

OUVRAGE D'ART FERROVIAIRE ATTEINT DE RSI – CARACTÉRISATIONS PAR LA MODÉLISATION

1^{er} juillet 2021

François SPATARO

SOMMAIRE

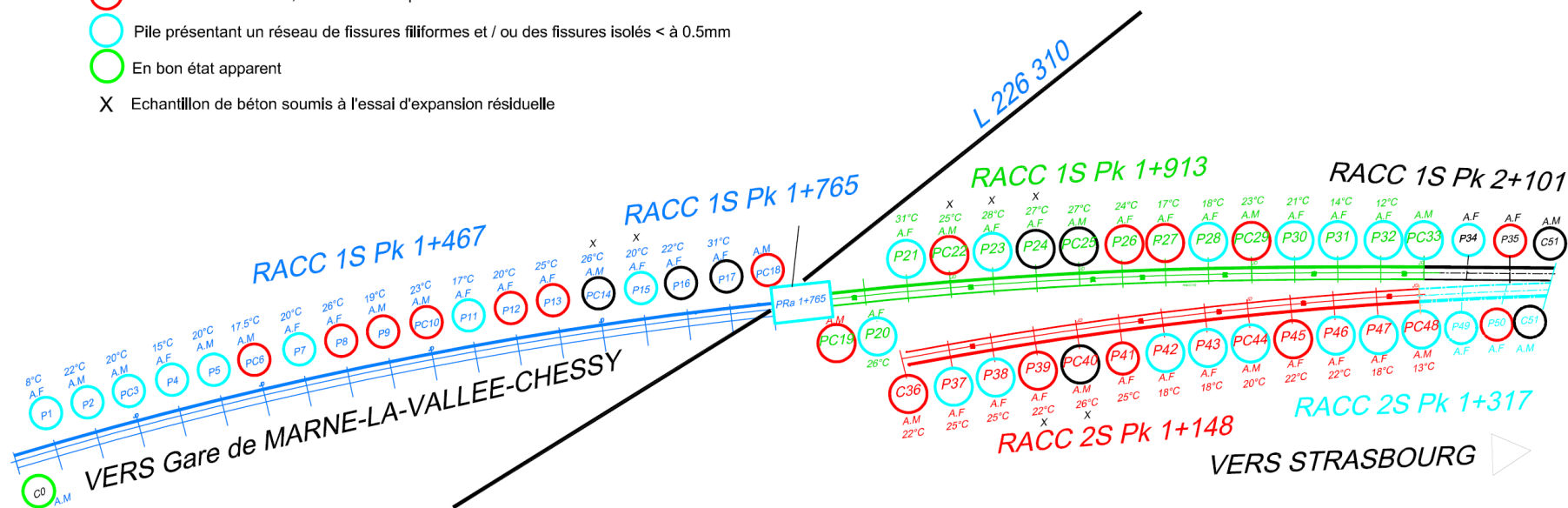
- Modélisation de la RSI
- Résultats et analyses
- Perspectives

MODÉLISATION – ÉTAT DE LA FISSURATION

Relevé SNCF de décembre 2018

— °C Température extérieure maximale lors du bétonnage

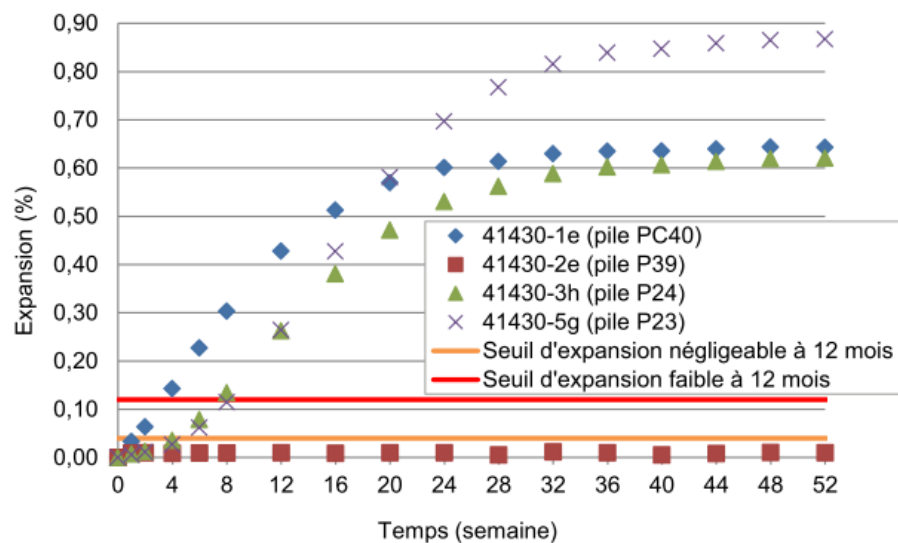
- Pile très fortement atteinte, fissuration > à 3mm
- Pile fortement atteinte, fissuration comprise entre 0.2 et 3mm
- Pile présentant un réseau de fissures filiformes et / ou des fissures isolés < à 0.5mm
- En bon état apparent
- X Echantillon de béton soumis à l'essai d'expansion résiduelle



MODÉLISATION – INVESTIGATIONS

Mesures d'expansion résiduelle

Les mesures ont été réalisées par le LERM en 2017-2018



Pile	Réf. LERM	Profondeur (cm)	Expansion résiduelle (%)			
			à 12 semaines	à 24 semaines	à 40 semaines	à 52 semaines
PC40	41430-1e	61-80	0,43	0,60	0,64	0,64
P39	41430-2e	99-117	0,01	0,01	0,01	0,01
P24	41430-3h	101-120	0,26	0,53	0,61	0,62
P23	41430-5g	101-120	0,26	0,70	0,85	0,87

Tableau 16 : Synthèse des valeurs de l'expansion résiduelle mesurée selon l'essai LPC n° 67
Le potentiel d'expansion correspondant aux valeurs affichées en **rouge** peut être qualifié de fort à 52 semaines, dès l'échéance de mesure

MODÉLISATION - CONCLUSIONS DES ÉTUDES SUR LES TEMPÉRATURES AU JEUNE ÂGE

Tableau de synthèse des températures maximales atteintes à cœur

L'étude a été menée sur 5 piles : PC14, P15, P23, P24 et PC40

P23	T° imposée	T° extérieure	Volume de la pièce (m3)	Béton		
				T° mini	T° maxi	Delta
Semelle	19,7°	22°	108	23°	65,88°	42,88°
Amorce	/	26°	44	25,5°	86,32°	60,82°
Fût + chevêtre	/	20°	103	22,4°	82,60°	60,2°

PC40	T° imposée	T° extérieure	Volume de la pièce (m3)	Béton		
				T° mini	T° maxi	Delta
Semelle	18,2°	22°	67	23°	63,36°	40,36°
Amorce	/	22°	46	23,7°	84,11°	60,41°
Fût + chevêtre	/	26°	103	24°	84,65°	60,65°

Interprétation

Toutes les piles sont très probablement sensibles au développement d'une RSI

MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Mesures d'expansion résiduelle

Le tracé de l'expansion résiduelle renseigne sur l'expansion qui ne s'est pas encore exprimée dans le béton. Les mesures d'expansion résiduelle ne donne aucune information sur le passé de l'éprouvette, en particulier sur l'expansion qui s'est déjà exprimée.

→ Hypothèse 1 : **Le gonflement s'est peu ou pas exprimé dans l'éprouvette prélevée dans la pile P23 et le gonflement mesuré sur l'éprouvette traduit le potentiel total de gonflement. Il est pris égal à 1 %.**

→ Hypothèse 2 : **Le potentiel de gonflement total ϵ_{∞} est fixé à 1 % pour toutes les piles étudiées.**

MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Calage du modèle

Il s'agit de « relier » les mesures et les conditions des essais d'expansion aux constatations et aux conditions du site.

- Début de la réaction

La RSI est une réaction interne au béton. Il est difficile de noter précisément sa date de début. Pour les piles étudiées, elle est estimée à partir des inspections détaillées et des visites sur site

→ Hypothèse 3 : **Les effets du gonflement apparaissent en 2014 pour la pile P23.**

→ Hypothèse 4 : **Les effets du gonflement apparaissent en 2012 pour la pile PC40.**

MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Calage du modèle

- Temps de latence (τ_l), temps caractéristique (τ_c) et paramètre du matériau (ε_m)

Ces paramètres sont très difficiles à fixer. Il faut faire de nombreux tests pour retenir un triplet de valeurs pouvant correspondre à la « vie » passée des structures.

Pour les établir, il convient d'estimer :

- l'expansion déjà exprimée sur site au début des mesures d'expansion résiduelle
- un facteur d'accélération « a » (ratio entre la durée qu'il faut au béton pour atteindre un niveau de gonflement en conditions réelles et la durée qu'il lui faut pour atteindre ce même gonflement durant l'essai en laboratoire).

→ Hypothèse 5 : **Dans la pile P23, l'expression de l'expansion est de 0,13 % (sur une expansion totale prise égale à 1%) et le facteur « a » est de 13,8.**

→ Hypothèse 6 : **Dans la pile PC40, l'expression de l'expansion est de 0,36 % (sur une expansion totale prise égale à 1%) et le facteur « a » est de 9.**

MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Construction du modèle de gonflement

- Modèle hydrique

→ Hypothèse 7 : **L'humidité relative est prise égale à 100 % sur tous les parements en contact avec l'air, pour tenir compte de l'environnement marécageux.**

- Modèle thermique

Les paramètres intrinsèques au béton sont identiques à celles du calcul des températures au jeune âge.

Les conditions aux limites sont fixées par des coefficients d'échange surfaciques ou par des températures imposées suivant la localisation.

MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Construction du modèle de gonflement

- Modèle mécanique

Béton

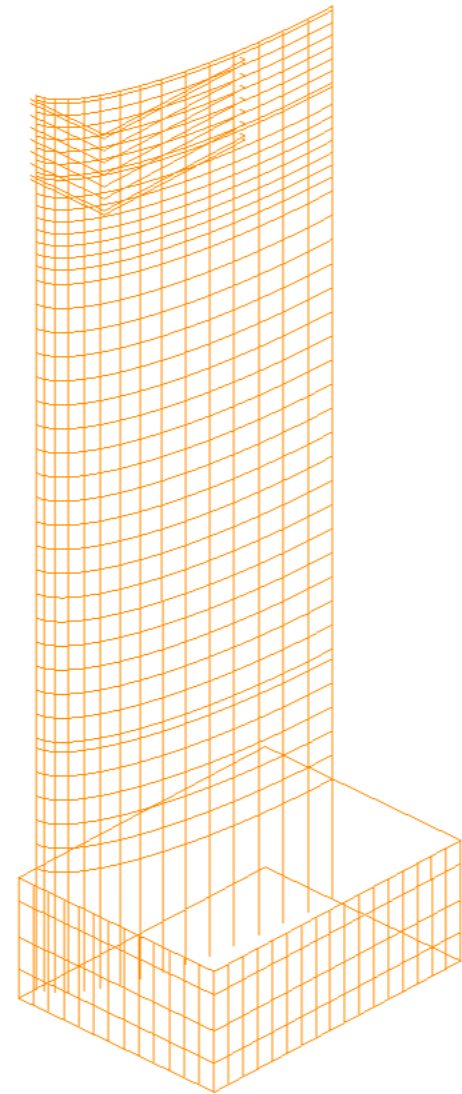
- Résistance à la compression : 32 MPa

Armatures

- Simplification du ferrailage, en gardant une équivalence sur les section globales selon les trois directions

Conditions aux limites géométriques

- Blocage des déplacements selon les plans de symétrie
- Encastrement au droit des pieux

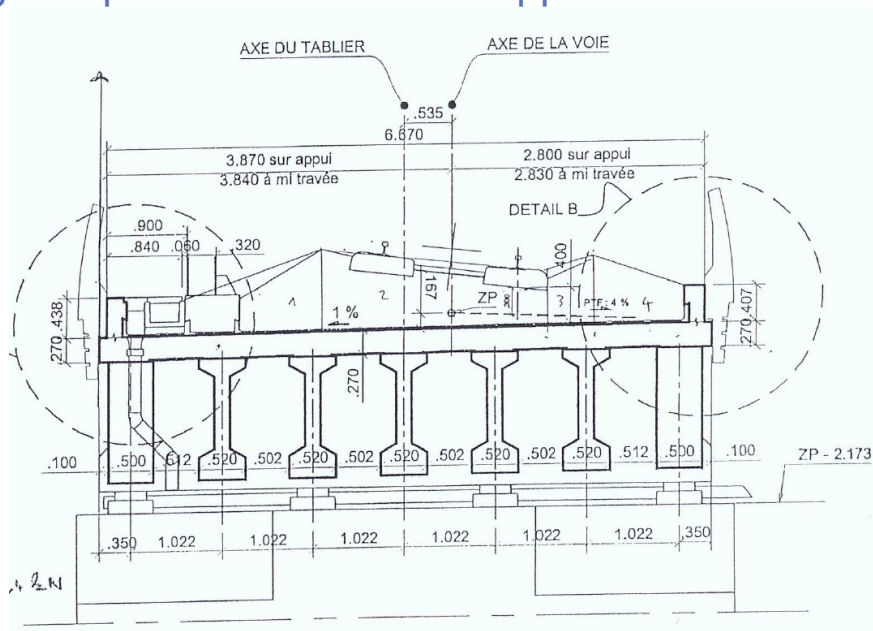


MODÉLISATION – HYPOTHÈSES RSI

Construction du modèle de gonflement

- Chargements

Il n'est pas nécessaire de modéliser très précisément le chargement des piles (charges ponctuelles ou charges réparties sur les dés d'appui).



MODÉLISATION – CALCULS

Préambule

La modélisation est faite sur une durée de 40 ans avec le module expérimental « RGIB » du logiciel Cesar-LCPC. Les pas de calcul représentent un an.

Une comparaison est faite entre le comportement calculé sur les 15 premiers pas et l'évolution des piles sur leur 15 premières années de vie.

La prospective d'évolution de 16 à 40 ans est qualitative, car le modèle considère un comportement purement élastique des matériaux.

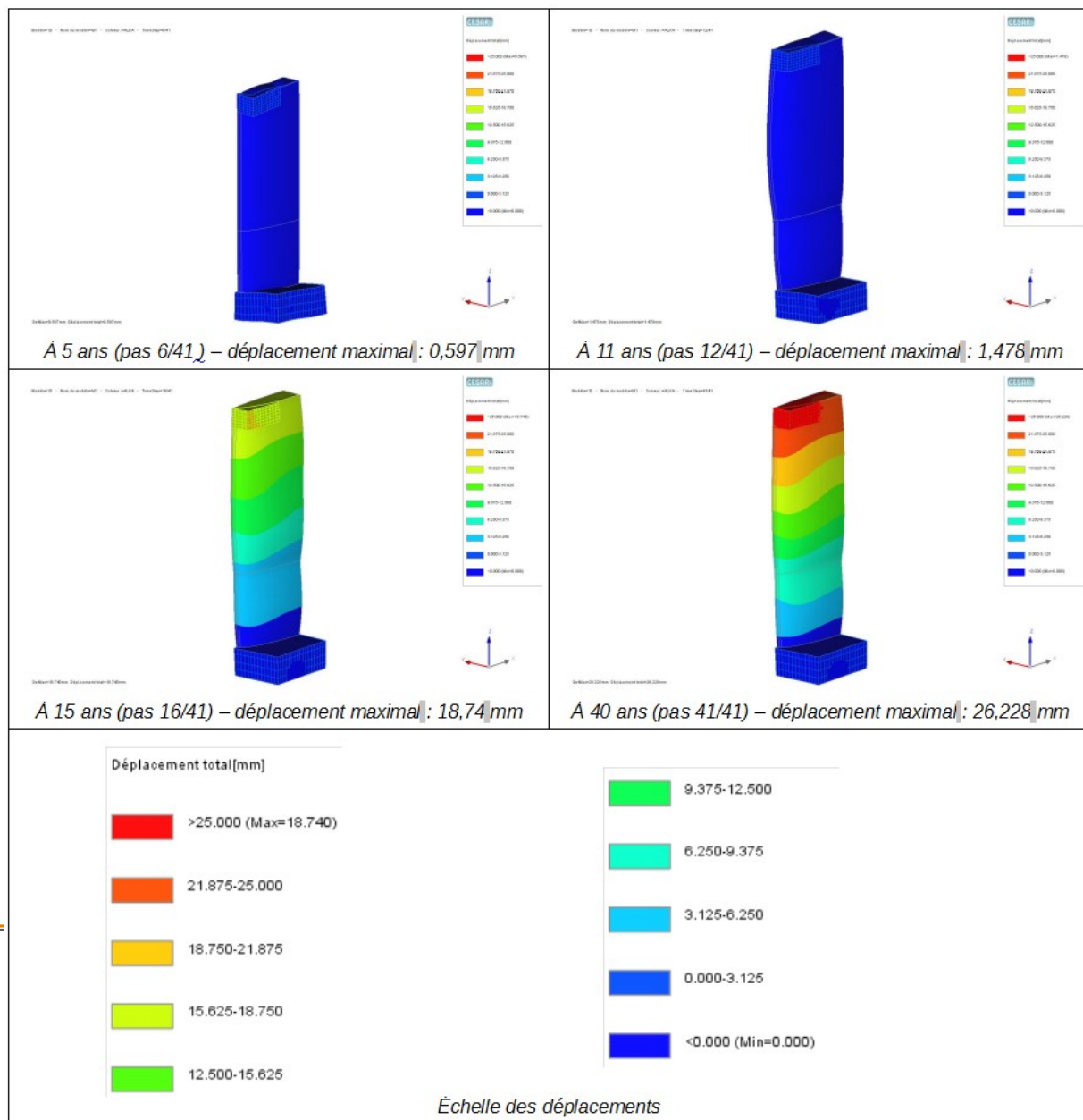
Pour la pile PC40, 12 modèles ont été construits ; pour la pile P23, 29 modèles ont été construits.

RÉSULTATS – PILE PC40

Déplacements - Déformations

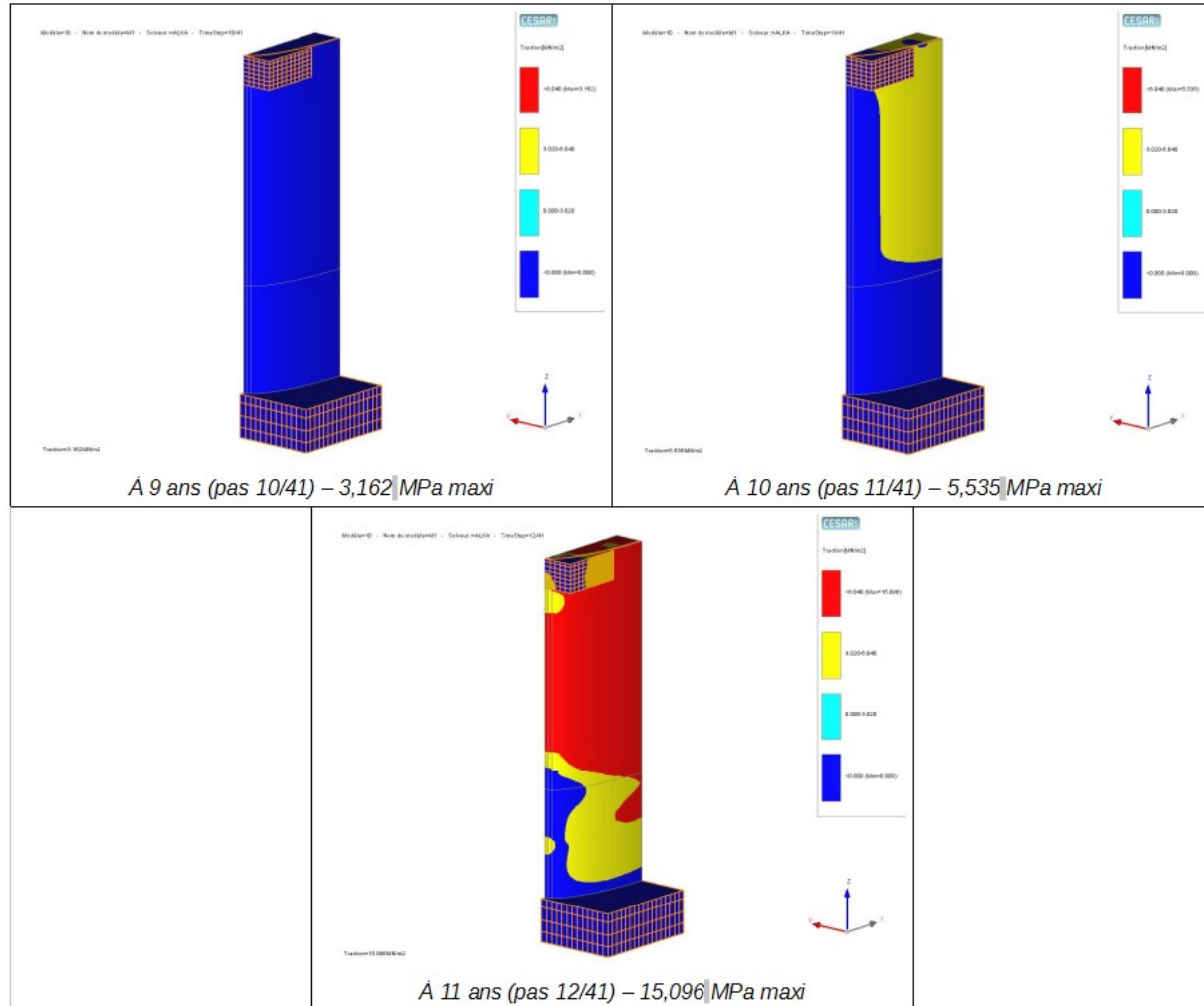
Globalement, à 15 ans,
70 % des gonflements
se seraient exprimés.

Les gonflements se font
préférentiellement selon
l'axe vertical.



RÉSULTATS – PILE PC40

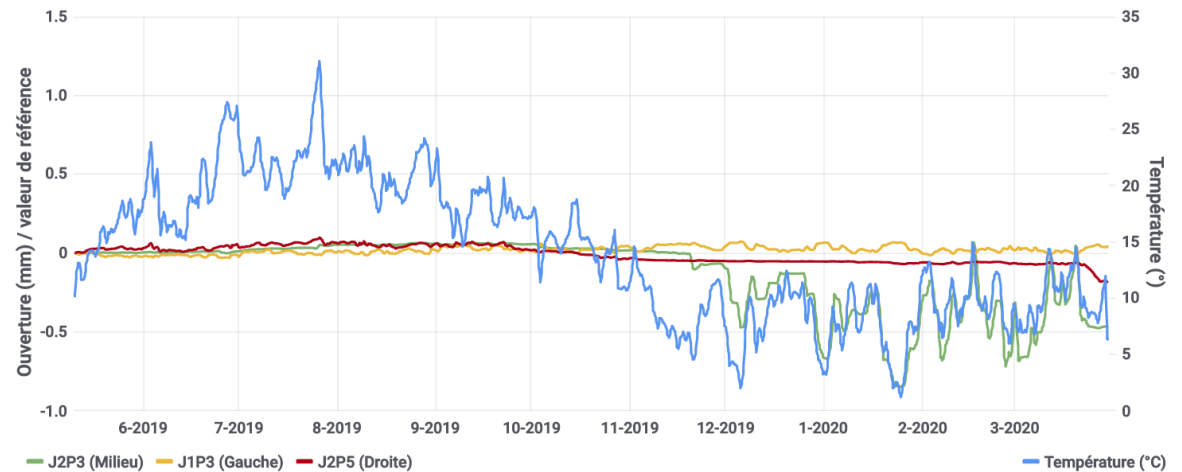
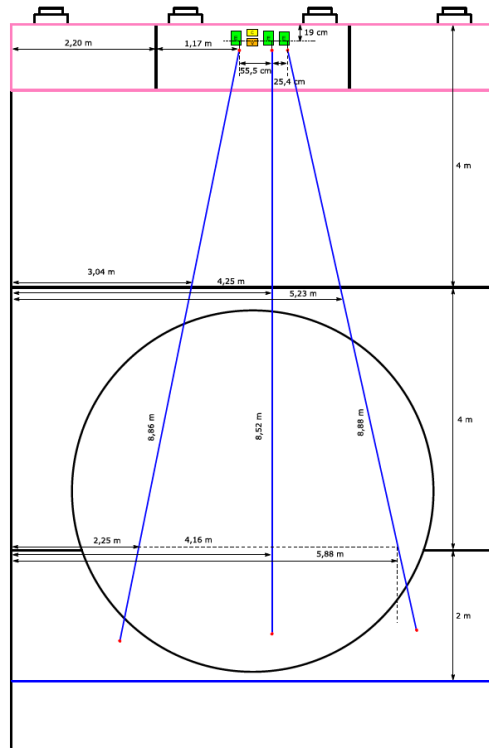
Contraintes en traction



ANALYSE – PILE PC40

Comparaisons avec les mesures sur site

La comparaison se fait avec les mesures d'un extensomètre (LERM – J2P3, au centre) et avec des mesures d'indice de fissuration.



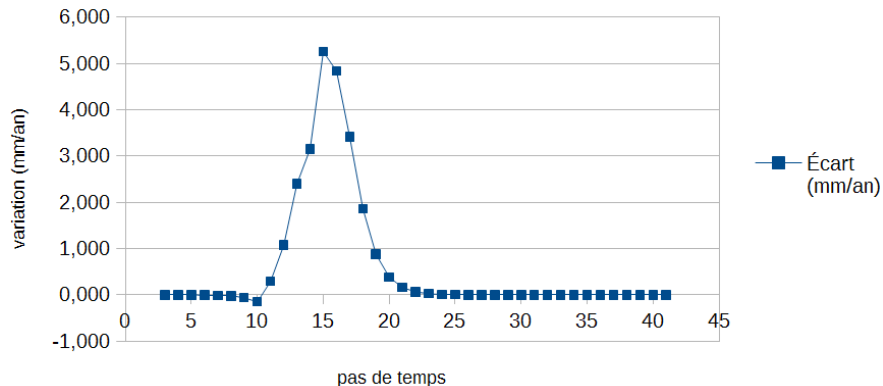
ANALYSE – PILE PC40

Comparaisons avec les mesures sur site

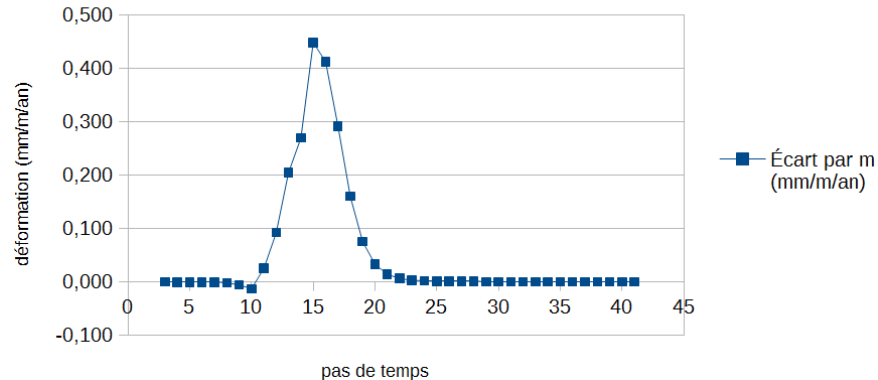
Les comparaisons entre les valeurs mesurées par l'extensomètre tendent à valider le calage du modèle (qui est en léger « retard » par rapport aux mesures).

Les comparaisons avec les valeurs de l'indice de fissuration (0,86 mm/m/an en 2019) indiquent plutôt que le modèle est en « avance » de 2 à 3 ans sur le comportement observé sur site.

Variation annuelle de la corde Po2 - Po6 (mm/an)



Déformation de la corde Po2 - Po6 (mm/m/an)

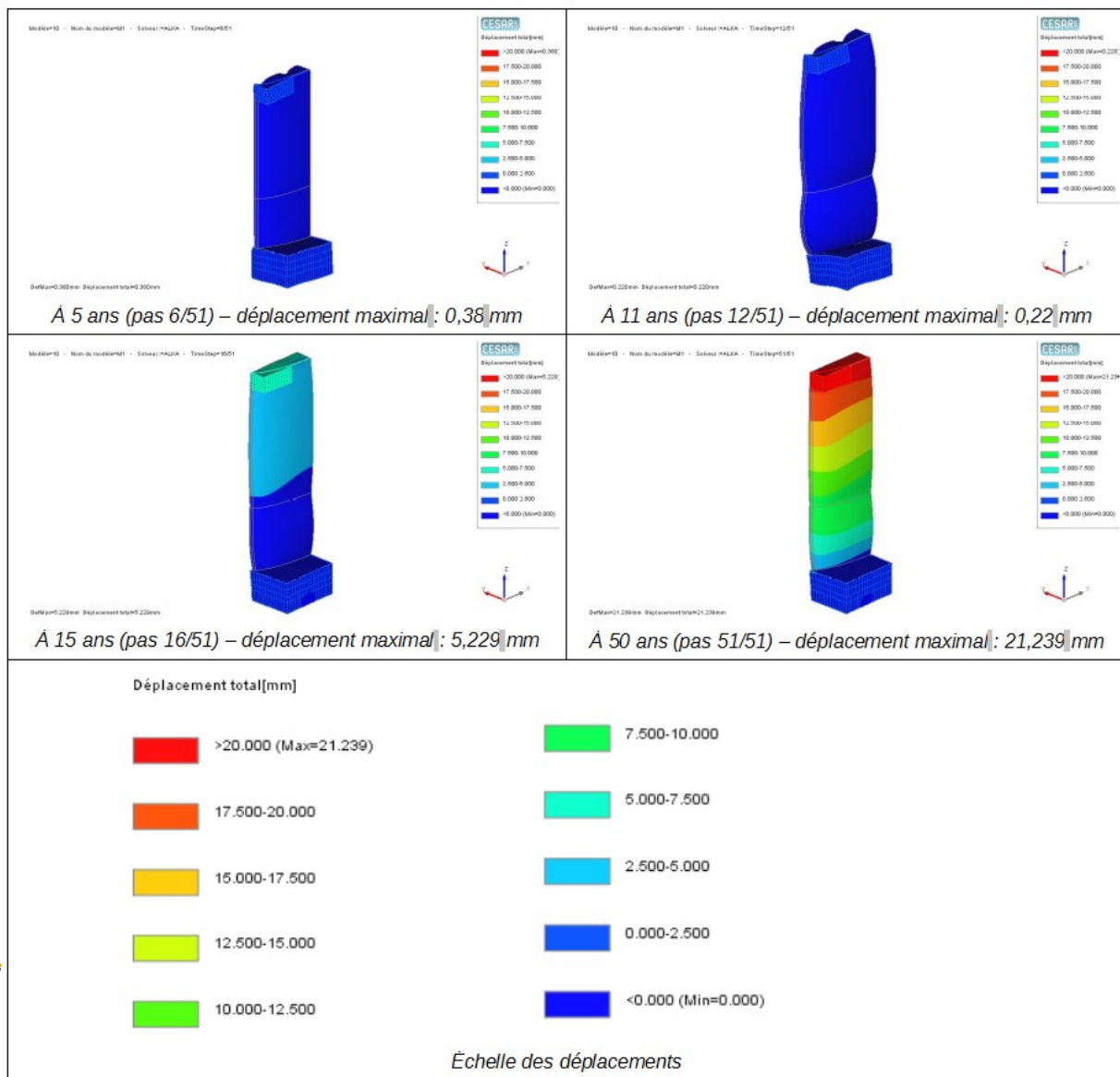


RÉSULTATS – PILE P23

Déplacements - Déformations

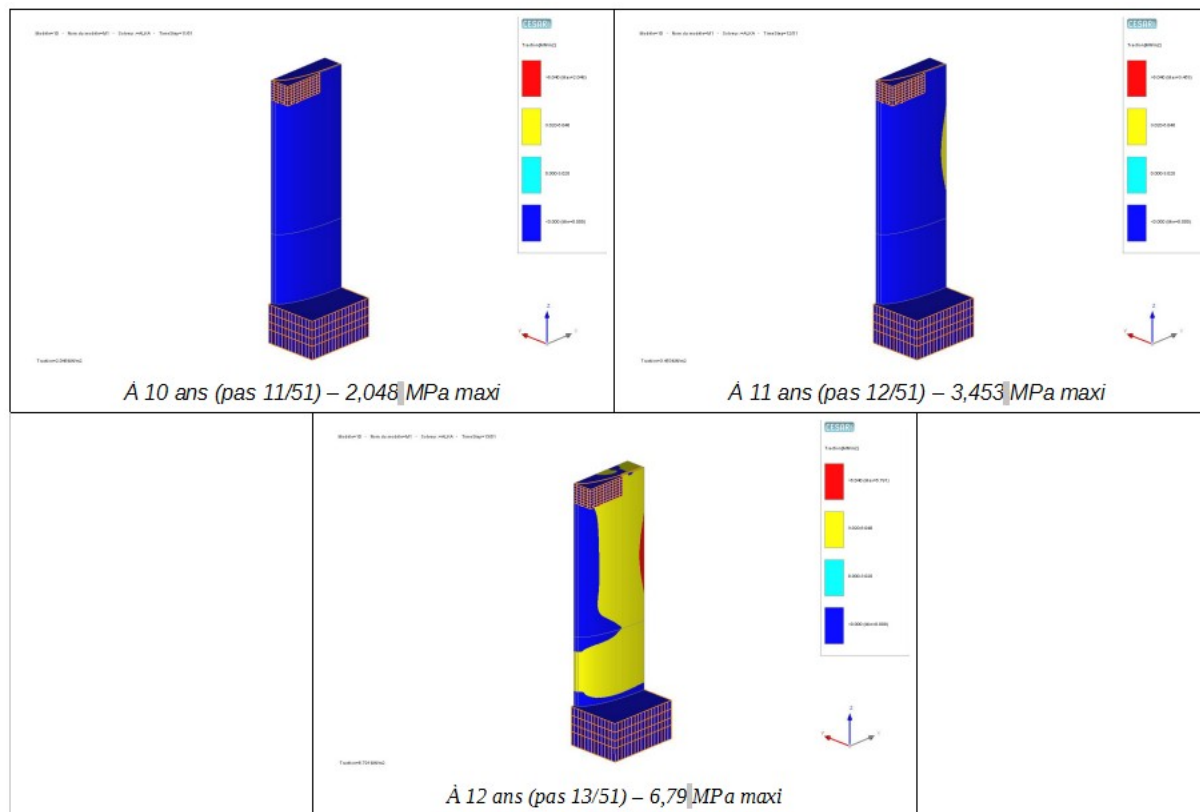
Globalement, à 15 ans, 25 % des gonflements se sont exprimés.

Les gonflements se font préférentiellement selon l'axe vertical.



RÉSULTATS – PILE P23

Contraintes

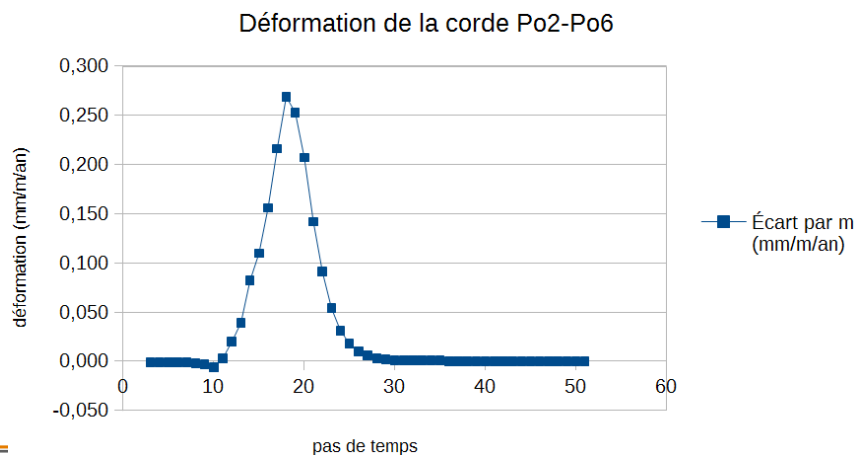


ANALYSE – PILE P23

Comparaisons avec les mesures sur site

La comparaison se fait avec les mesures d'indice de fissuration. Celui-ci varie de 0,51 mm/m (mars 2019) à 0,59 mm/m (mars 2020), soit une variation de 0,08 mm/m/an.

Cette valeur de variation est atteinte au pas 14. Le maximum, d'environ 0,27 mm/m/an, est calculé pour un intervalle de temps situé autour des pas 18 et 19. La valeur de l'indice de fissuration pourrait indiquer que nous nous situons, en 2020, plutôt autour du pas de calcul 14 (et non pas 19) et que **la RSI serait encore dans une phase de forte expansion** (au vu des désordres sur la pile, il est peu probable que nous nous trouvions après le « pic »).



PROSPECTIVES – PILE PC40 ET PILE P23

Préambule

Les prospectives sont qualitatives et traduisent des tendances probables du comportement futur de la pile.

Le modèle ne traite que des effets de la RSI sur un matériau considéré comme purement élastique. Il ne tient pas compte des effets dynamiques des charges d'exploitation. Il ne considère pas les conséquences des autres pathologies du béton armé (comme les gonflements dus à la corrosion des armatures).

PROSPECTIVES – PILE PC40 ET PILE P23

Evolution de la RSI

PC40

Le modèle montre que les effets « visibles » de la RSI (déformations et déplacements) se sont exprimés à **hauteur de 71 % à 97 % dans la pile**. Le modèle indique aussi une **fin prévisionnelle des gonflements dus à la RSI autour de l'année 2027**.

P23

Le modèle montre que les effets « visibles » de la RSI (déformations et déplacements) **se sont exprimés à hauteur de 7 à 8 % dans la pile**. Le modèle indique aussi une **fin prévisionnelle des gonflements dus à la RSI autour de l'année 2037**.

PROSPECTIVES – PILE PC40 ET PILE P23

Actions à entreprendre

PC40

Il ne sera probablement pas nécessaire de procéder à un renforcement structurel préventif. Il est toutefois recommandé d'engager des travaux, après stabilisation des gonflements, pour reconstituer l'intégrité du fût et de le protéger vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs pour assurer sa durabilité.

P23

Il est préconisé la poursuite des opérations de surveillance renforcée et une haute surveillance de cette pile, dans le cadre du programme d'instrumentation, .

Les constatations à venir pourraient conduire à procéder à un renforcement structurel préventif de la pile P23 pour lui éviter une dégradation plus importante.

En l'état, il est néanmoins recommandé d'engager des travaux pour protéger le fût vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs et ainsi limiter au mieux la création d'un environnement favorable à l'expression de la RSI.

MERCI