



Laboratoire
Mécanique
Lille



MÉTHODOLOGIE ET OUTIL NUMÉRIQUE POUR LA PRÉDICTION DE L'ÉVOLUTION DU DÉBIT DE FUITE DES ENCEINTES INTERNES DE BÂTIMENTS RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Mehdi ASALI

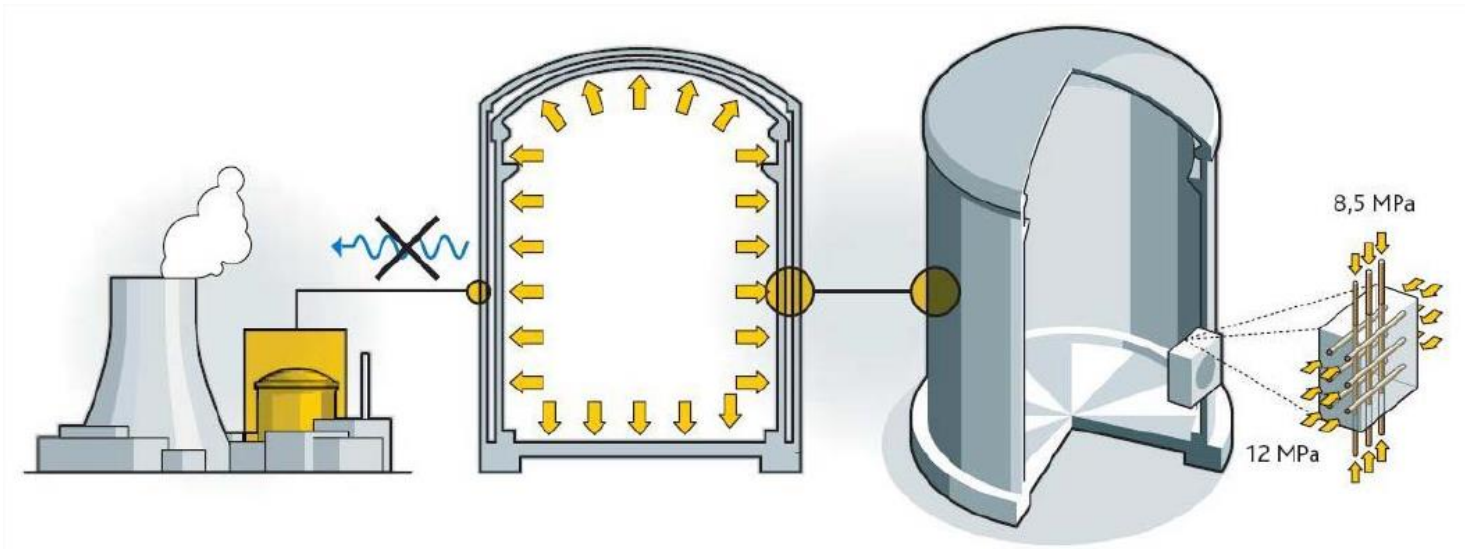
3rd MFront Users Day – 30 mai 2017



www.oxand.com

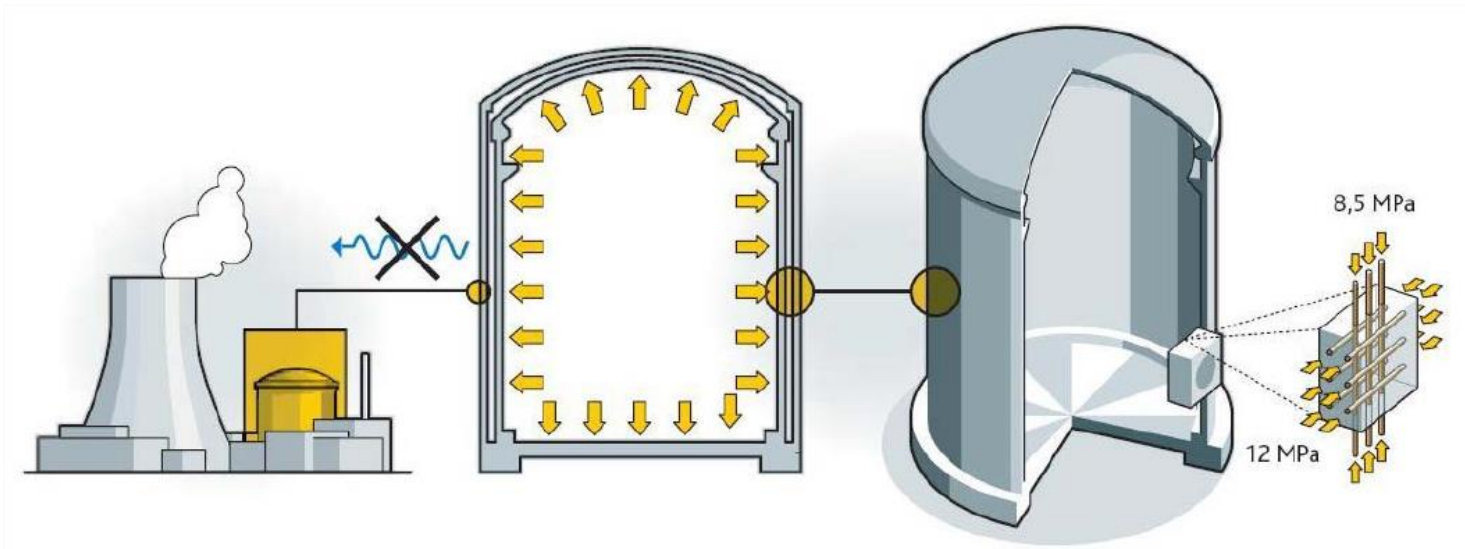
with **Simeo**TM

- Enceinte de confinement : **troisième et dernière barrière de sûreté** des bâtiments réacteurs (BR)



[Reviron, 2009]

- Enceinte de confinement : **troisième et dernière barrière de sûreté** des bâtiments réacteurs (BR)

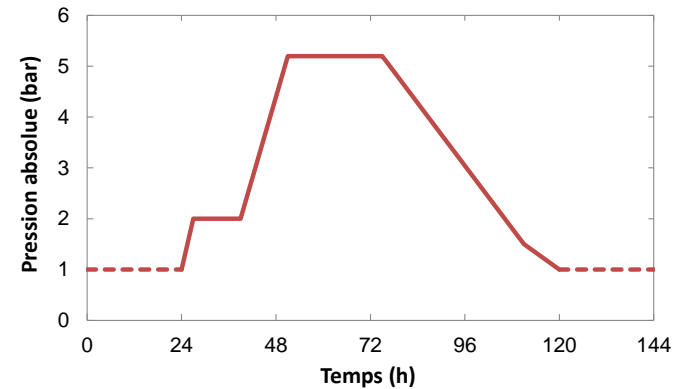
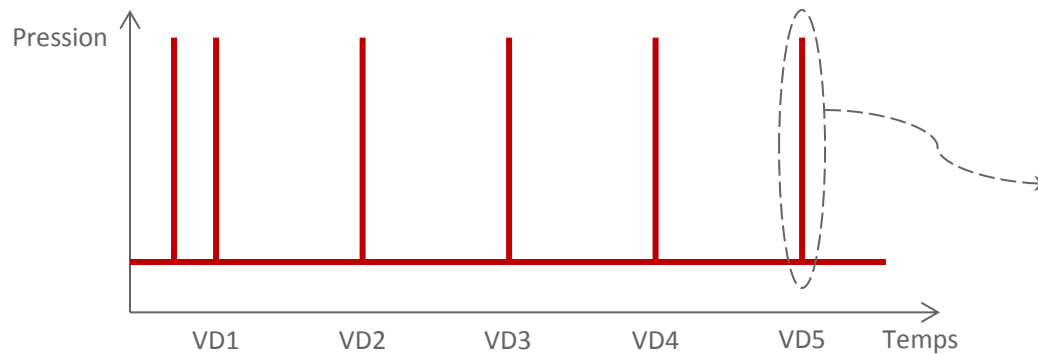


[Reviron, 2009]

- Technologie étudiée : **double-paroi sans liner** (24 BR sur 58 en France)
- L'**enceinte interne** (EI) est précontrainte bi-axialement pour maintenir le béton en compression en situation accidentelle (limiter la fissuration)

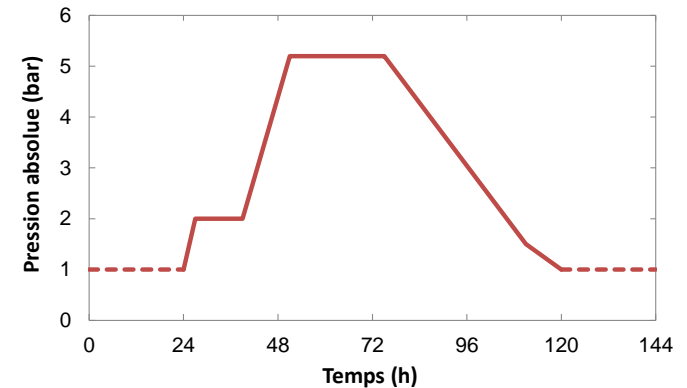
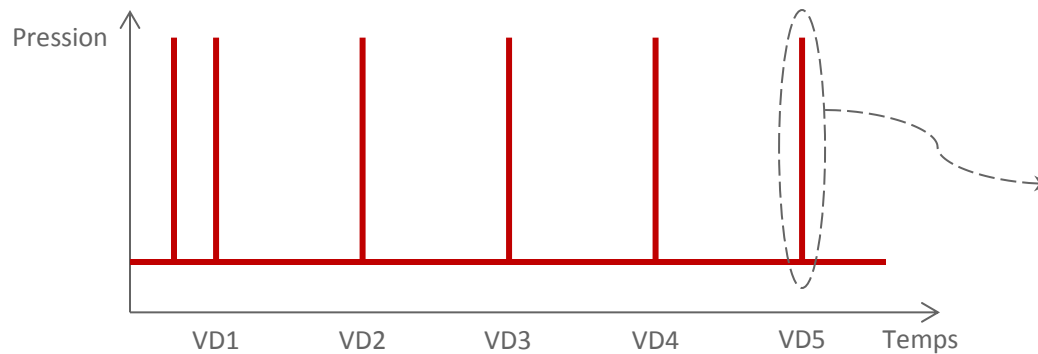
► L'étanchéité des EI est testée périodiquement

- Le taux de fuite ne doit pas dépasser un **critère réglementaire de sûreté (1.5%/jour)**



► L'étanchéité des EI est testée périodiquement

- Le taux de fuite ne doit pas dépasser un **critère réglementaire de sûreté (1.5%/jour)**



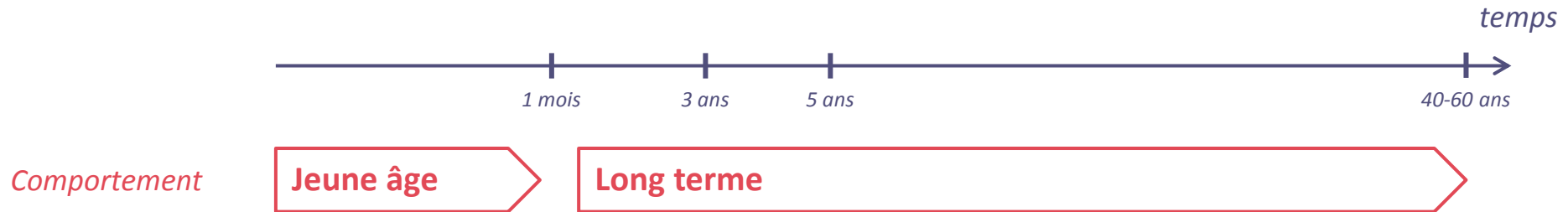
► Constatations expérimentales

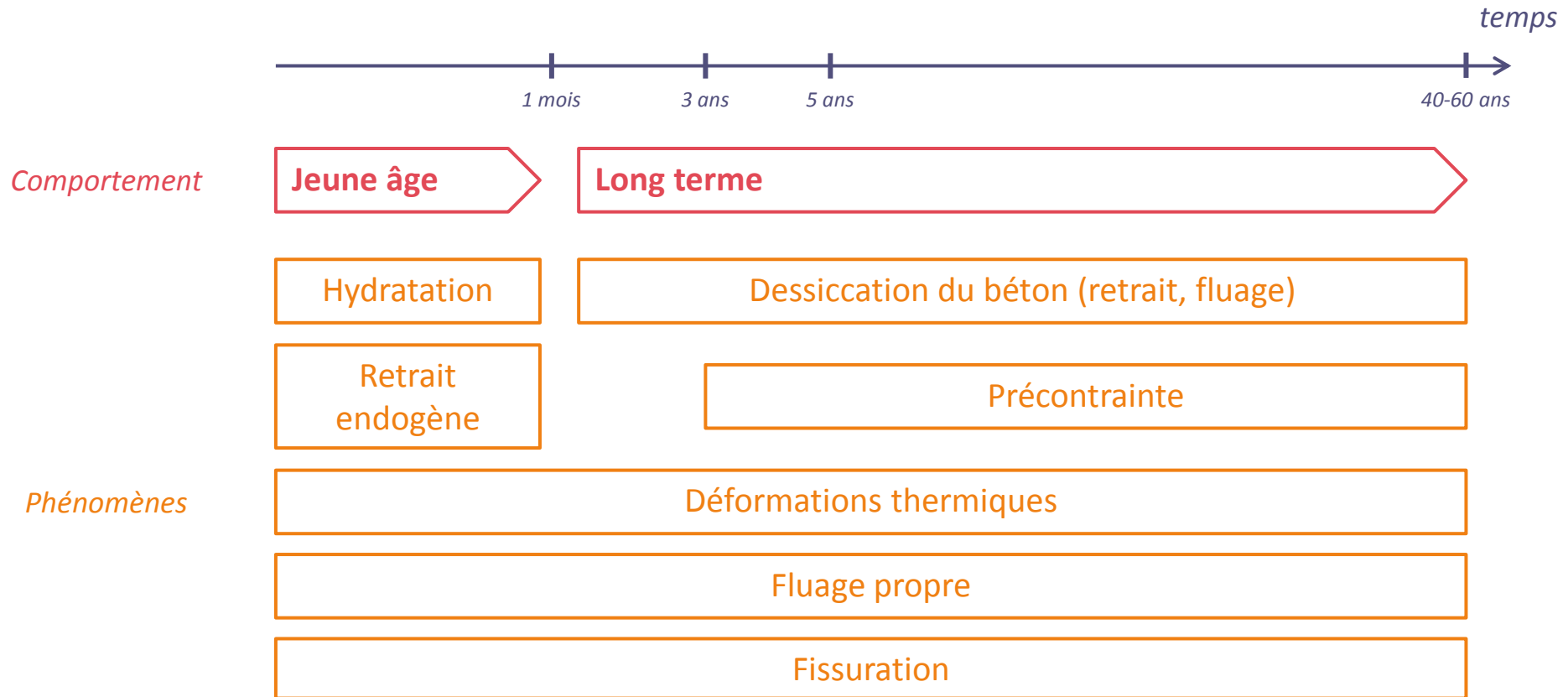
- Evolution du taux de fuite avec le temps (marges de sécurité)
- Pas de comportement « générique » des EI

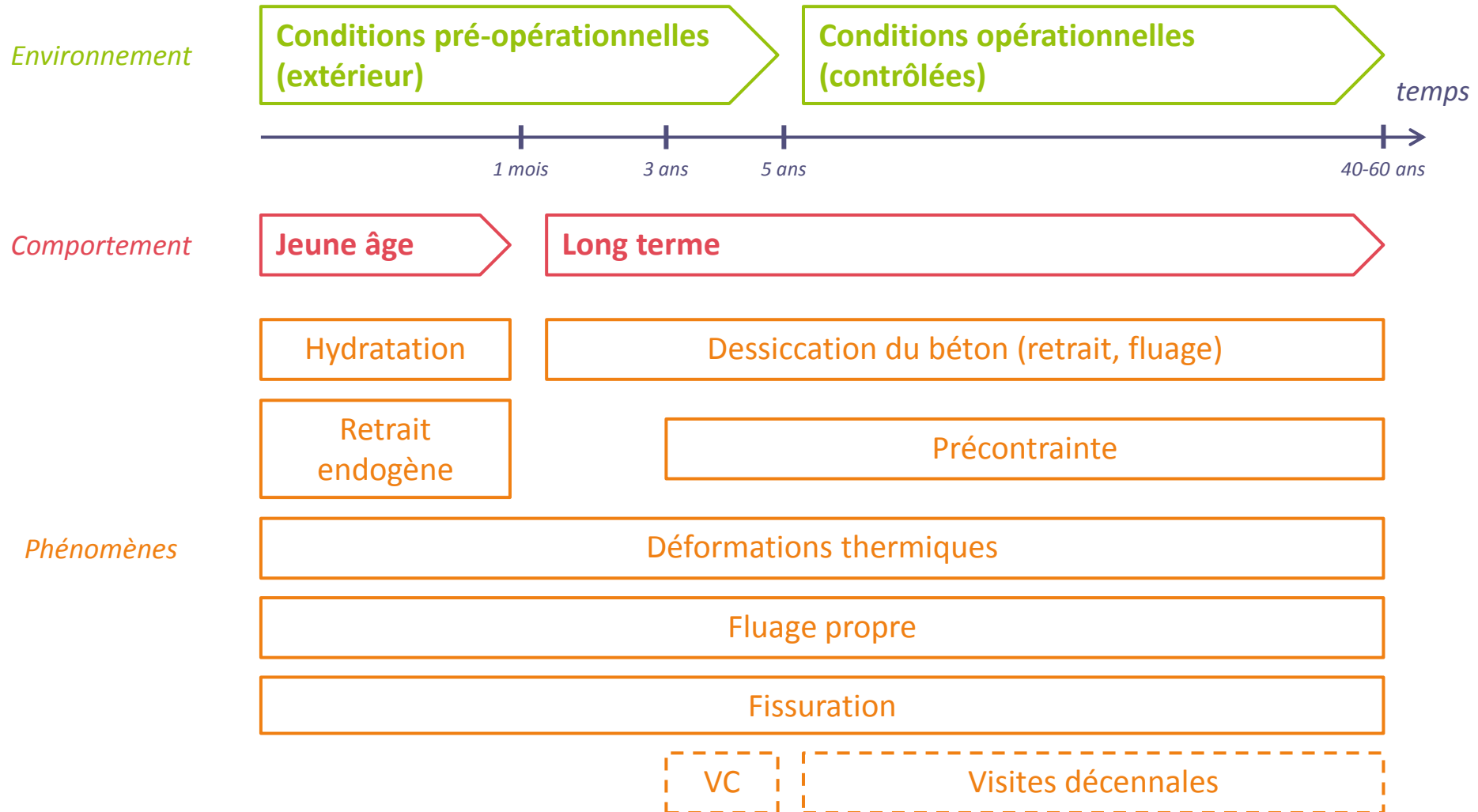
► Enjeux opérationnels

- Optimiser les réparations** en phase d'exploitation en amont de chaque VD
- Anticiper le **prolongement de durée de vie (+20 ans)**

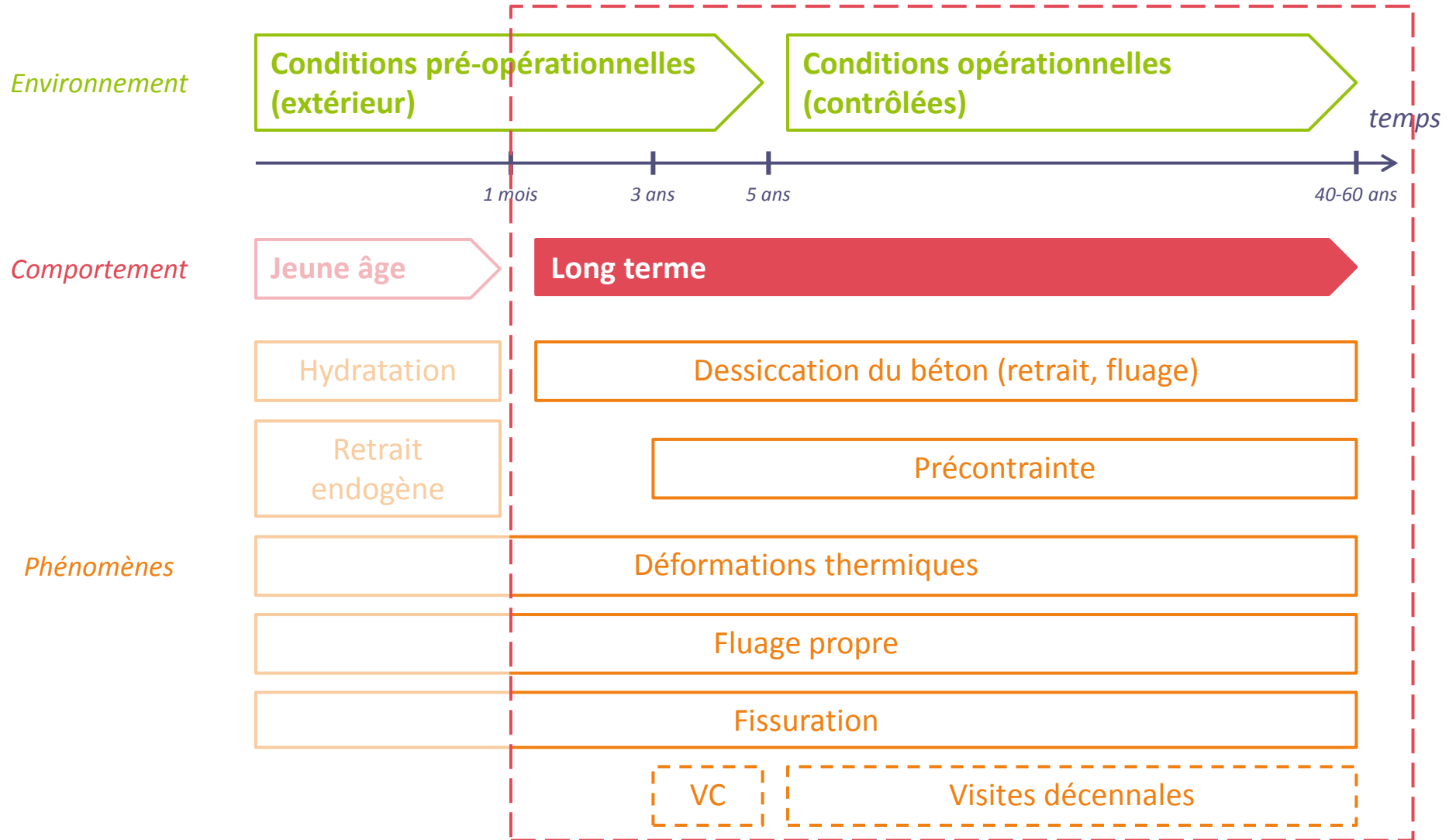
Phénomènes physiques impliqués







Phénomènes physiques impliqués



- ▶ **Peu de méthodologies outillées** pour répondre à la problématique industrielle
- ▶ **Outil opérationnel** de prévision du taux de fuite à long terme
 - Contraintes
 - Prenant en compte les complexités géométriques (surépaisseurs, traversées, déviations de câbles)
 - Raisonnablement coûteux en ressources calculs
 - Adapté à la quantité et à la qualité des données de terrain disponibles (inspections visuelles, données incertaines/inconnues, variabilité spatiale)
 - Choix
 - Maillage par macroéléments
 - Modélisation des phénomènes THM avec un chainage faible, représentatif de l'exploitation des EI à long terme
 - Procédure d'intégration dans le calcul des défauts locaux relevés visuellement

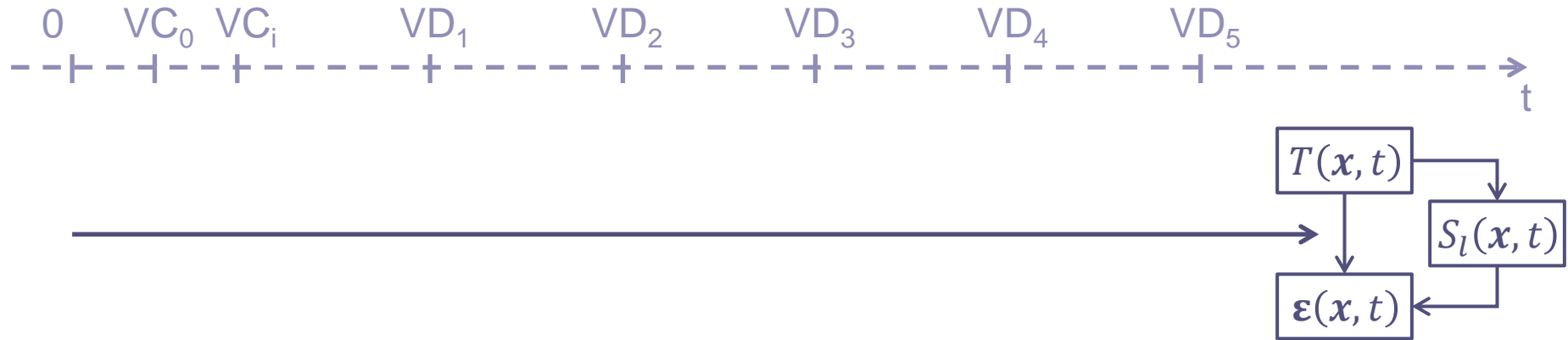
Solution proposée dans le cadre de la thèse



VC Visite pré-opérationnelle

VD Visite Décennale

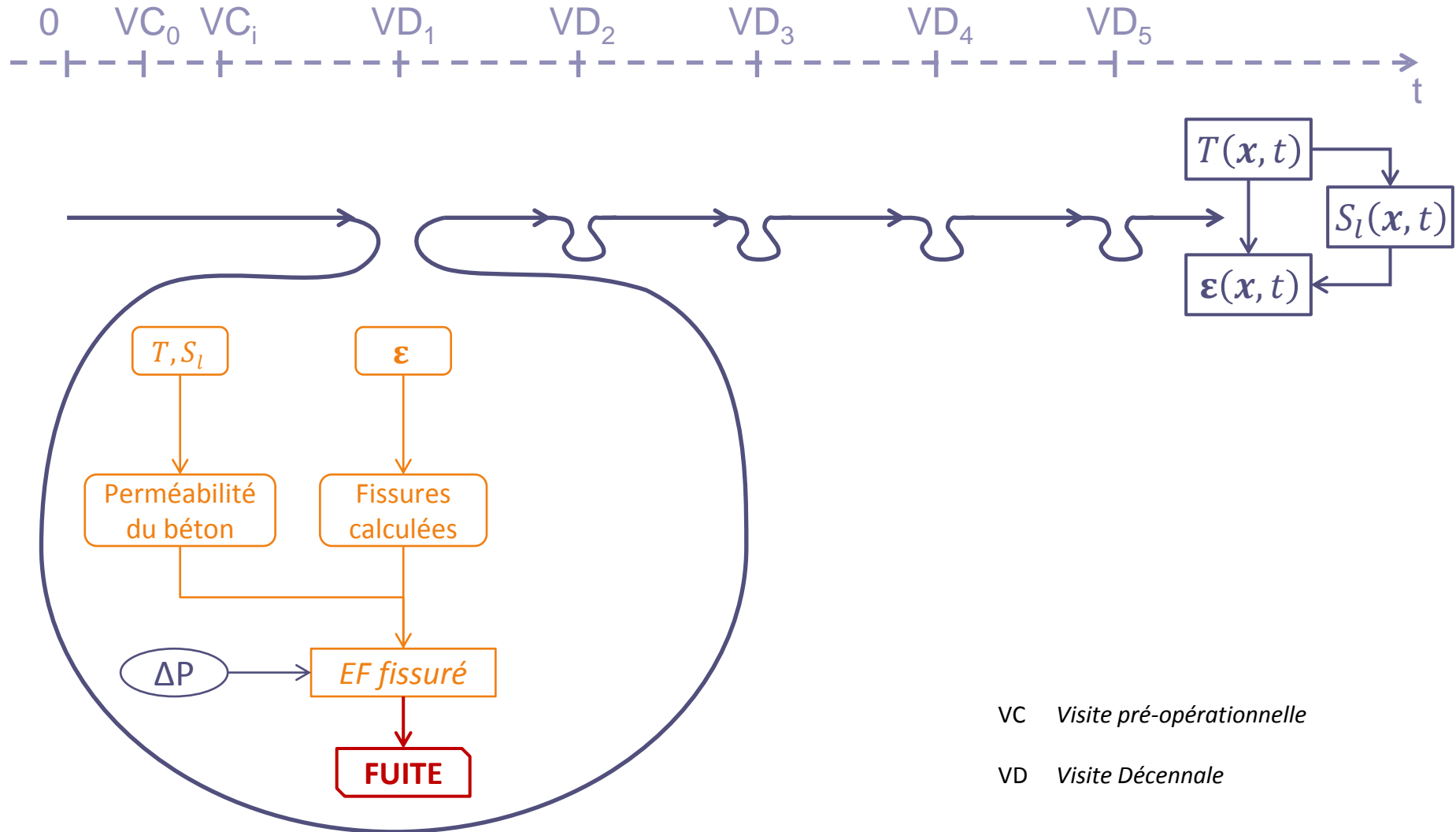
Solution proposée dans le cadre de la thèse



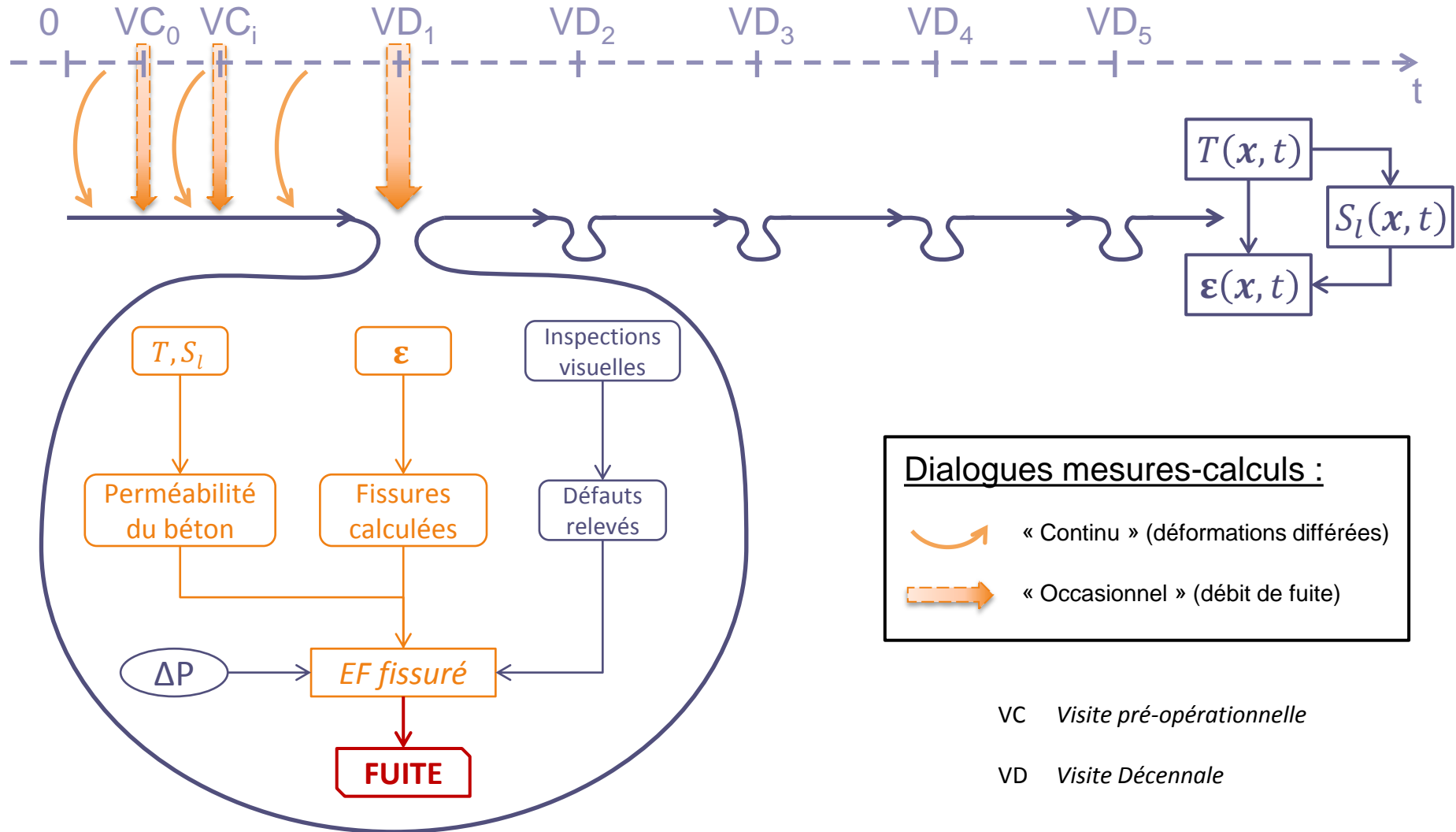
VC Visite pré-opérationnelle

VD Visite Décennale

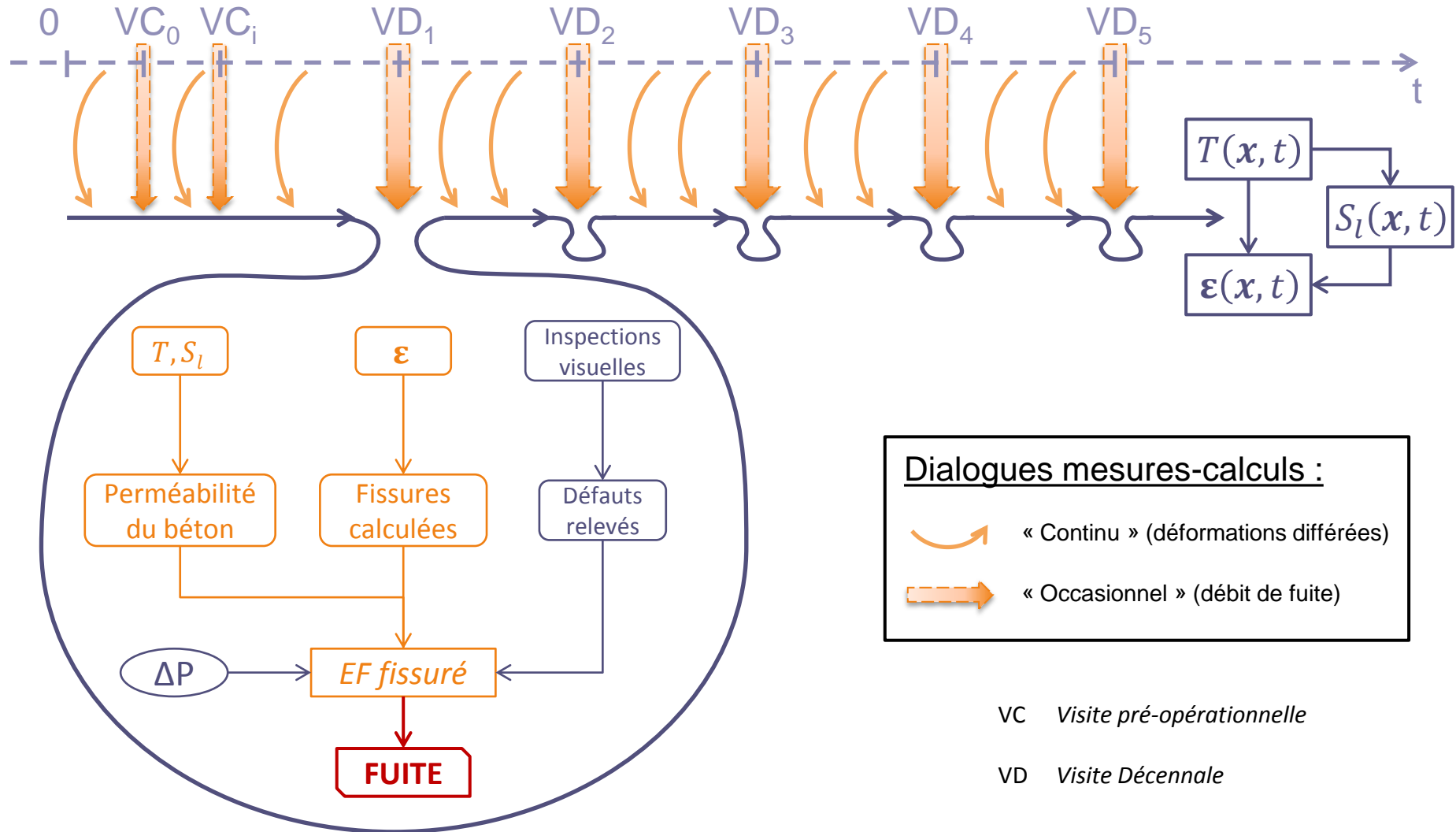
Solution proposée dans le cadre de la thèse



Solution proposée dans le cadre de la thèse



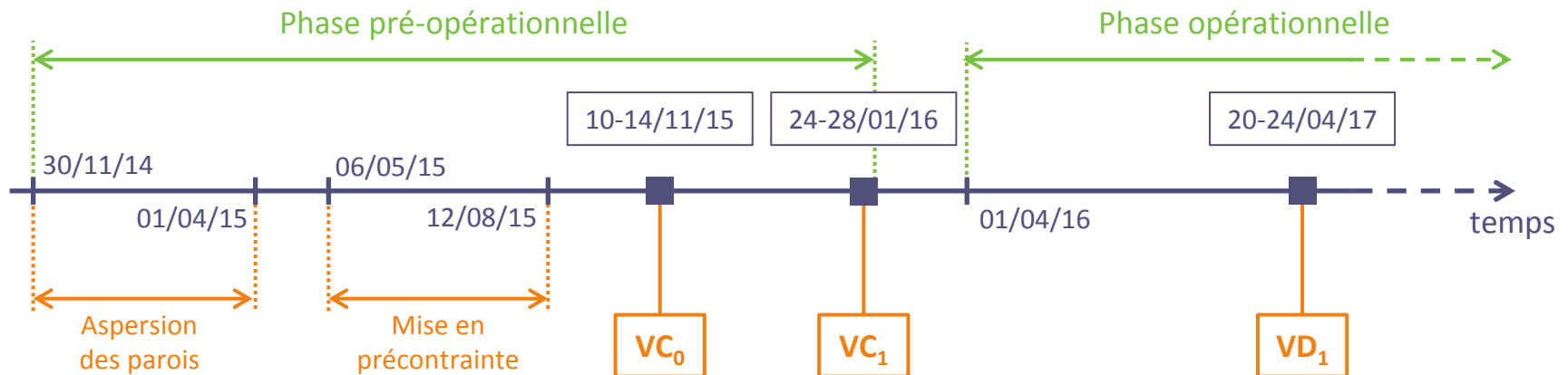
Solution proposée dans le cadre de la thèse



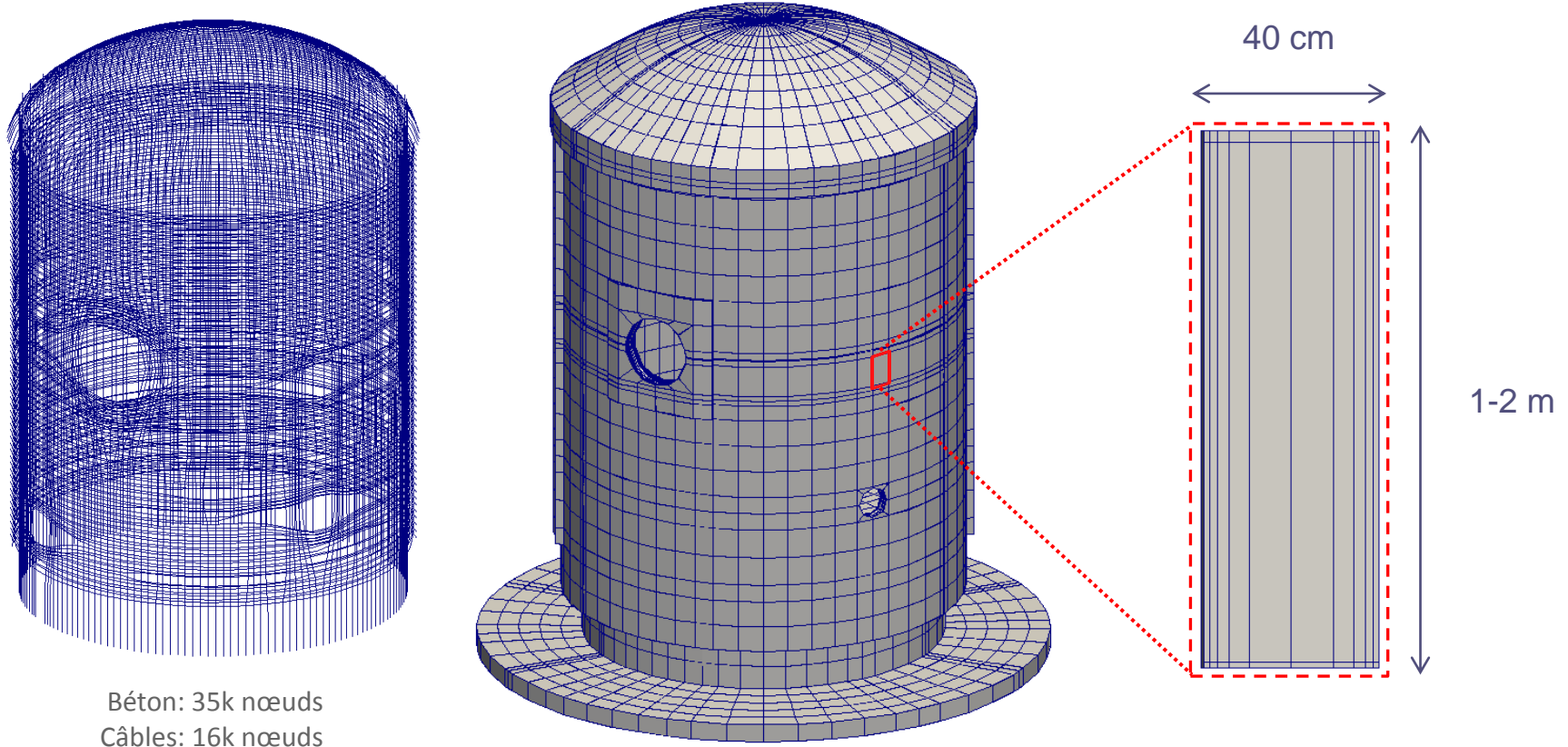


► Maquette d'EI à l'échelle 1:3

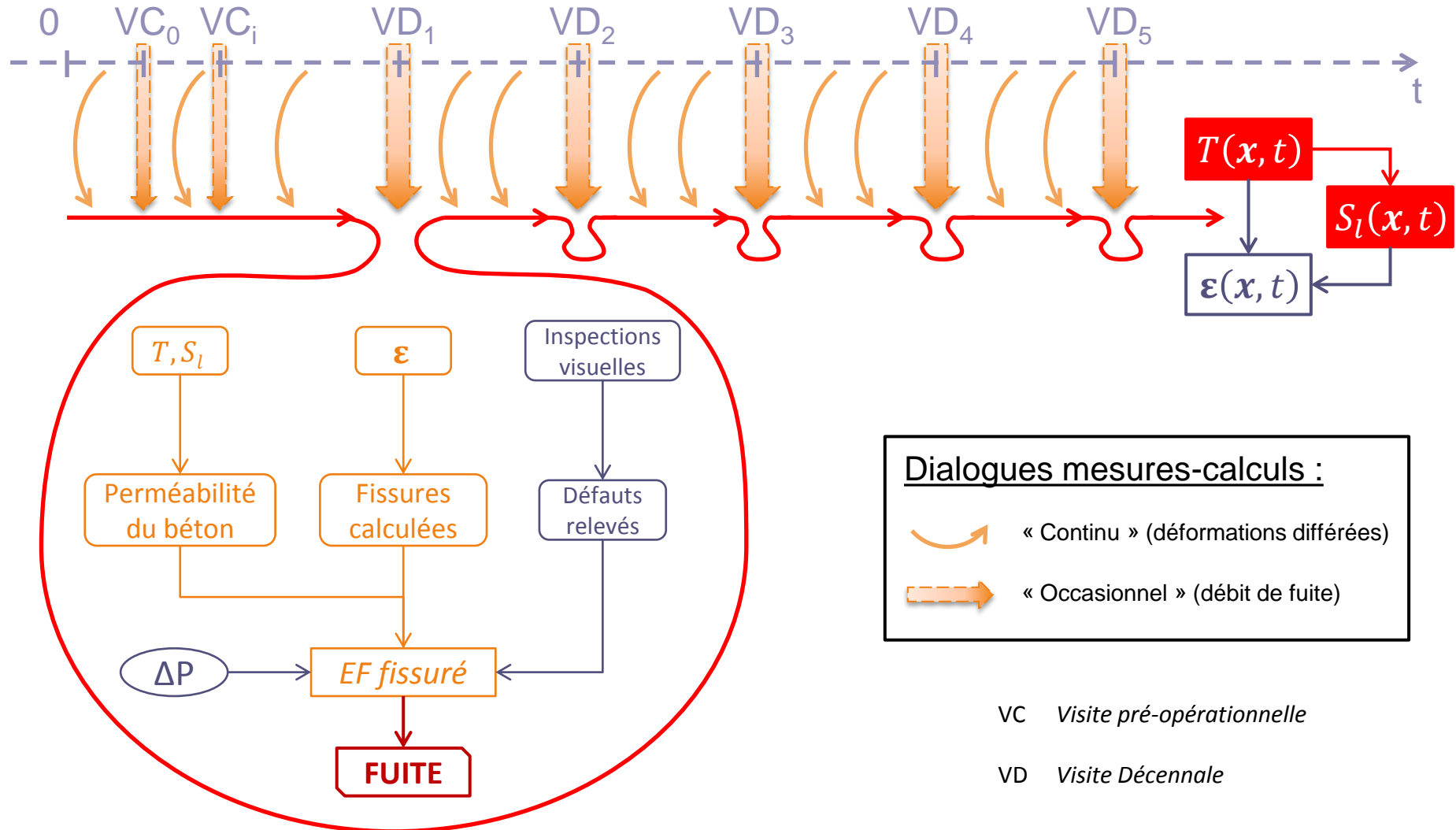
- « Vieillessement x9 »
- Données représentatives d'une EI du parc à 60 ans en 2021



► Choix du maillage grossier vis-à-vis des objectifs industriels visés



Calculs thermique et hydrique

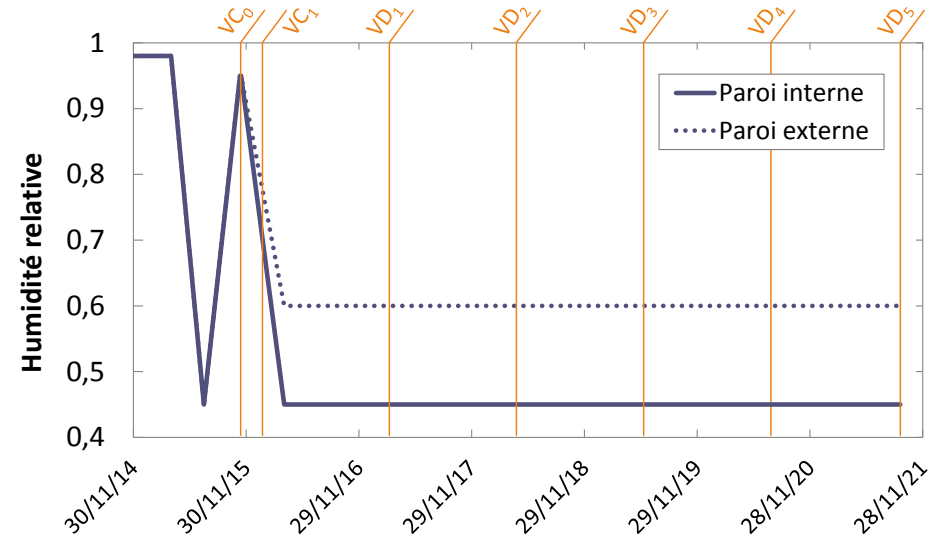
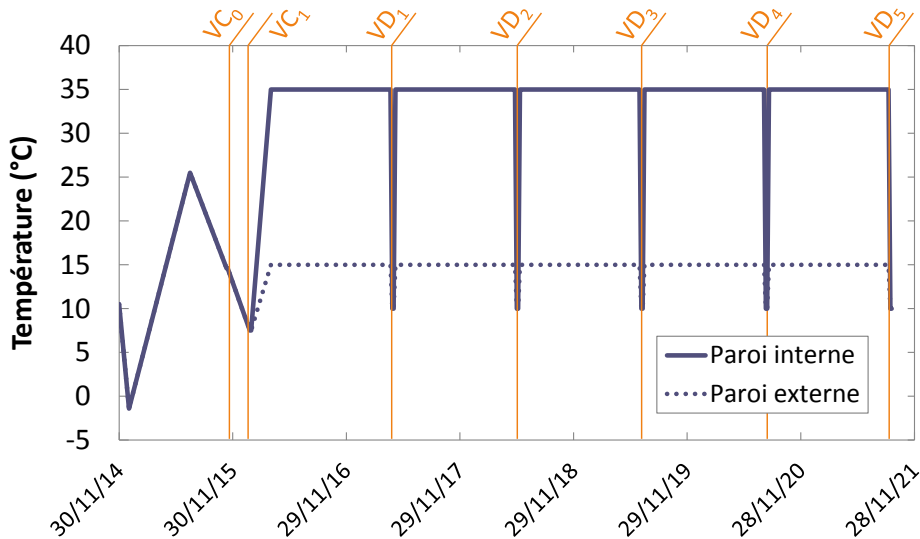


► Diffusion non-linéaire

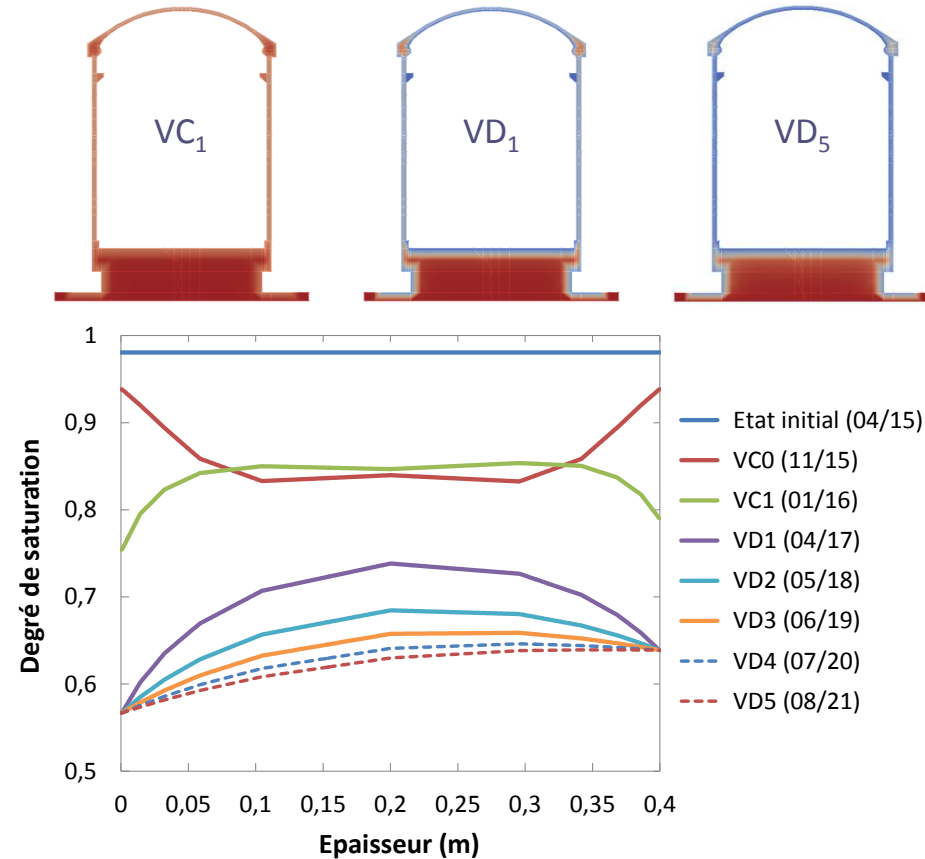
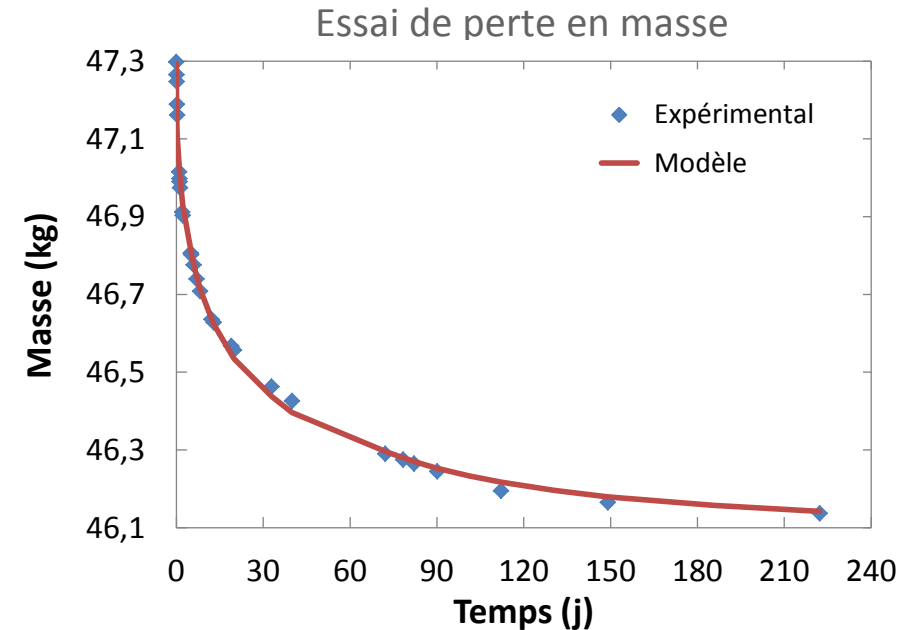
$$\rho_b C_p \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [-\lambda(T) \nabla T(\mathbf{x}, t)] = 0$$

$$\frac{\partial S_l(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{K_{int}^l k_{rl}(S_l)}{\eta_l \phi} \frac{\partial P_c(S_l)}{\partial S_l} \frac{T(\mathbf{x}, t)}{T_{ref}} e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \nabla S_l \right] = 0$$

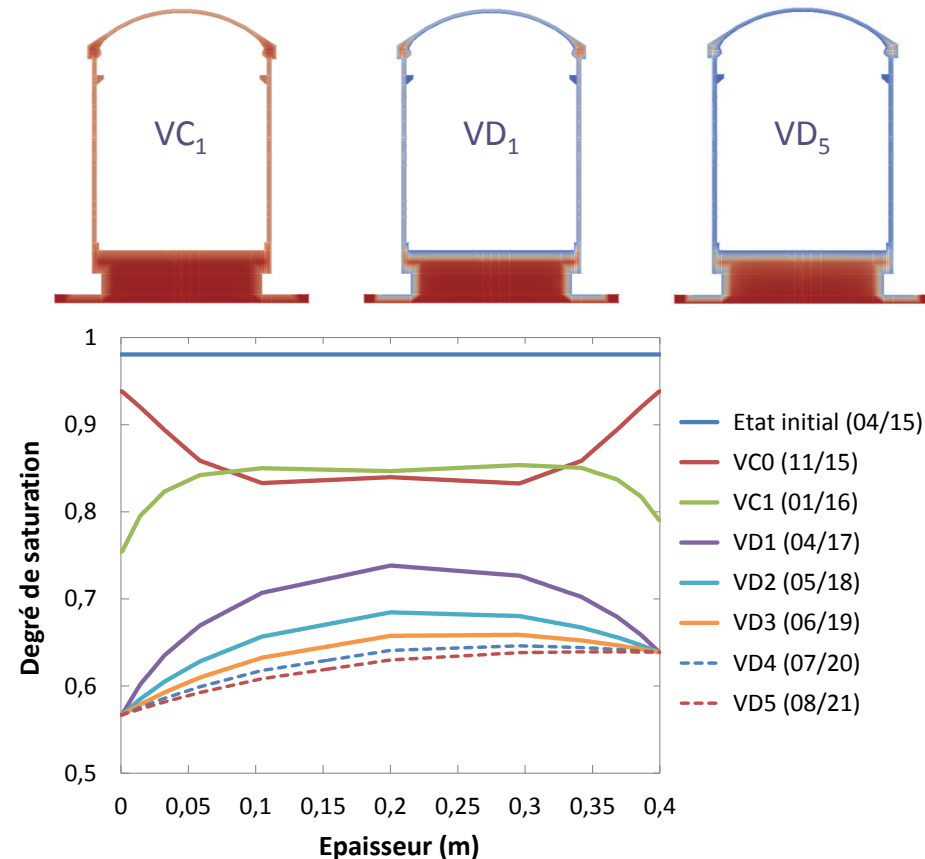
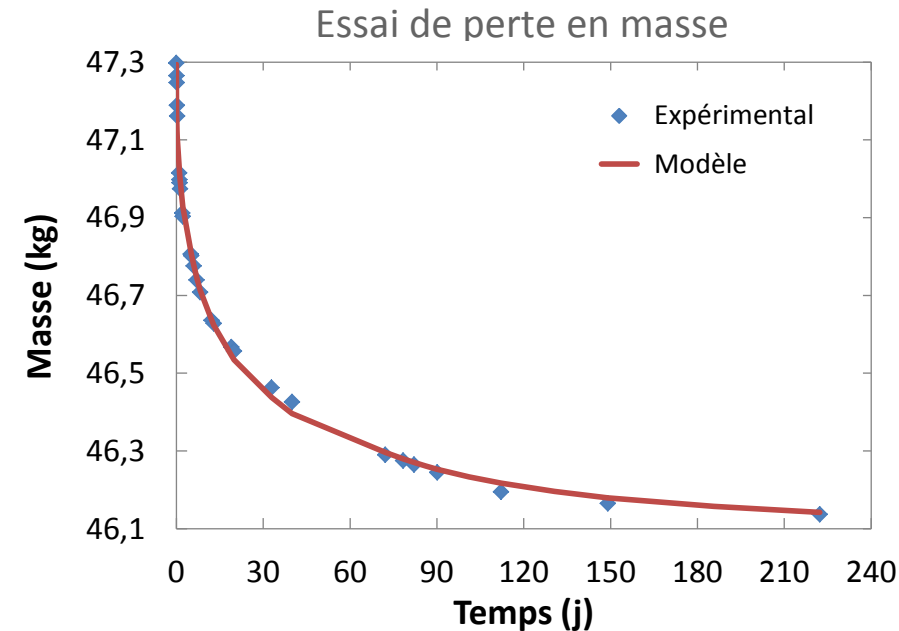
► Linéarisation des conditions environnementales



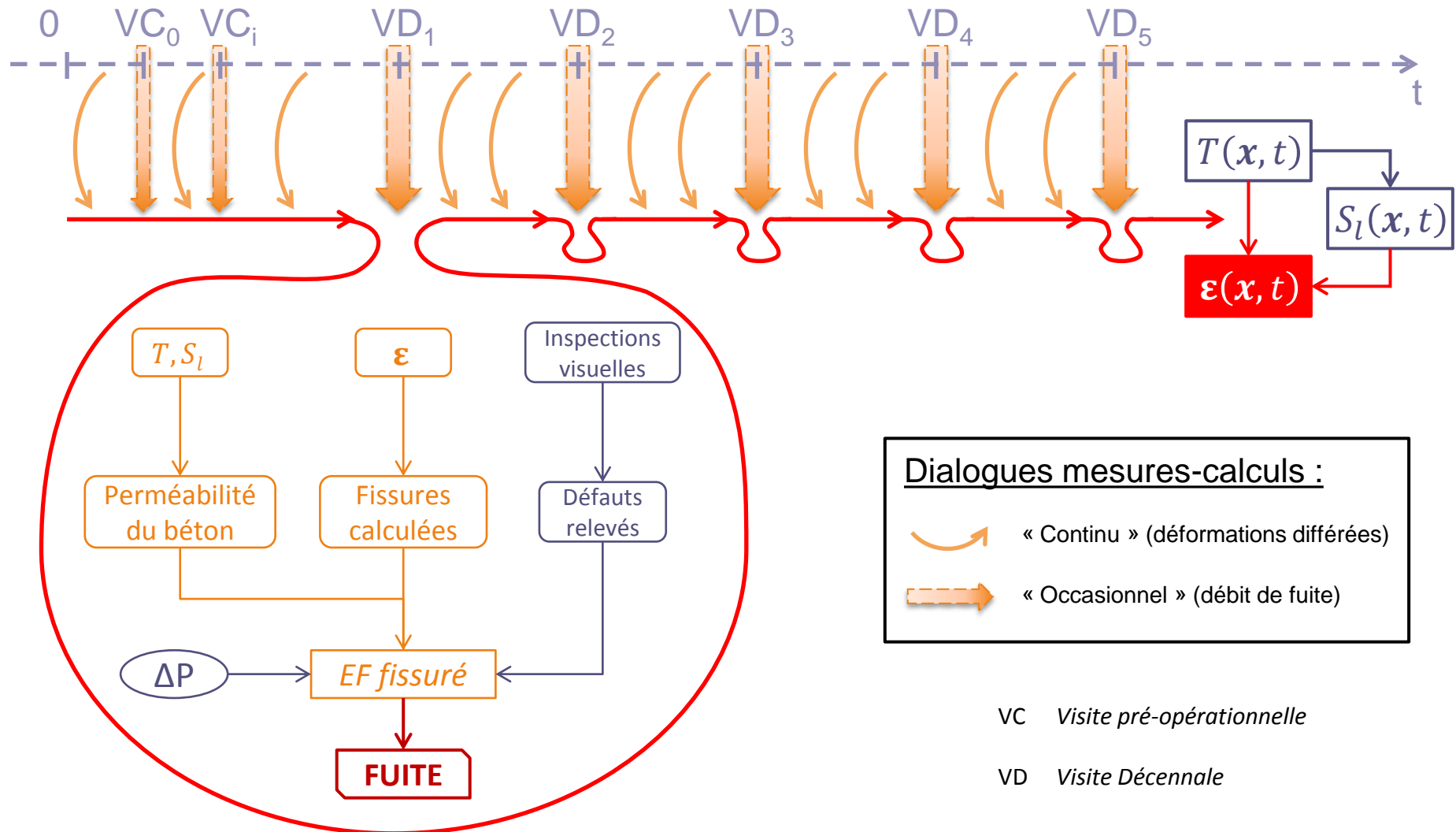
► Identification de la cinétique de dessiccation



► Identification de la cinétique de dessiccation



► Calculs T-H classiques mais impactant tous les phénomènes



Dialogues mesures-calculs :

- « Continu » (déformations différées)
- « Occasionnel » (débit de fuite)

VC Visite pré-opérationnelle

VD Visite Décennale

- ▶ **Câbles** : calcul des pertes de précontraintes selon l'ETC-C [*Code_Aster, U2.03.06*]
- ▶ **Béton** : modélisation des déformations différées

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^{\text{rd}} + \varepsilon^{\text{fd}} + \varepsilon^{\text{fp}} + \varepsilon^{\text{el}} + \varepsilon^{\text{th}}$$



- **Câbles** : calcul des pertes de précontraintes selon l'ETC-C [Code_Aster, U2.03.06]
- **Béton** : modélisation des déformations différées

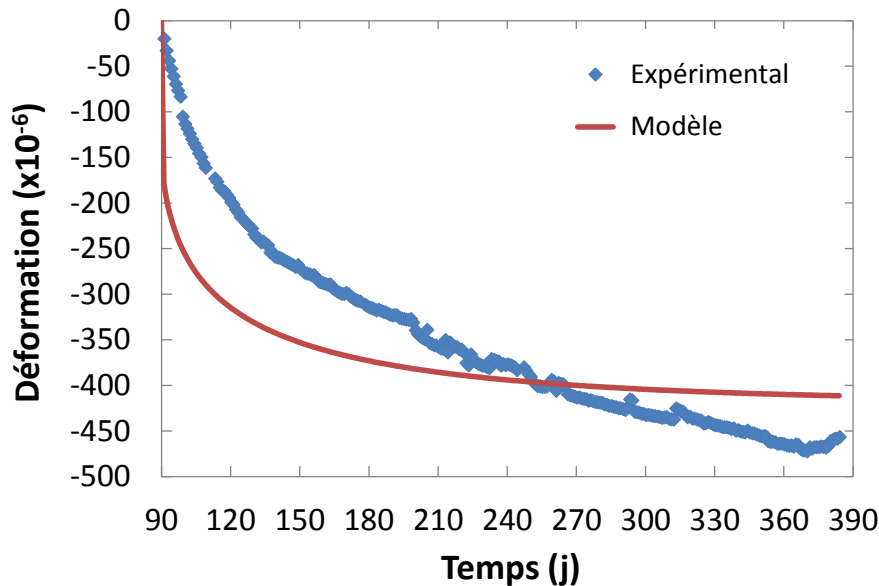
$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^{rd} + \varepsilon^{fd} + \varepsilon^{fp} + \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th}$$



- **Retrait et fluage de dessiccation**

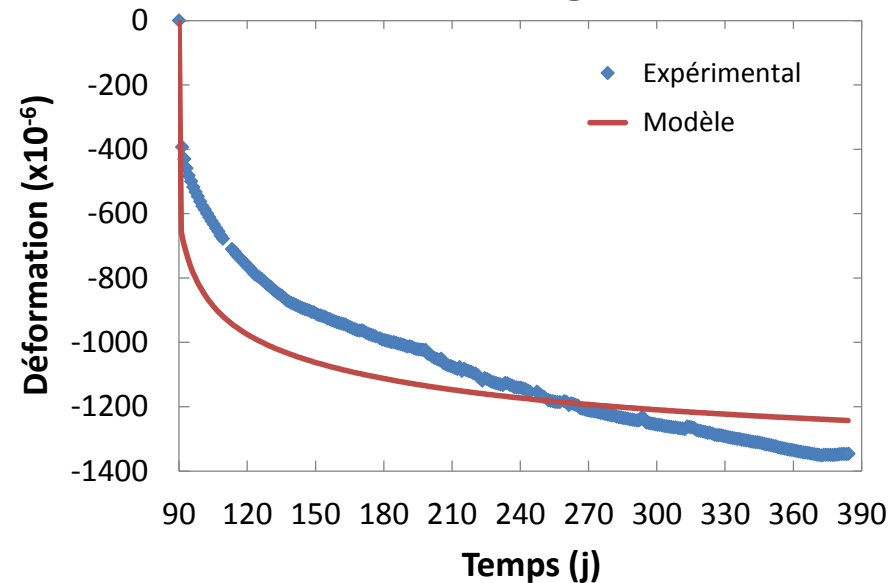
$$\dot{\varepsilon}^{rd}(x, t) = -\kappa_{rd} \dot{S}_l(x, t) \mathbf{I}_3$$

Essai de retrait de dessiccation



$$\dot{\varepsilon}^{fd}(x, t) = \kappa_{fd} |\dot{S}_l(x, t)| \tilde{\sigma}(x, t)$$

Essai de fluage total



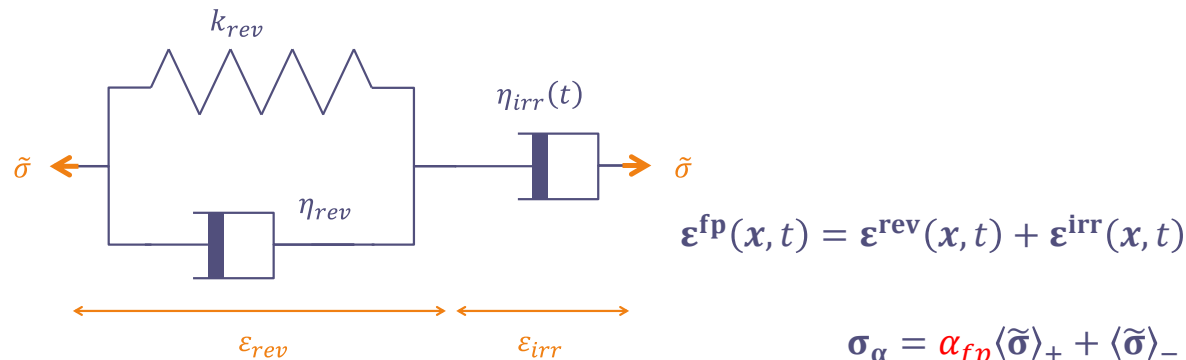
- **Câbles** : calcul des pertes de précontraintes selon l'ETC-C [Code_Aster, U2.03.06]
- **Béton** : modélisation des déformations différées

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^{rd} + \varepsilon^{fd} + \varepsilon^{fp} + \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th}$$



► Fluage propre

- Modèle adapté au comportement des enceintes [Hilaire, 2014]



$$\varepsilon^{fp}(x, t) = \varepsilon^{rev}(x, t) + \varepsilon^{irr}(x, t)$$

$$\sigma_\alpha = \alpha_{fp} \langle \tilde{\sigma} \rangle_+ + \langle \tilde{\sigma} \rangle_-$$

$$\hat{\eta}_{rev} \dot{\varepsilon}^{rev} + \hat{k}_{rev} \varepsilon^{rev} = (1 + \nu_{fp}) \tilde{\sigma} - \nu_{fp} \text{tr}(\tilde{\sigma}) \mathbf{I}_3$$

$$\hat{\eta}_{irr}(t) \dot{\varepsilon}^{irr} = (1 + \nu_{fp}) \sigma_\alpha - \nu_{fp} \text{tr}(\sigma_\alpha) \mathbf{I}_3$$

$$\hat{\eta}_{rev}(T, S_l) = \frac{\eta_{rev}}{S_l} \exp \left(\frac{E_a^l}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)$$

$$\hat{k}_{rev}(T, S_l) = \frac{k_{rev}}{S_l} \exp \left(\frac{E_a^l}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)$$

$$\hat{\eta}_{irr}(t, T, S_l) = \frac{k_{irr} t}{S_l} \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)$$

- ▶ **Câbles** : calcul des pertes de précontraintes selon l'ETC-C [Code_Aster, U2.03.06]
- ▶ **Béton** : modélisation des déformations différées

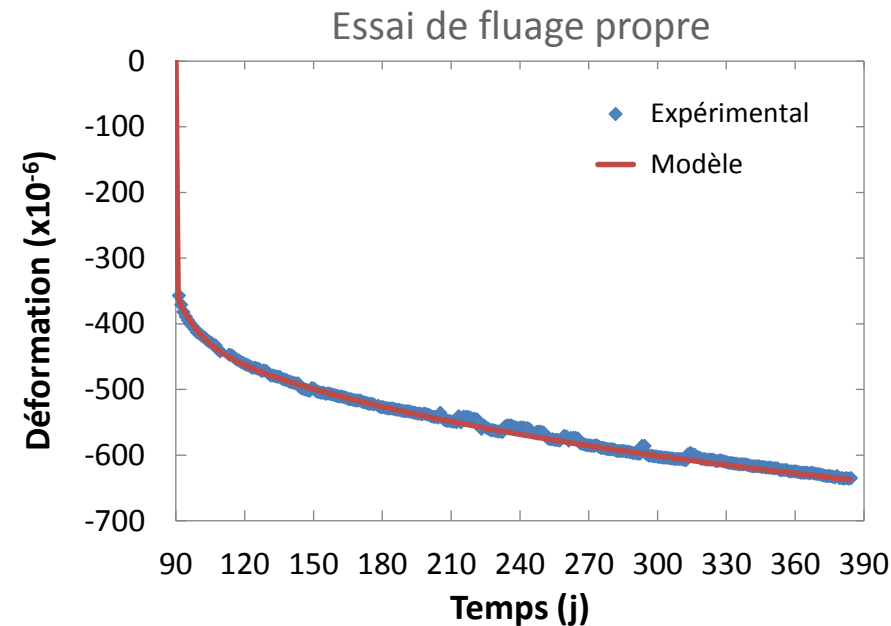
$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^{rd} + \varepsilon^{fd} + \varepsilon^{fp} + \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th}$$



▶ Fluage propre

- Modèle adapté au comportement des enceintes [Hilaire, 2014]

- Fluage bi-axial
- Evolution logarithmique des déformations à long-terme
- Thermo- et hydro-activation
- Dissymétrie traction/compression



- **Câbles** : calcul des pertes de précontraintes selon l'ETC-C [Code_Aster, U2.03.06]
- **Béton** : modélisation des déformations différées

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^{rd} + \varepsilon^{fd} + \varepsilon^{fp} + \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th}$$



► Elasticité endommageable

- MU-modèle, adapté aux cycles subis par les EI [Mazars et al., 2015]

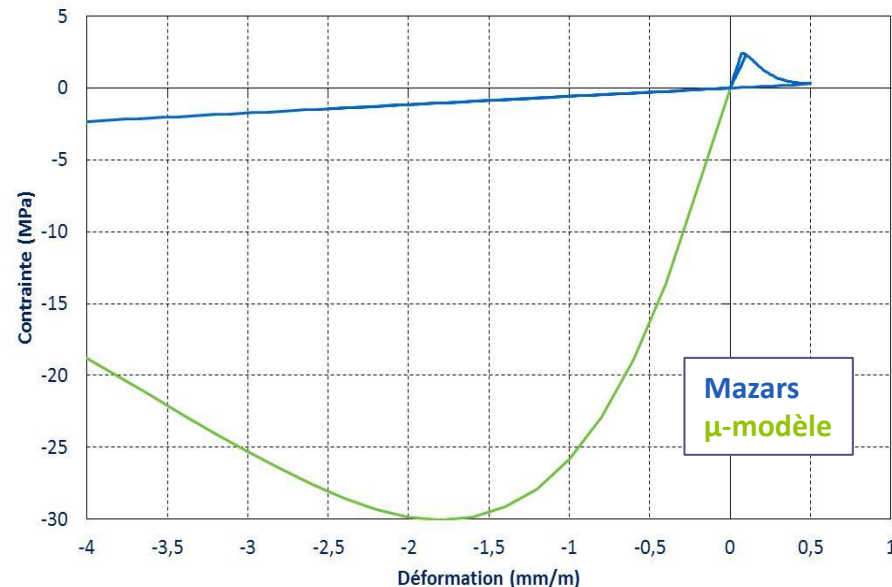
$$E\varepsilon^{el}(x, t) = (1 + \nu)\tilde{\sigma} - \nu \operatorname{tr}(\tilde{\sigma})\mathbf{I}_3$$

$$\sigma = (1 - d)\tilde{\sigma}$$

$$\varepsilon_{eq}(x, t) = \varepsilon^{el} + \chi(\varepsilon^{fp} + \varepsilon^{fd})$$

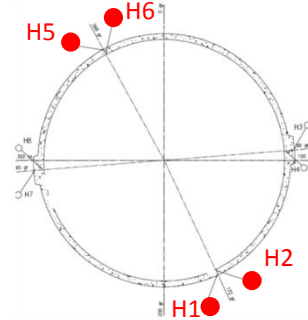
$$d = 1 - \frac{(1 - A)Y_0}{Y(\varepsilon_{eq})} - Ae^{B(Y_0 - Y(\varepsilon_{eq}))}$$

- Effet unilatéral : ouverture/refermeture des fissures
- Régularisation par méthode énergétique
- Couplage fluage-endommagement

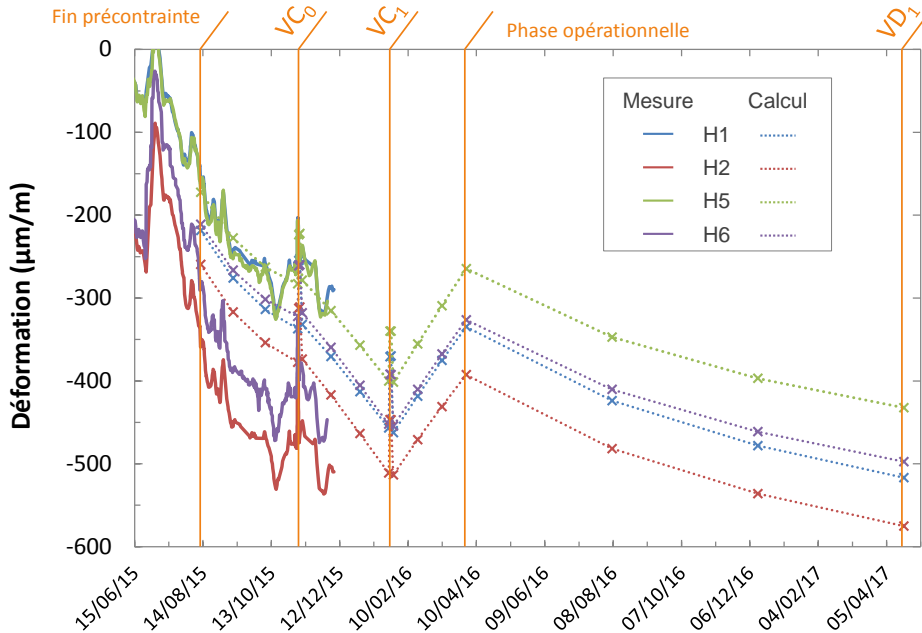


► Résultats

■ Déformations à mi-hauteur



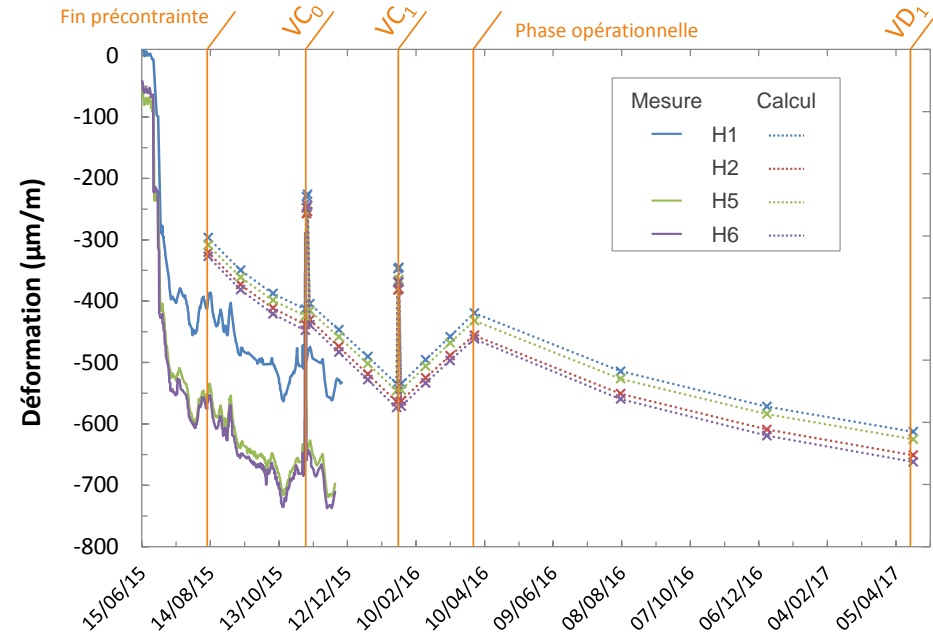
Direction verticale



+ Cinétique

+ Niveau de déformation

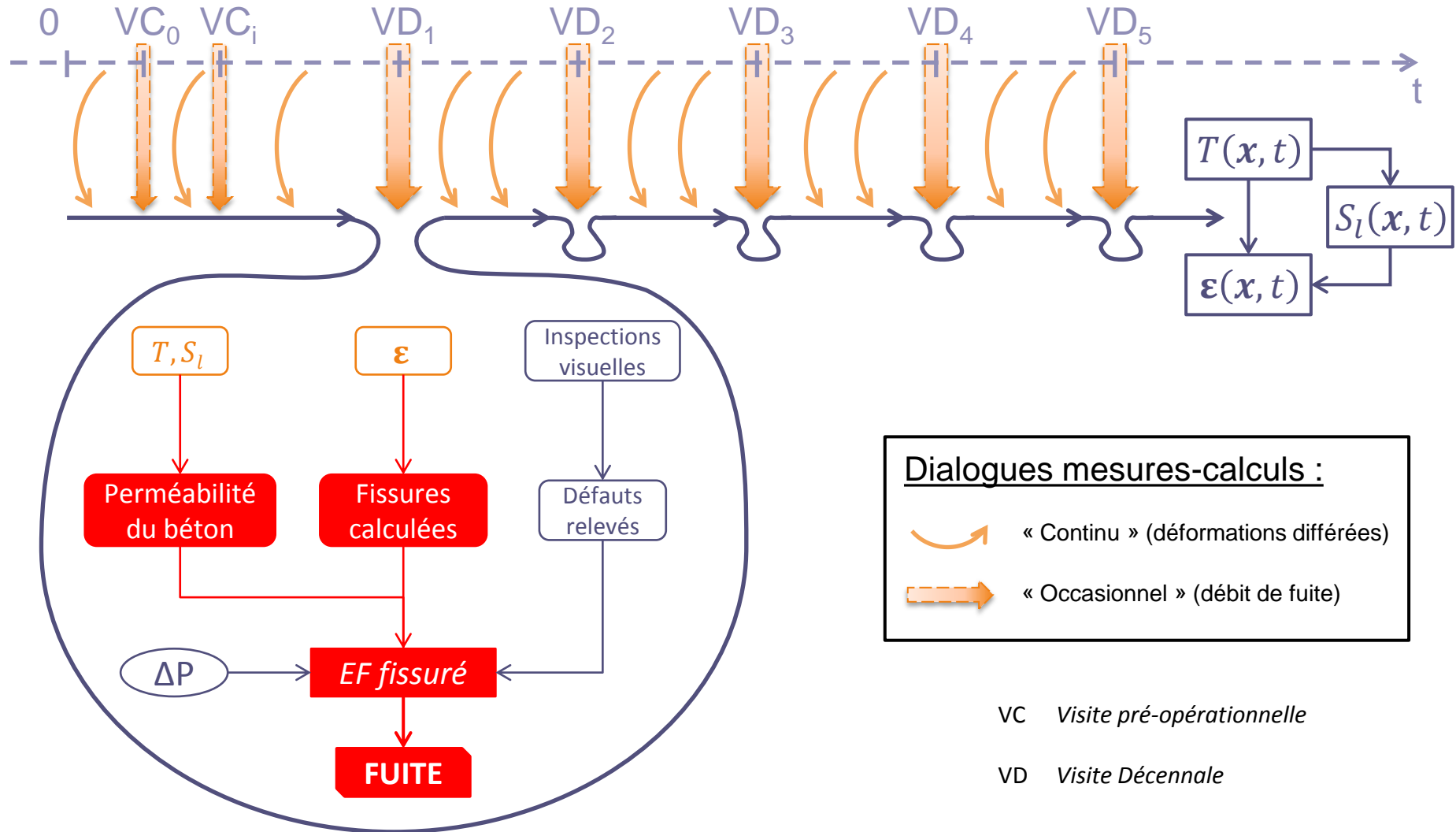
Direction tangentielle



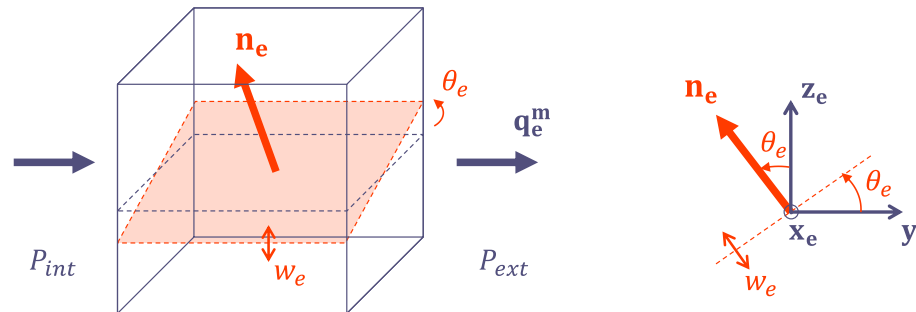
+ Cinétique

- Niveau de déformation

Calcul du débit de fuite



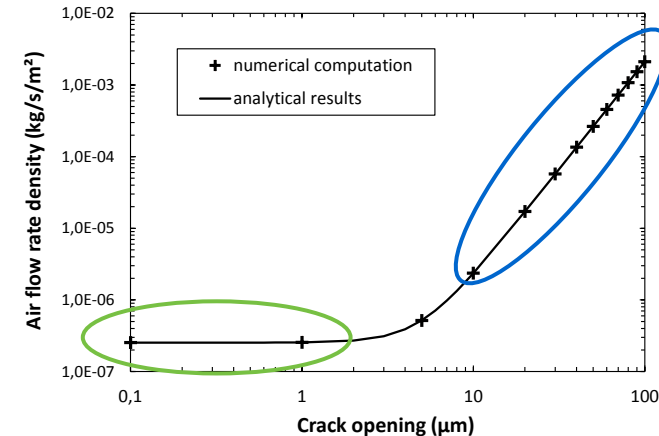
► Développement d'un macroélément 3D dédié



- 1 fissure « équivalente » d'origine mécanique par élément
- Orientation et ouverture de fissure selon [Matallah et al., 2010]
- Ecoulement **Darcy dans la matrice** poreuse insaturée et **Poiseuille dans la fissure**
- Diffusion non linéaire de la pression d'air

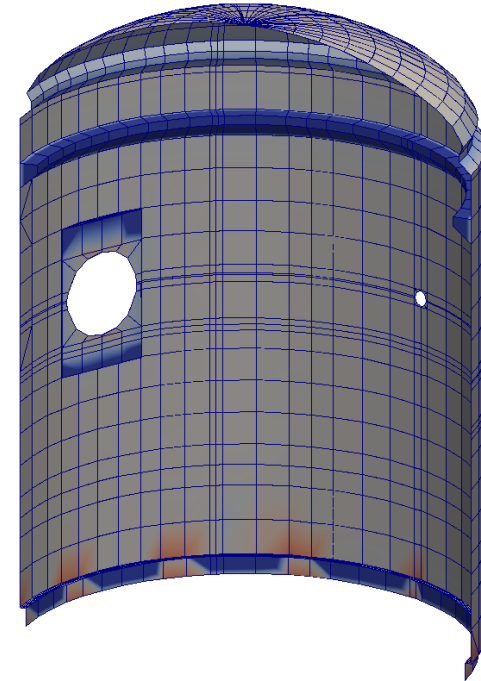
$$\mathbf{q}_e^D(\mathbf{x}, t) = -\frac{\rho_a}{\eta_a} K_{int}^a k_{ra}(S_l) \nabla P_a(\mathbf{x}, t)$$

$$\mathbf{q}_e^P(\mathbf{x}, t) = -\frac{\rho_a}{\eta_a} \frac{\zeta w_e^2}{12} (\mathbf{I}_3 - \mathbf{n}_e \otimes \mathbf{n}_e) \nabla P_a(\mathbf{x}, t)$$



► Débit total ($\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

Essai	Mesure	Calcul en aveugle	Calcul ajusté
VC_0	7,7	39,6	7,76 (+0,8%)
VC_1	9,5		9,71 (+2,2%)
VD_1	-		12,8



► Identification sur essai VC_0

- Perméabilité intrinsèque ($2,11 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$)
- Ouverture des fissures du gousset ($47 \mu\text{m}$)

► Une fois l'essai VC_0 calibré, il est possible de prédire la fuite des futurs essais

► Facilité pour implémenter et tester (*par rapport à Code_Aster*)

- LdC complexe et dépendante de plusieurs variables (t, T, S_l) mais écriture proche des équations analytiques incrémentales
- 1 seul fichier avec sections correspondant à des étapes claires (*plusieurs sources Fortran et fichiers de config.*)
- Options de calcul de la matrice tangente déjà à disposition
- Couplage fort entre fluage et endommagement (*chaînage*)

➔ **Economie de temps** (plusieurs semaines par rapport à un développement *Code_Aster*)

➔ Possibilité de **maintenir ou modifier** la LdC plus facilement

► Amélioration éventuelle pour les LdC complexes

- Pouvoir réutiliser des lois plus simples déjà existantes (Behaviour bricks)
- Endommagement non local



Merci !

Contact : Mehdi ASALI

Tel : +33 1 83 88 70 06 / +33 6 75 52 73 16

Email : mehdi.asali@oxand.com