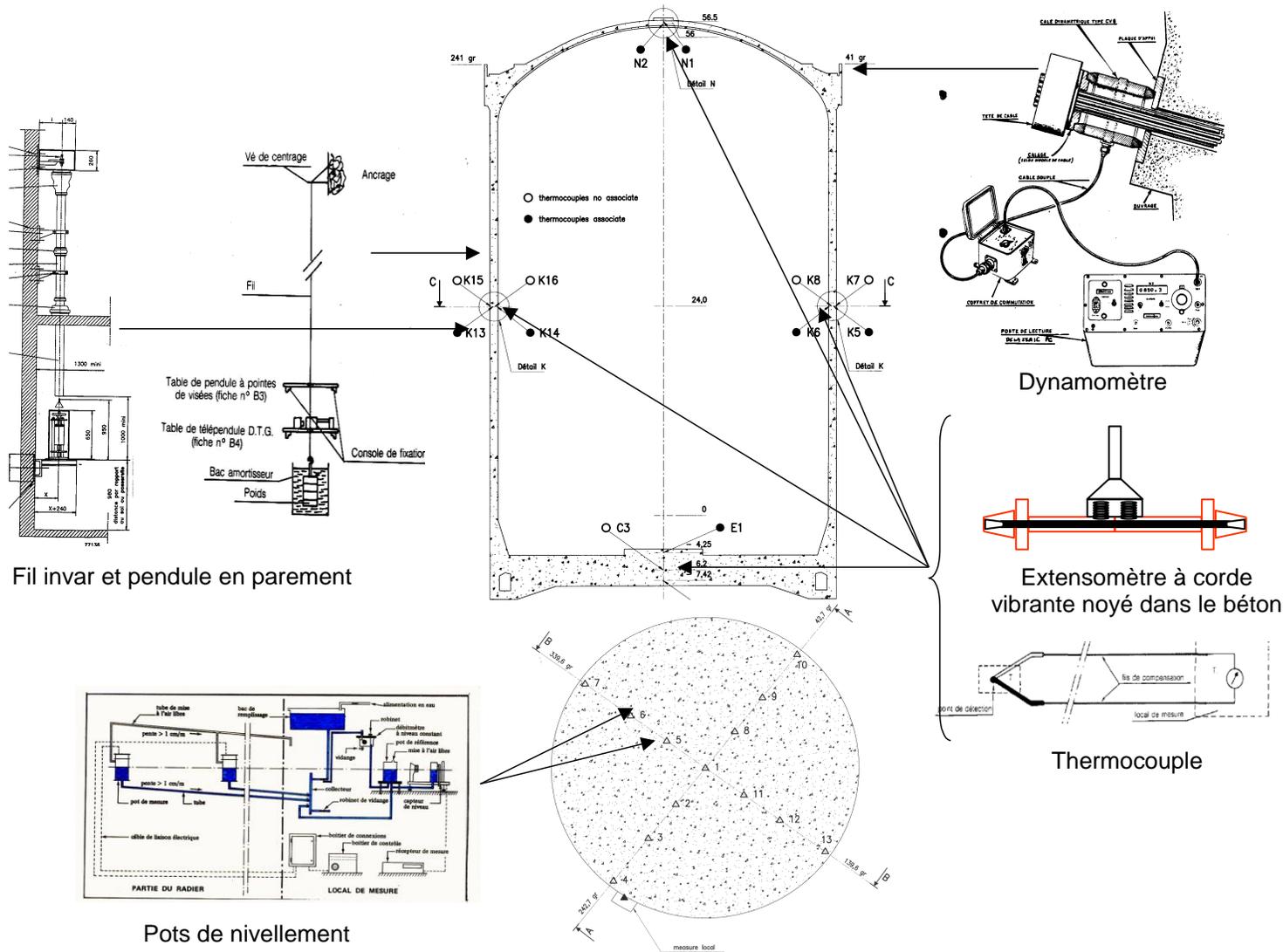
L'évolution des déformations différées est comprise et modélisée (essais de retrait et fluage)

On peut donc simuler le comportement dans le temps de l'enceinte

Sans oublier de se recalibrer sur le comportement réel de l'ouvrage, d'où la nécessité de le surveiller

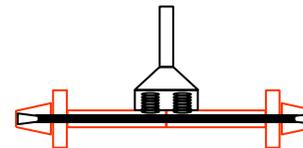


Comment surveiller l'enceinte ?

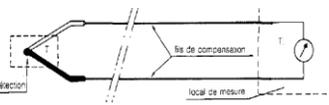


Fil invar et pendule en parement

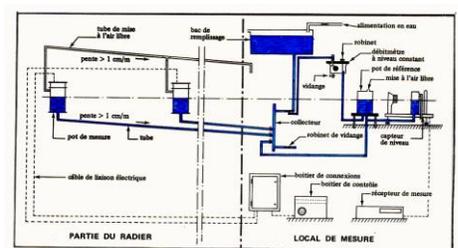
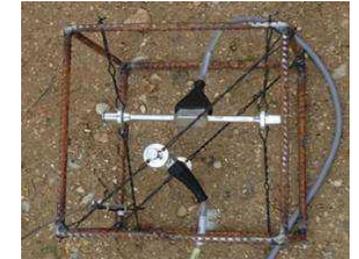
Dynamomètre



Extensomètre à corde vibrante noyé dans le béton



Thermocouple



Pots de nivellement

1^{er} Bilan



- Identification de phénomènes de vieillissement et compréhension → OK
- Identification de pathologies et compréhension → OK
- Surveillance → OK
- Modélisation à 80 ans (vieillissement+pathologies+Accidente) → OK

CONCLUSION

Pas de difficulté identifiée vis-à-vis du comportement mécanique des enceintes



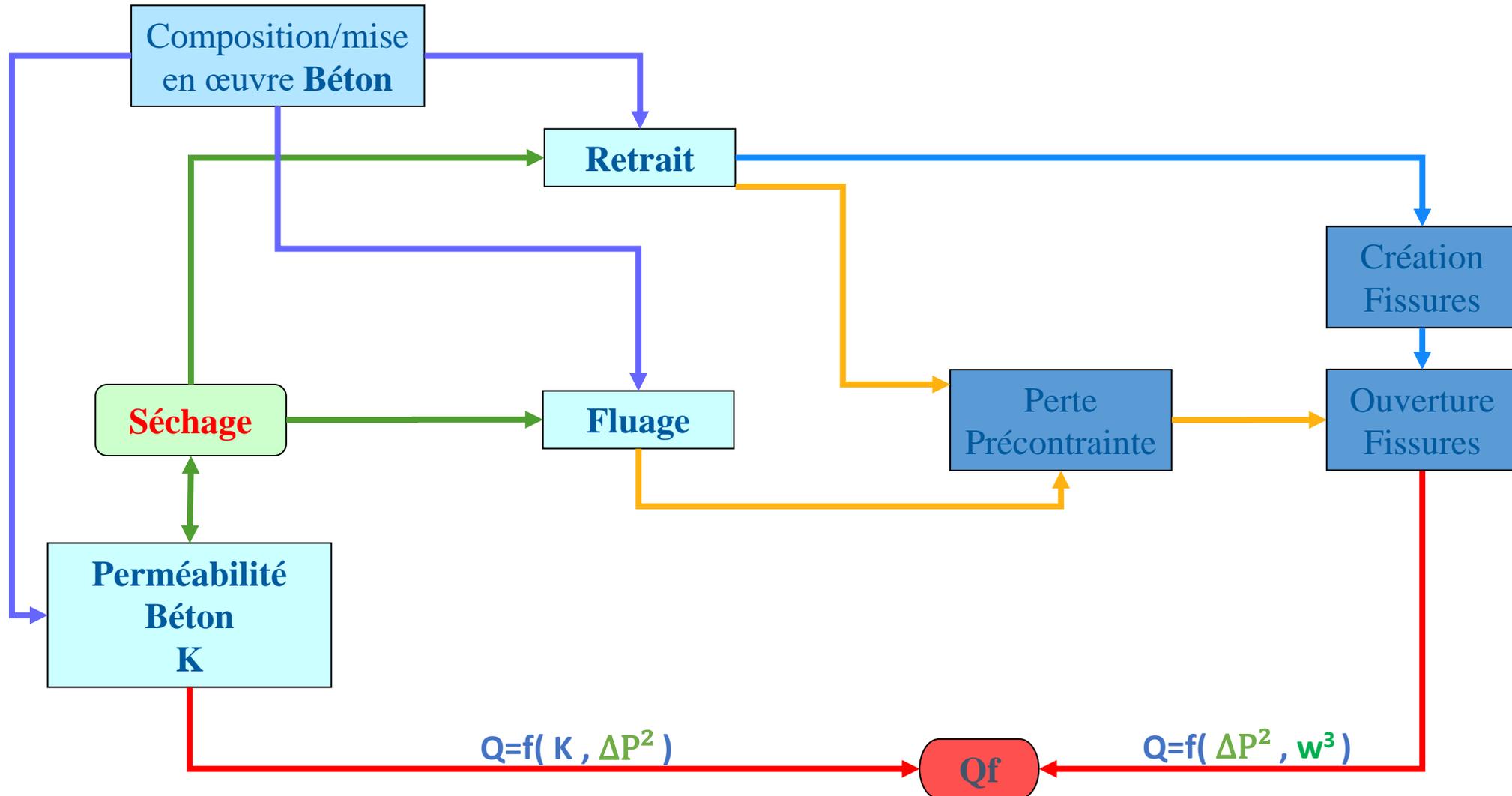
MAIS

Evolution du taux de fuite

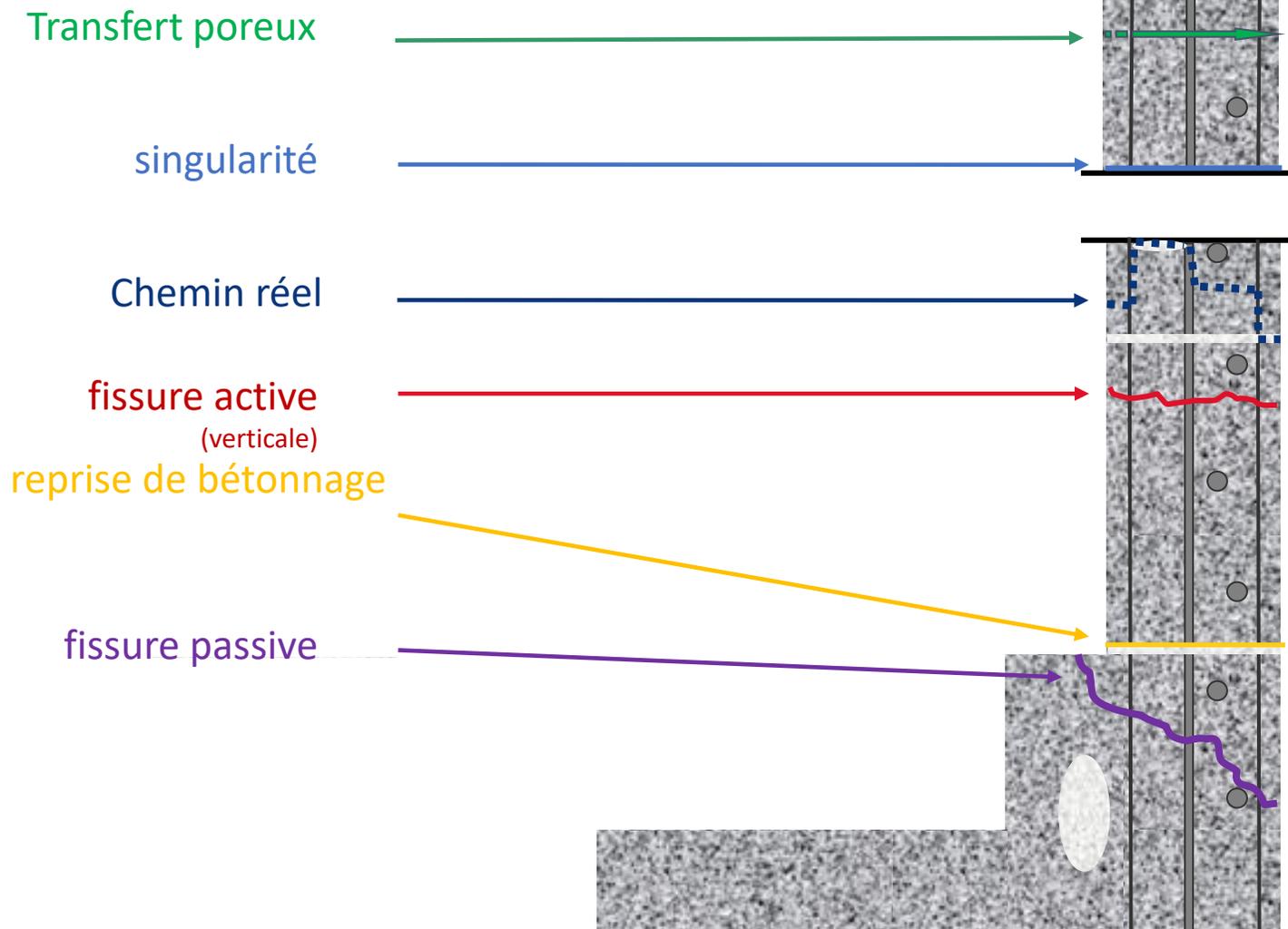


- ❑ Enceinte avec liner (ESP): pas de difficulté, on sait réparer si besoin
- ❑ Enceinte sans liner (EDP): la maîtrise de l'évolution du taux de fuite est plus complexe, et s'est parfois avérée délicate pour certains ouvrages

La fuite, c'est très simple !



La fuite, c'est très simple ! Pas tout à fait



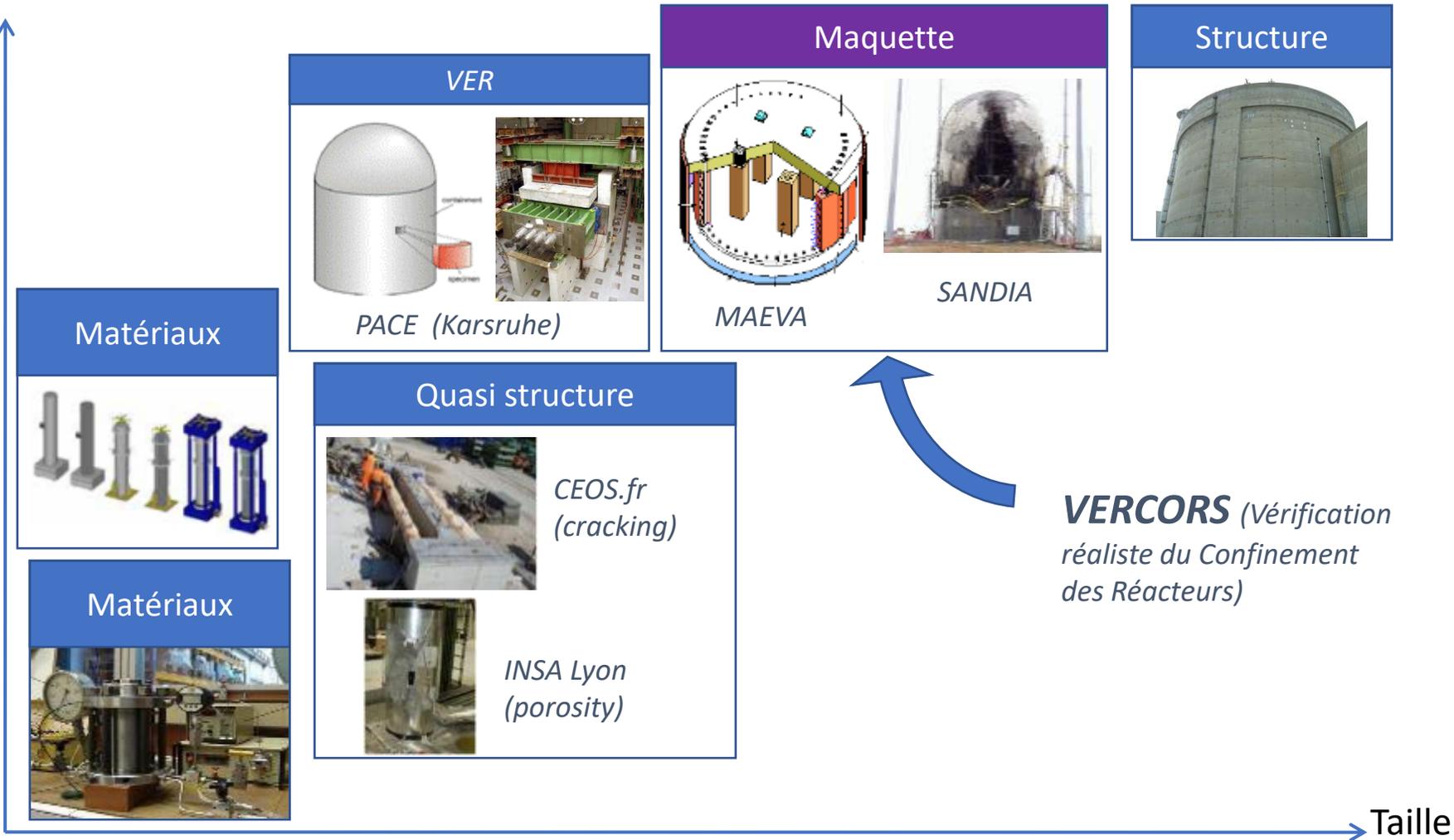
Vouloir accéder à la fuite par la modélisation me semble hors de portée pour longtemps encore

« on ne retrouve dans un calcul que ce qu'on y a mis en entrée »
[Freyssinet] (je crois)

Comment progresser dans cette complexité



Complexité



VERCORS

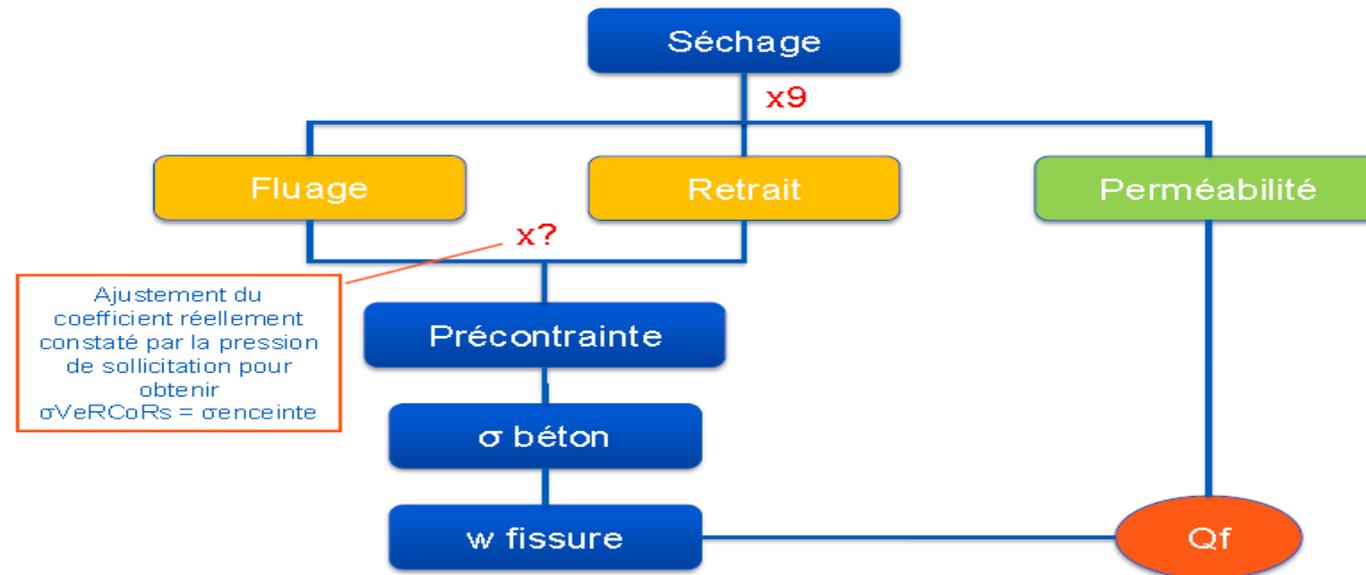


Le séchage est un phénomène diffusif évoluant en racine carré de l'épaisseur de la paroi

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

La bonne échelle: compromis entre représentativité, accélération des phénomènes et coût

Echelle 1:3 → 7 ans maquette = 60 ans enceintes

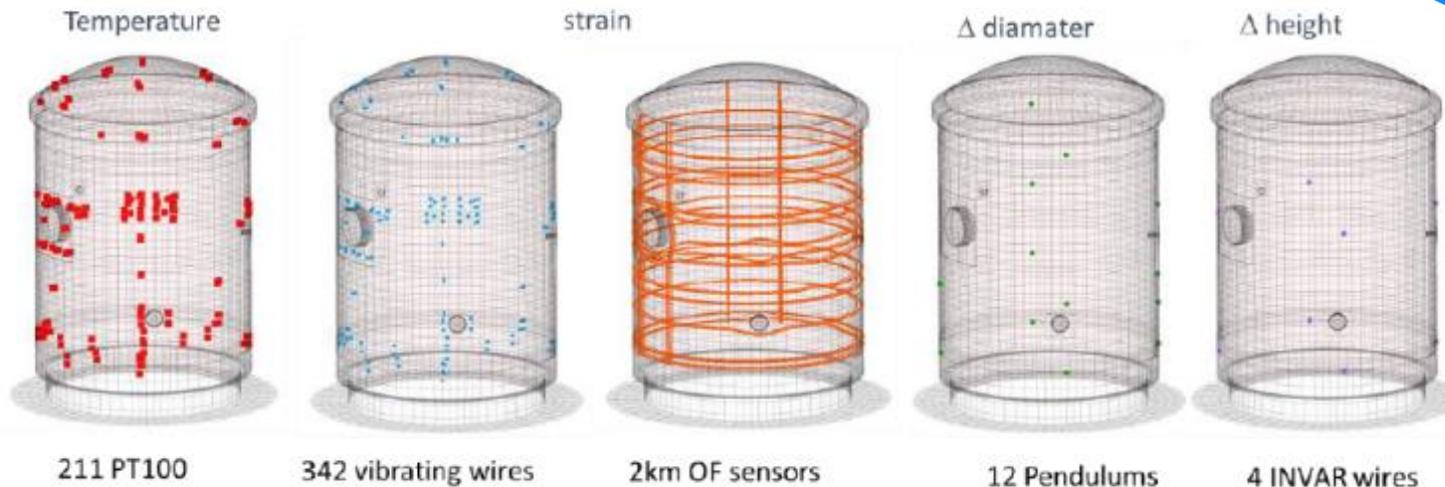
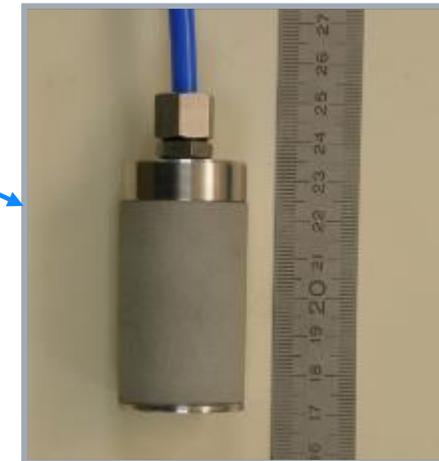


VERCORS, instrumentation hors normes!



Une auscultation standard hors du commun

Measured variable	Sensor type	VeRCoRs mock-up	EDF fleet
temperature	PT100 probes	>200	30
strain	vibrating wires	>300	50
diameter variation	plumb-lines	4	4
length variation	invar wires	4	4
rebar strain	strain gages	80	-
water content	TDR	20	-
water content	Pulse	20	-
strain+temperature	optic fiber (OF)	2km	-



VERCORS, instrumentation hors normes!

Des mesures spécifiques



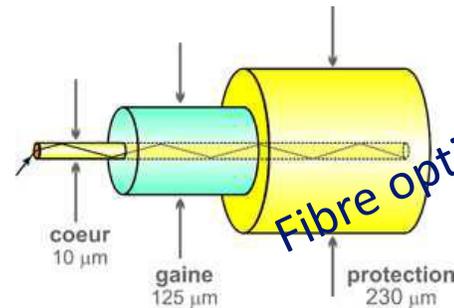
Contrainte dans les aciers



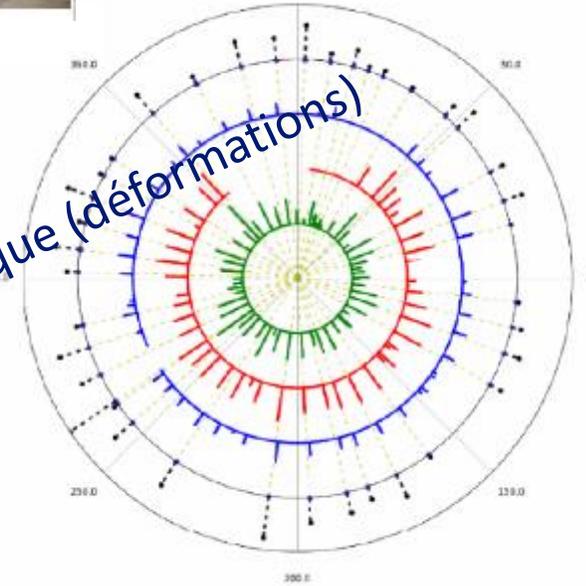
© EDF – reproduction interdite sans autorisation



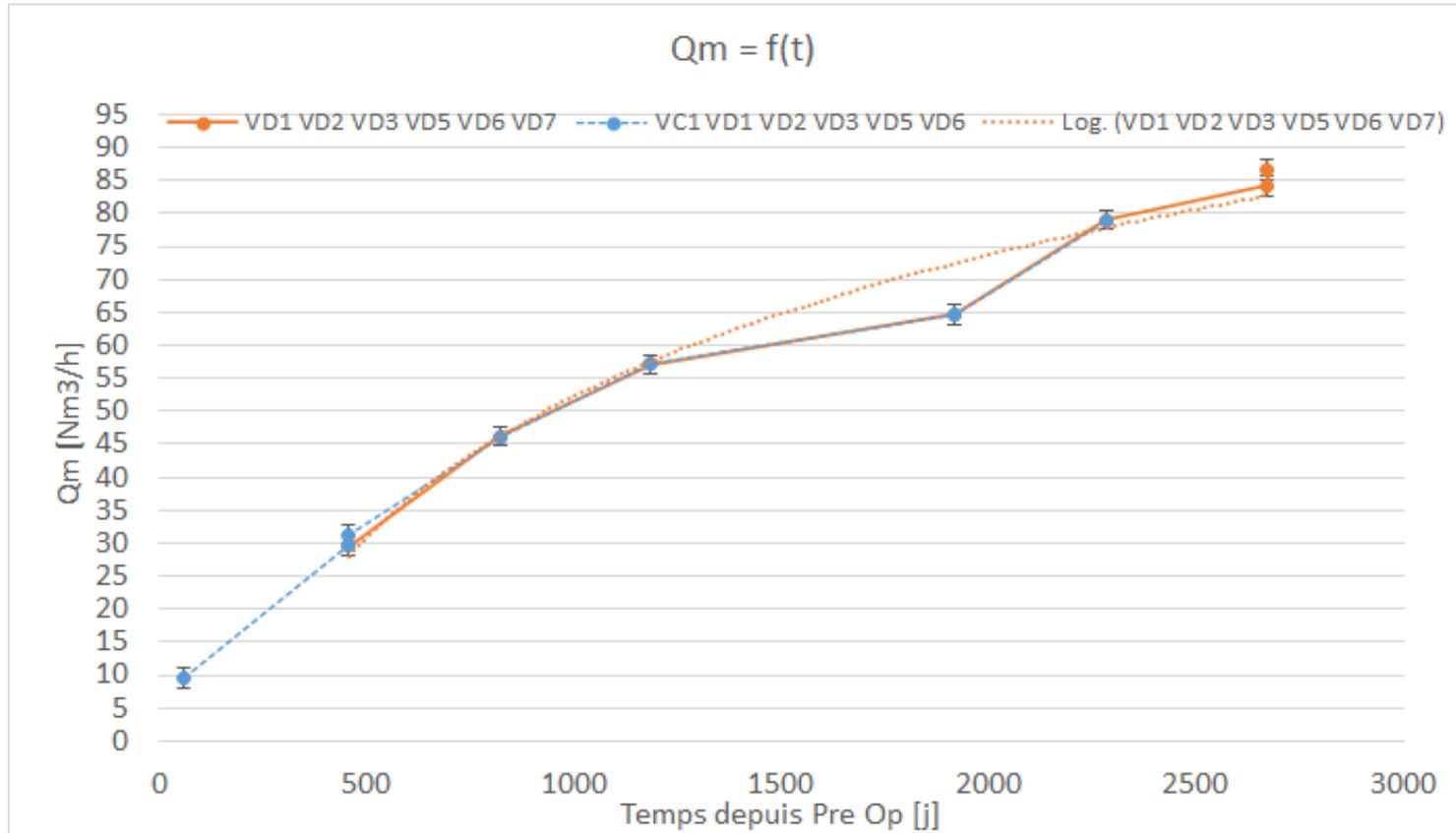
Hr en paroi



Fibre optique (déformations)



VERCORS



Une évolution sans effet falaise de la fuite globale

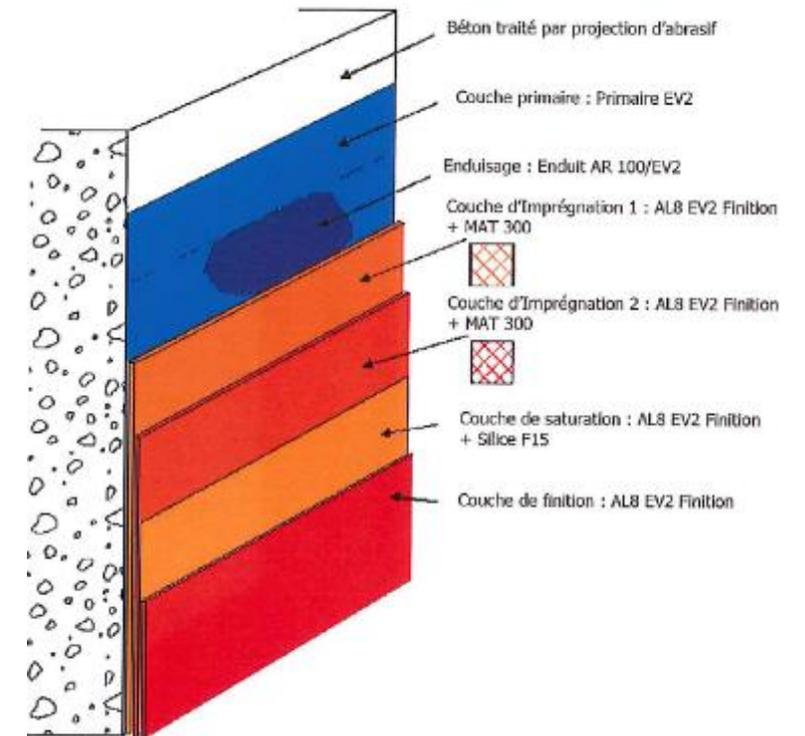
Localement, les débits peuvent croître beaucoup plus vite

Application aux enceintes



Il faut limiter la fuite en appliquant des rustines (peau composite ou POCO) dans les zones les plus sensibles

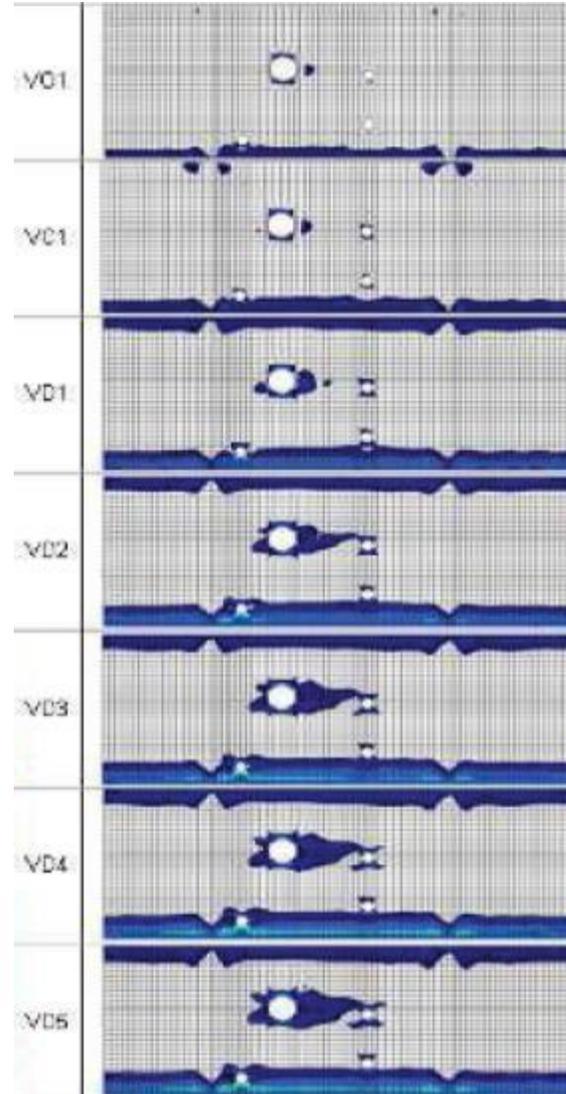
- À l'intérieur (nécessite une qualification aux conditions accidentelles P, T, Irr)
- A l'extérieur si besoin (il faut valider l'adhérence à la sous pression de 5 bars)



Application aux enceintes



Détection des zones fuyardes



Mise en évidence par simulation des zones où la précontrainte est la plus faible (moins efficace pour conserver les fissures fermées)

Les travaux POCO



Construction de l'accès EEE

Les travaux POCO



Structure de préparation et d'accès



© EDF – reproduction interdite sans autorisation

Les travaux POCO

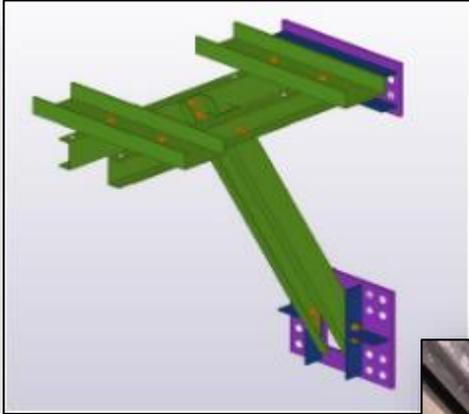
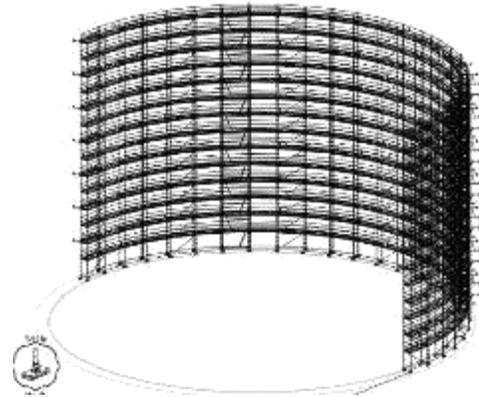


Trémie de ventilation

Les travaux POCO



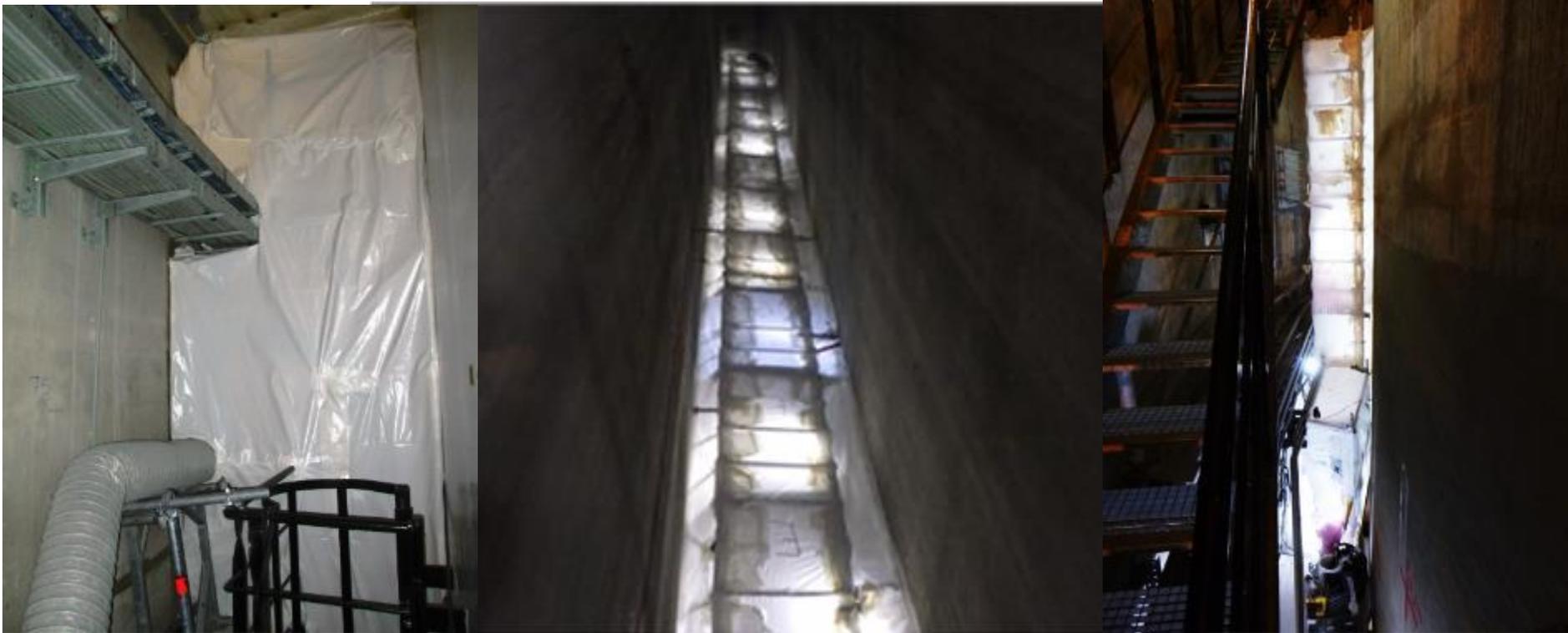
Pose des consoles sur l'EE pour échafauder l'ensemble de l'EEE



Les travaux POCO



© EDF – reproduction interdite sans autorisation



Confinement des zones de travail (poussière)

Les travaux POCO



Avant



Après



© EDF – reproduction interdite sans autorisation

Conclusion



- Pas d'inquiétude à date sur le comportement mécanique des enceintes du Parc
- Pas d'inquiétude pour l'étanchéité des enceintes avec liner
- Les solutions disponibles devraient permettre de limiter l'évolution du taux de fuite sur les enceintes à double paroi



Merci

