

N° affaire : 21-028

Date : 19 Juillet 2021

Réf. : DEB/R2EB-2021-087-KZ/LB - N° SAP 70078632

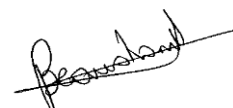
# Étude des transferts hygrothermique dans le procédé MASTROSISTEMA avec la pierre reconstituée GEOPIETRA

## Version 1

### Demander de l'étude :

**GEOPIETRA**  
VIA DELLA FERROVIA 74 / E  
IT – 25080 GAVARDO (BS), ITALIE

Auteur <sup>1</sup>	Approbateur	Vérificateur(s)
K. ZIBOUCHE	F. LEGUILLON	L. BEAUDRONT



1. Tél. : 01.64.68.89.68

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce rapport d'étude comporte 38 pages dont 29 pages d'annexes.

## Table des matières

1. OBJECTIF DE L'ETUDE .....	3
2. description succincte du procédé .....	3
3. METHODOLOGIE .....	4
3.1 Principe.....	4
3.2 Règles de calcul .....	4
3.3 Hypothèses .....	4
3.3.1 Modèles .....	4
3.3.2 Géométrie .....	4
3.3.3 Propriétés hygrothermiques des matériaux .....	4
3.3.4 Ambiances extérieures et intérieures .....	5
4. RESULTATS DES CALCULS ET ANALYSES.....	5
4.1 Présentation des résultats .....	6
4.2 Analyse .....	8
5. CONCLUSION.....	8
Annexe 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS .....	10
Annexe 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES.....	12
A. Ambiances extérieures .....	12
B. Ambiances intérieures.....	12
Annexe 3 : RESULTATS DES SIMULATIONS .....	16

## 1. OBJECTIF DE L'ETUDE

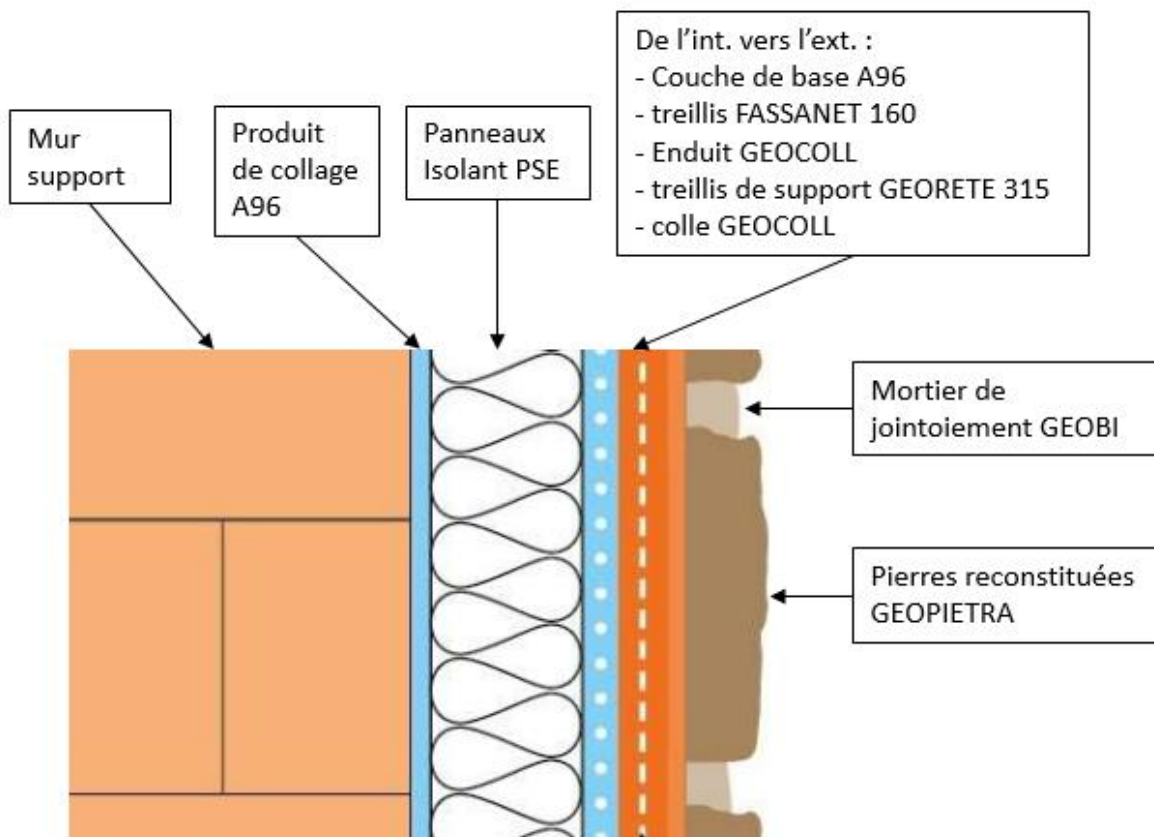
L'étude consiste à effectuer des calculs de transferts couplés chaleur-humidité à travers les matériaux constituant le procédé d'isolation par l'extérieur MASTROSISTEMA avec la pierre reconstituée GEOPIETRA. Les conditions d'humidité et de température des différents matériaux sont obtenues à partir de calculs effectués avec le logiciel « WUFI ».

Les différents paramètres d'entrée sont préalablement définis avec le demandeur. Un avis critique sur les résultats des simulations est formulé en fin de rapport.

Cette étude ne traite que de l'aspect hygrothermique du procédé et ne préjuge en rien de son aptitude à l'emploi.

## 2. DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROCEDE

Le procédé est un système d'isolation thermique avec un revêtement en pierre reconstituée GEOPIETRA destiné à être appliqué sur l'extérieur de murs en maçonnerie et en béton.



Il est constitué :

- > d'un sous-enduit mince à base de liant hydraulique obtenu à partir d'une poudre à mélanger avec de l'eau, armé d'un treillis en fibre de verre et appliqué directement sur des panneaux en polystyrène expansé collés sur le mur support.
- > d'un enduit à base de chaux hydraulique naturelle, obtenu à partir d'une poudre à mélanger avec de l'eau, armé d'un treillis en fibre de verre, appliqué sur la couche de sous enduit, et fixés mécaniquement par chevilles sur le mur support.
- > la finition est assurée par des pierres reconstituées à base de pierre volcanique, ciment, et pigments naturels

L'épaisseur d'isolant est limitée à 200 mm.

### 3. METHODOLOGIE

#### 3.1 Principe

Les calculs sont réalisés avec le logiciel « WUFI » qui permet de simuler les transferts de chaleur, de vapeur d'eau et d'eau liquide simultanément.

À partir des paramètres d'entrée fournis par le client, le logiciel permet de déterminer les champs de température, d'humidité relative et de teneur en eau, en tous points des composants de la paroi.

Les simulations ont été réalisées sur une période de 5 ans.

#### 3.2 Règles de calcul

Les simulations ont été effectuées conformément aux recommandations du projet de guide SimHuBat.

#### 3.3 Hypothèses

##### 3.3.1 Modèles

- > Les modélisations seront réalisées en monodimensionnel (1D) représentant la partie courante de la paroi ;
- > Les effets du rayonnement courtes longueurs d'onde (solaire) sont pris en compte sans ombrage. Pour le revêtement de pierre reconstitué extérieur, on considère un coefficient d'absorption solaire le plus faible  $\alpha_e=0,6$  (cas défavorable) ;
- > Côté extérieur aussi, on considère que les façades ne sont pas abritées ainsi les effets de la pluie battante sont pris en compte ;
- > La hauteur des bâtiments peut être supérieure à 20 m ;
- > Deux climats extérieurs sont considérés : Nancy (plaine continentale) et le col du Grand Saint Bernard (montage 2460 m) ;
- > Le local intérieur à une hygrométrie moyenne ( $w/n = 5 \text{ g/m}^3$ )

##### 3.3.2 Géométrie

L'étude se limite au calcul des configurations suivantes :

- > Épaisseur du revêtement 50 mm (cas défavorable)
- > Deux épaisseurs d'isolants PSE possible 100 et 200 mm
- > Mur support en maçonnerie (cas défavorable)

##### 3.3.3 Propriétés hygrothermiques des matériaux

Les caractéristiques générales des constituants ont été définies et validées par le demandeur ; elles sont reprises dans le tableau ci-dessous :

RAPPORT D'EXPERTISE

	Masse vol. $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosité $\varepsilon$ [-]	Chaleur spé. Cp [J/(kg.K)]	Cond. Therm. $\lambda$ [W/(m.K)]	Rés. Diff. Vapeur d'eau $\mu$ [-]	Courbe isotherme de sorption	Absorption d'eau liquide par capillarité Kg/(m <sup>2</sup> .√s)
<b>Brique alvéolée</b>	600	0,77	850	0,12	16	Courbe générique	0,095
<b>PSE gris</b>	15	0,95	1500	0.031	57	Courbe WUFI	0
<b>Pierre reconstitué GEOPIETRA</b>	1200	0.2	850	0.19	26.4	Courbe client	0,107
<b>Enduit colle A96</b>	1900	0,24	850	0,75	25	Courbe générique	0.025
<b>Système Mastrosistema</b> - Couche de base A96 - Treillis FASSANET 160 - Enduit GEOCOLL -Treillis GEORETE 315 -Colle GEOCOLL	1900	0,24	850	0,7	$\mu_{sec} = 28$ $\mu_{hum} = 20$	Courbe client	0.03

	Fiche technique fabricant
	Rapport d'essai fourni par le client
	Valeur générique choisie en l'absence d'information complémentaire
	Valeur issue de la base de données du logiciel WUFI, choisie en l'absence d'information complémentaire

**Tableau 1 : Caractéristiques des constituants des parois**

**Notes :**

Des valeurs génériques représentatives du type de matériau sont utilisées pour les propriétés non disponibles. Pour chaque produit, les courbes de sorption, de succion et de redistribution sont déterminées à partir de courbes génériques issues du logiciel WUFI ou de la base de données du projet PACTE-BDD Climat.

**3.3.4 Ambiances extérieures et intérieures**

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent aux climats de Nancy et du col du Grand Saint Bernard (2460 m).

Les locaux visés sont ceux avec une hygrométrie faible ou moyenne ( $W/n \leq 5 \text{ g/m}^3$ ).

La méthode de détermination des ambiances intérieures ainsi que les figures montrant l'évolution des températures et humidités intérieures et extérieures au cours d'une année sont présentées dans l'Annexe 2 à ce rapport.

**4. RESULTATS DES CALCULS ET ANALYSES**

Les résultats ci-dessous ont été obtenus à partir de la méthodologie et hypothèses du §3 et ils ne sont valables que pour ces hypothèses.

Les résultats des simulations sont présentés sous forme graphique en Annexe 3.

Les tableaux ci-après regroupent l'ensemble des principaux résultats obtenus pour la teneur en eau et l'humidité relative de la paroi globale, ainsi que pour les constituants principaux de cette paroi. Les valeurs indiquées sont celles les valeurs maximales obtenues la dernière année de simulation.

Les relevés concernent soit le produit dans sa globalité (ex : épaisseur entière d'isolant, couche de collage, pierre de revêtement...) soit des parties de ces produits se situant aux interfaces des différentes couches (zones critiques à surveiller). Dans ce dernier cas la partie prise en compte est d'environ 5 mm d'épaisseur. Les valeurs indiquées dans les tableaux seront alors la moyenne de ces parties.

Les règles d'interprétation des résultats sont précisées en Annexe 1. Cette Annexe 1 indique et explique les limites acceptables pour éviter tous risques liés à l'humidité que ce soient les risques de condensation et ou les risques de développement fongiques pour certains produits.

## RAPPORT D'EXPERTISE

## 4.1 Présentation des résultats

Config	Figure en annexe	Valeurs maximales atteintes durant la dernière année pour :	Teneur en eau kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau %M	Humidité relative%	Évolution teneur en eau la dernière année
<b>PSE 100 mm Nancy</b>	<b>Fig1</b>	Paroi globale	13,1	1,5	71,4	Stable
	<b>Fig2</b>	Mur support	4,8	0,8	62,6	Stable
	<b>Fig3</b>	Couche A96 (collage du panneau PSE)	38,1	2,0	66,1	Stable
	<b>Fig4</b>	Panneau PSE	0,2	1,2	80,3	Stable
	<b>Fig5</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96	0,1	1,0	67,1	Stable
	<b>Fig6</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema	0,2	1,6	94,3	Stable
	<b>Fig7</b>	Complexe Mastrosistema	47,7	2,5	95,0	Stable
	<b>Fig8</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE	47,7	2,5	95,0	Stable
	<b>Fig9</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra	47,8	2,5	95,0	Stable
	<b>Fig10</b>	Pierre reconstituée Geopietra	66,4	5,5	95,5	Stable
	<b>Fig11</b>	Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema	43,9	3,7	95,0	Stable
<b>PSE 200 mm Nancy</b>	<b>Fig1</b>	Paroi globale	10,2	1,4	71,1	Stable
	<b>Fig2</b>	Mur support	4,5	0,7	61,0	Stable
	<b>Fig3</b>	Couche A96 (collage du panneau PSE)	36,2	1,9	62,5	Stable
	<b>Fig4</b>	Panneau PSE	0,2	1,2	77,8	Stable
	<b>Fig5</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96	0,1	0,9	62,8	Stable
	<b>Fig6</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema	0,2	1,6	94,7	Stable
	<b>Fig7</b>	Complexe Mastrosistema	48,4	2,5	95,0	Stable
	<b>Fig8</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE	48,4	2,5	95,0	Stable
	<b>Fig9</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra	48,5	2,6	95,0	Stable
	<b>Fig10</b>	Pierre reconstituée Geopietra	67,0	5,6	95,5	Stable
	<b>Fig11</b>	Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema	44,4	3,7	95,1	Stable

## RAPPORT D'EXPERTISE

Config	Figure en annexe	Valeurs maximales atteintes durant la dernière année pour :	Teneur en eau kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau %M	Humidité relative%	Évolution teneur en eau la dernière année
<b>PSE 100 mm Grand St Bernard</b>	<b>Fig1</b>	Paroi globale	10,7	1,3	67,4	Stable
	<b>Fig2</b>	Mur support	4,1	0,7	59,0	Stable
	<b>Fig3</b>	Couche A96 (collage du panneau PSE)	36,4	1,9	62,7	Stable
	<b>Fig4</b>	Panneau PSE	0,2	1,2	78,0	Stable
	<b>Fig5</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96	0,1	0,9	63,2	Stable
	<b>Fig6</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema	0,2	1,4	89,4	Stable
	<b>Fig7</b>	Complexe Mastrosistema	36,8	1,9	86,9	Stable
	<b>Fig8</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE	38,0	2,0	87,8	Stable
	<b>Fig9</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra	35,6	1,9	86,0	Stable
	<b>Fig10</b>	Pierre reconstituée Geopietra	54,4	4,5	90,2	Stable
	<b>Fig11</b>	Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema	31,2	2,6	85,6	Stable
<b>PSE 200 mm Grand St Bernard</b>	<b>Fig1</b>	Paroi globale	8,2	1,2	66,7	Stable
	<b>Fig2</b>	Mur support	3,8	0,6	56,9	Stable
	<b>Fig3</b>	Couche A96 (collage du panneau PSE)	34,4	1,8	58,7	Stable
	<b>Fig4</b>	Panneau PSE	0,2	1,1	74,5	Stable
	<b>Fig5</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96	0,1	0,8	59,0	Stable
	<b>Fig6</b>	Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema	0,2	1,4	87,7	Stable
	<b>Fig7</b>	Complexe Mastrosistema	35,8	1,9	86,1	Stable
	<b>Fig8</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE	36,6	1,9	86,7	Stable
	<b>Fig9</b>	Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra	35,2	1,9	85,7	Stable
	<b>Fig10</b>	Pierre reconstituée Geopietra	54,3	4,5	90,1	Stable
	<b>Fig11</b>	Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema	31,1	2,6	85,5	Stable

**Tableau 2 : Synthèse des résultats des simulations suivant les cas de figure**

RAPPORT D'EXPERTISE

4.2 Analyse

L'analyse se base sur les deux critères suivants (détaillés en annexe 1) :

- le premier critère concerne la non-accumulation d'humidité. Son respect prouve que la capacité de séchage de la paroi est satisfaisante.
- le second est le risque de condensation. Pour le satisfaire la paroi ne doit contenir d'élément dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi.

Le tableau suivant résume l'évaluation de ces deux critères pour toutes les configurations.

Configuration	Non-accumulation de l'humidité	Risque de condensation	Observations
PSE 100 mm / Nancy	✓	✓	
PSE 200 mm / Nancy	✓	✓	
PSE 100 mm / Grand St Bernard (2460 m)	✓	✓	
PSE 200 mm / Grand St Bernard (2460 m)	✓	✓	

5. CONCLUSION

Cette étude a pour but d'évaluer le comportement vis-à-vis des transferts d'humidité d'un système d'isolation thermique avec un revêtement en pierre reconstituée GEOPIETRA destiné à être appliqué sur l'extérieur de murs en maçonnerie et en béton.

Au vu des résultats des simulations et des critères d'interprétation de l'Annexe1, les risques liés à l'humidité sont écartés avec les limites de validité suivantes :

- > climat de zone très froide et climat de montagne jusqu'à une altitude de 2460 m
- > locaux à hygrométrie moyenne  $w/n \leq 5 \text{ g/m}^3$
- > la hauteur des bâtiment peut être supérieure à 20 m



# ANNEXES

## ANNEXE 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS

La signification pratique des résultats peut être interprétée suivant différentes méthodes :

- > en comparant les conditions hygrothermiques obtenues avec les limites spécifiées ;
- > en contrôlant le risque d'accumulation d'humidité. L'évolution de la teneur totale en eau dans la construction sera évaluée en comparant la valeur à l'initiale à celle après un cycle ;
- > en évaluant la tolérance à l'humidité de la construction (potentiel de séchage) ;
- > en traitant les résultats transitoires à l'aide d'un modèle de post-traitement (par exemple pour le développement des moisissures ou des algues, la pourriture, la corrosion ...).

Les risques sont évalués à partir des teneurs en eau en % des humidités relatives des produits et de leurs évolutions au cours des trois ans.

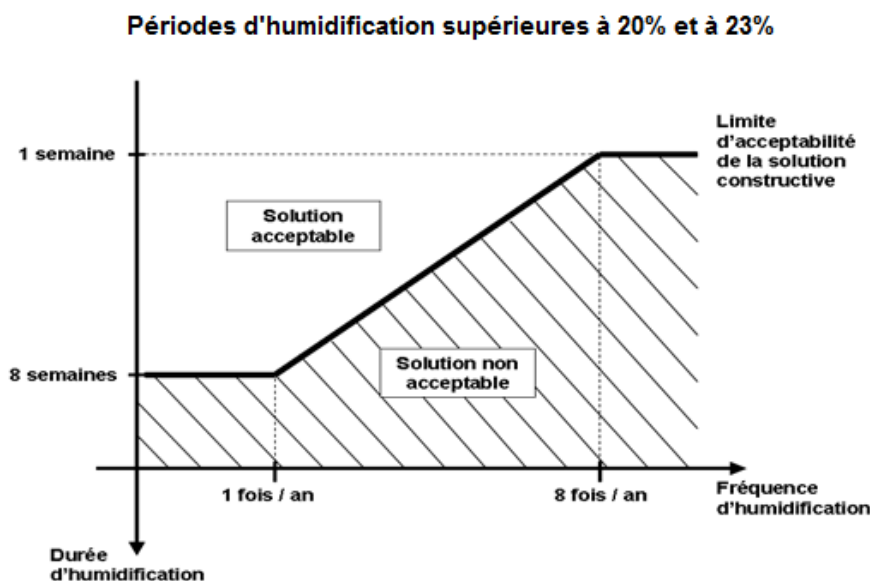
Le premier élément à vérifier est la teneur en eau de la paroi dans sa globalité. Si celle-ci augmente significativement d'une année sur l'autre, cela signifie que les transferts hygrothermiques dans la paroi ne sont pas stables. La teneur en eau de la paroi pourrait augmenter au-delà des trois ans de simulation et conduire à des condensations importantes.

Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne pourra pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. En effet les tolérances du logiciel font qu'au-delà de 98 %, le risque de condensation peut être considéré comme très probable.

Tous les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (panneaux de contreventement, montants et traverses d'ossature, ...) sont dimensionnés en classe de service 2 (pour limiter le fluage). Les teneurs en eau en masse en tout point de ces éléments ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines par an, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine.

De même, la teneur en eau d'un élément de la paroi contenant des produits biosourcés n'intervenant pas dans la stabilité de l'ouvrage (tasseaux, isolants, panneaux à usage non structuraux, ...), cette teneur en eau ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse. Cette limite de 23 % est basée sur des travaux en laboratoire et sur des expériences reconnues et réussies, prenant en compte les diverses conditions de germination des spores. Il est à noter que la durée de 8 semaines au-delà de 23 % est défavorable, même si elle est atteinte de manière discontinue. Les périodes au-delà de 23 % inférieures à une semaine ne seront pas comptabilisées, n'étant pas suffisamment longues pour provoquer le développement fongique.

Le graphique ci-après montre l'acceptabilité d'une solution constructive en fonction des éléments exposés ci-dessus.



**Figure a : Représentation des limites d'humidification des matériaux**

## RAPPORT D'EXPERTISE

Une autre propriété influant le comportement du matériau biosourcé à l'humidité est sa capacité à pouvoir contenir à la fois de l'eau libre et/ou de l'eau liée.

L'eau est dite liée ou hygroscopique quand elle est « retenue » chimiquement (liaisons hydrogènes) par les fibres de bois. Les molécules d'eau sont alors fixées dans le matériau lui-même.

L'eau libre ou capillaire, donc liquide, apparaît dans le bois lorsque son taux d'humidité (en % en masse) dépasse le point de saturation des fibres. Pour les principales essences résineuses utilisées en structure, le point de saturation des fibres est atteint lorsque l'humidité du bois dépasse 30 % en masse.

Les cas de calcul où l'humidité du bois ou des matériaux à base de bois (panneaux, isolants) dépasse 30 % sera donc également un critère réhibitoire, l'eau liquide présente dans une paroi fermée étant très difficile à évacuer.

## ANNEXE 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES

### A. Ambiances extérieures

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent aux climats de Nancy et au col du Grand Saint Bernard.

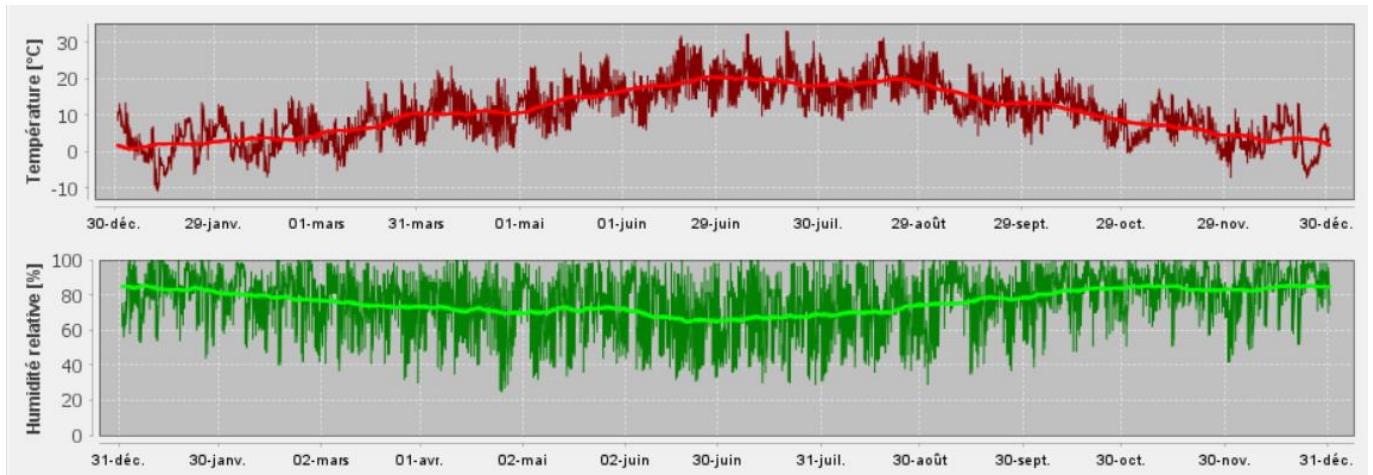


Figure A2-1 : Variation de la température et du taux d'humidité extérieurs au cours d'une année à Nancy

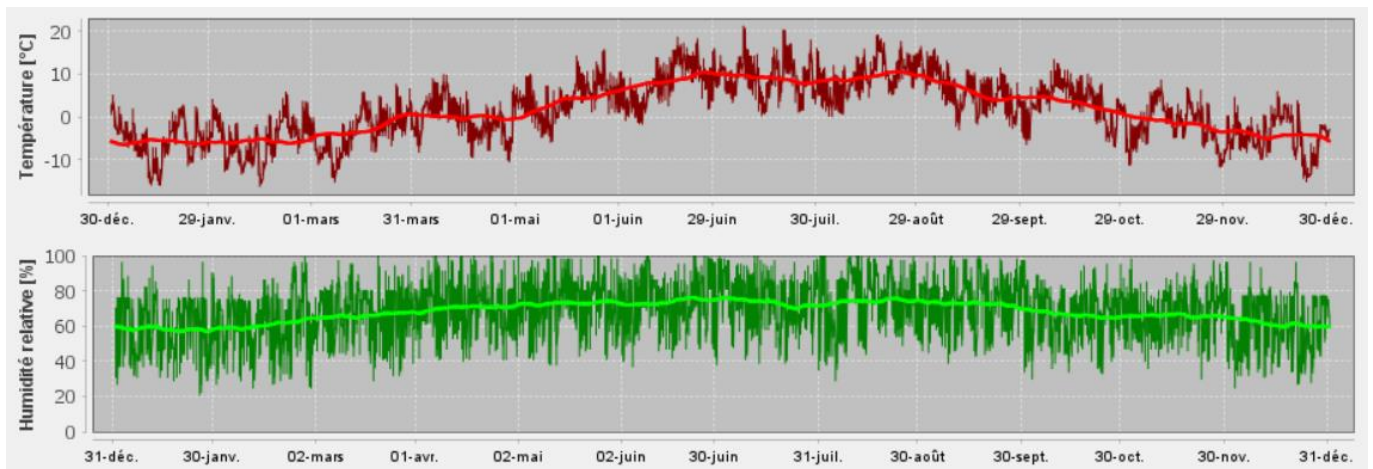


Figure A2-2 : Variation de la température et du taux d'humidité extérieurs au cours d'une année au col du Grand Saint Bernard

### B. Ambiances intérieures

Dans les documents DTU 20.1, DTU 40.1, 40.2, 40.3, 40.4 et 43.3, quatre types de locaux sont définis :

- > local à faible hygrométrie :  $W/n \leq 2,5 \text{ g/m}^3$ ,
- > local à hygrométrie moyenne :  $2,5 < W/n \leq 5 \text{ g/m}^3$
- > local à forte hygrométrie :  $5 < W/n \leq 7,5 \text{ g/m}^3$
- > local à très forte hygrométrie :  $W/n > 7,5 \text{ g/m}^3$

Avec :

W : quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur d'un local par heure, exprimée en grammes par heure (g/h),

RAPPORT D'EXPERTISE

n : le taux horaire de renouvellement d'air exprimé en mètre cube par heure (m3/h)

En règle générale :

- > Local à faible hygrométrie : les locaux équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau dès qu'elles se produisent (par exemple : hottes, ...) sont des locaux à faible hygrométrie.
- > Local à hygrométrie moyenne : les locaux correctement chauffés et ventilés, sans sur-occupation, et les locaux de production dont le process ne génère pas de vapeur d'eau sont des locaux à hygrométrie moyenne.
- > Local à forte hygrométrie : les locaux médiocrement ventilés et les locaux avec forte concentration humaine sont des locaux à forte hygrométrie.
- > Local à très forte hygrométrie : les locaux spéciaux où l'activité maintient une humidité relative élevée sont des locaux à très forte hygrométrie.

Ensuite, il existe également dans ces documents DTU un classement des locaux à exposition à l'eau liquide projetée sur les parois. Ce classement comporte les cinq niveaux ci-dessous :

- > EA : locaux secs ou faiblement humides
- > EB : locaux moyennement humides
- > EB+ : locaux privatifs : locaux humides à usage privatif
- > EB+ : locaux collectifs : locaux humides à usage collectifs
- > EC : locaux très humides en ambiance non agressive

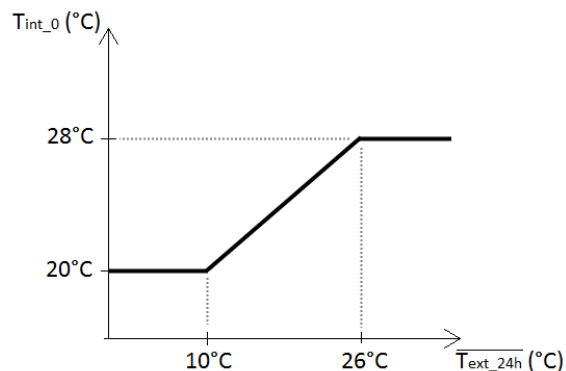
Les locaux à hygrométrie moyenne ( $W/n=5g/m^3$ ) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privatifs.

Les locaux à forte hygrométrie ( $W/n=7,5g/m^3$ ) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privatifs et pour les locaux à usage collectifs.

L'ambiance intérieure prise en compte pour les simulations de cette étude est hygrométrie moyenne avec un  $W/n$  maximum de  $5 g/m^3$ .

Durant la période hivernale, la température minimale possible dans le local est fixée à  $20^{\circ}C$ . Cette température est néanmoins directement influencée par la température extérieure. De ce fait, la température intérieure est définie comme fonction de la moyenne glissante de la température extérieure sur 24h, telle que :

$$\overline{T_{ext_{24h}}}(h) = \int_{h-23}^h T_{ext}(h)$$



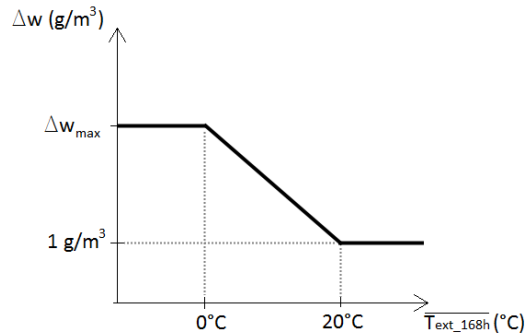
Abaque de détermination de la température intérieure

L'humidité absolue de l'air intérieur est définie à l'aide de la moyenne glissante de la température extérieure sur une semaine, telle que représentée sur l'abaque ci-dessous. La valeur de cet excès est au minimum égale à  $1g/m^3$  allant jusqu'à la valeur limite du climat ( $W/n = 5g/m^3$  dans notre cas).

RAPPORT D'EXPERTISE

$$\overline{T_{ext_{168h}}}(h) = \int_{h-167}^h T_{ext}(h)$$

$$w_{int_0}(h) = \overline{w_{ext_{168}}}(h) + \Delta w(h)$$



Abaque de détermination de l'excès d'humidité intérieur

L'humidité relative de l'air intérieur est déterminée par le calcul suivant :

$$HR_{int_0}(h) = \frac{w_{int_0}(h) \cdot R \cdot T_{int}(h)}{M_{eau} \cdot p v_{sat}(T_{int}(h))}$$

Où :

- > HR : humidité relative en %,
- > W : humidité absolue en  $kg_{eau}/kg_{air\ sec}$ ,
- > T : température en K,
- > Pv : pression de vapeur d'eau en Pa,
- > M : masse molaire en kg/mol,
- > R : constante des gaz parfaits en J/mol.K.
- > Le suffixe *int* pour intérieur ; le suffixe *int\_0* pour intérieur en évolution libre ; le suffixe *sat* pour saturante.

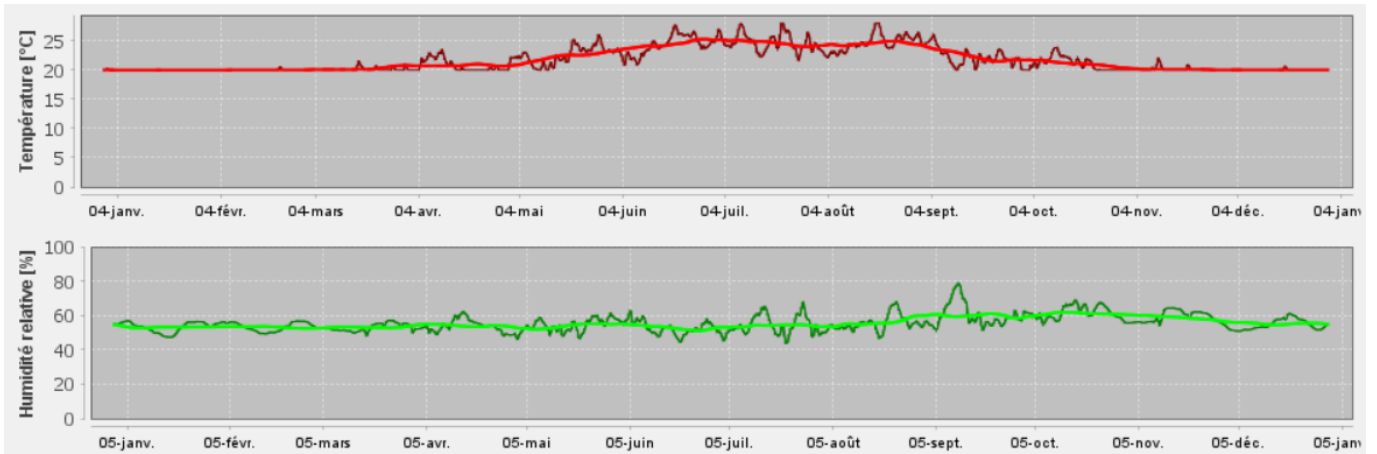


Figure A2-3 : Variation de la température et du taux d'humidité intérieurs au cours d'une année à Nancy

RAPPORT D'EXPERTISE

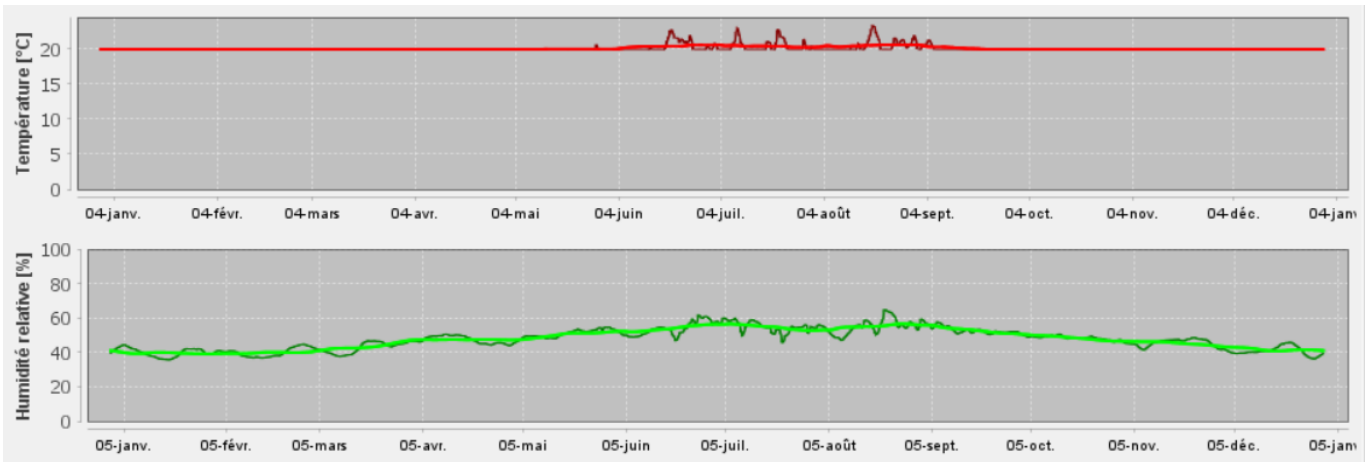
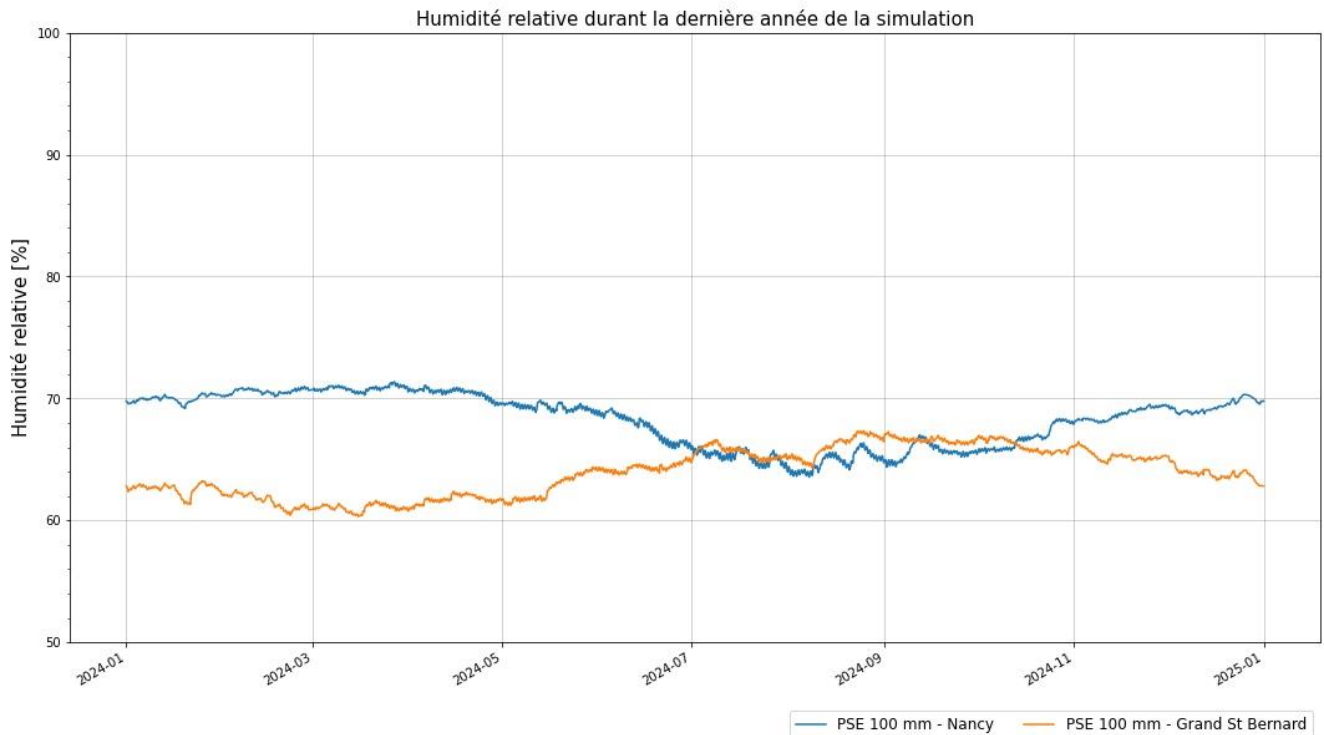
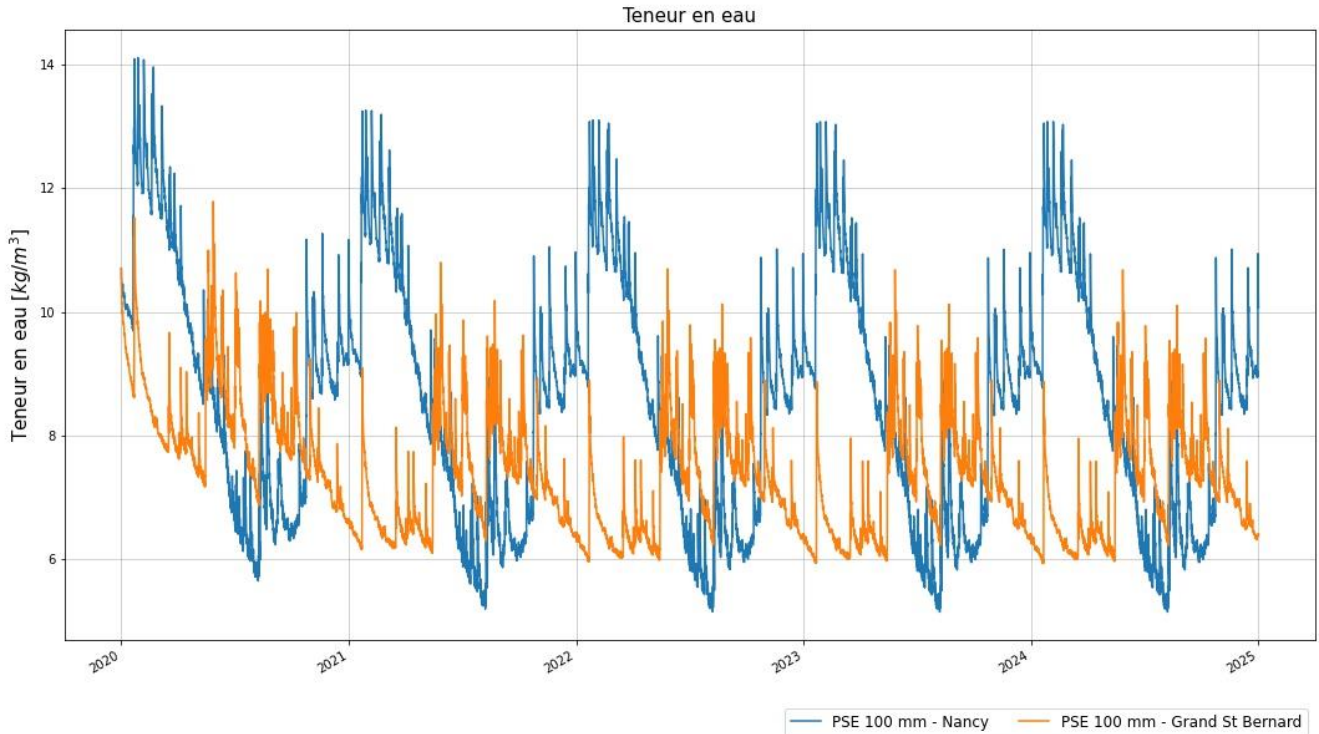


Figure A2-3 : Variation de la température et du taux d'humidité intérieurs au cours d'une année au col du Grand Saint Bernard

### ANNEXE 3 : RESULTATS DES SIMULATIONS

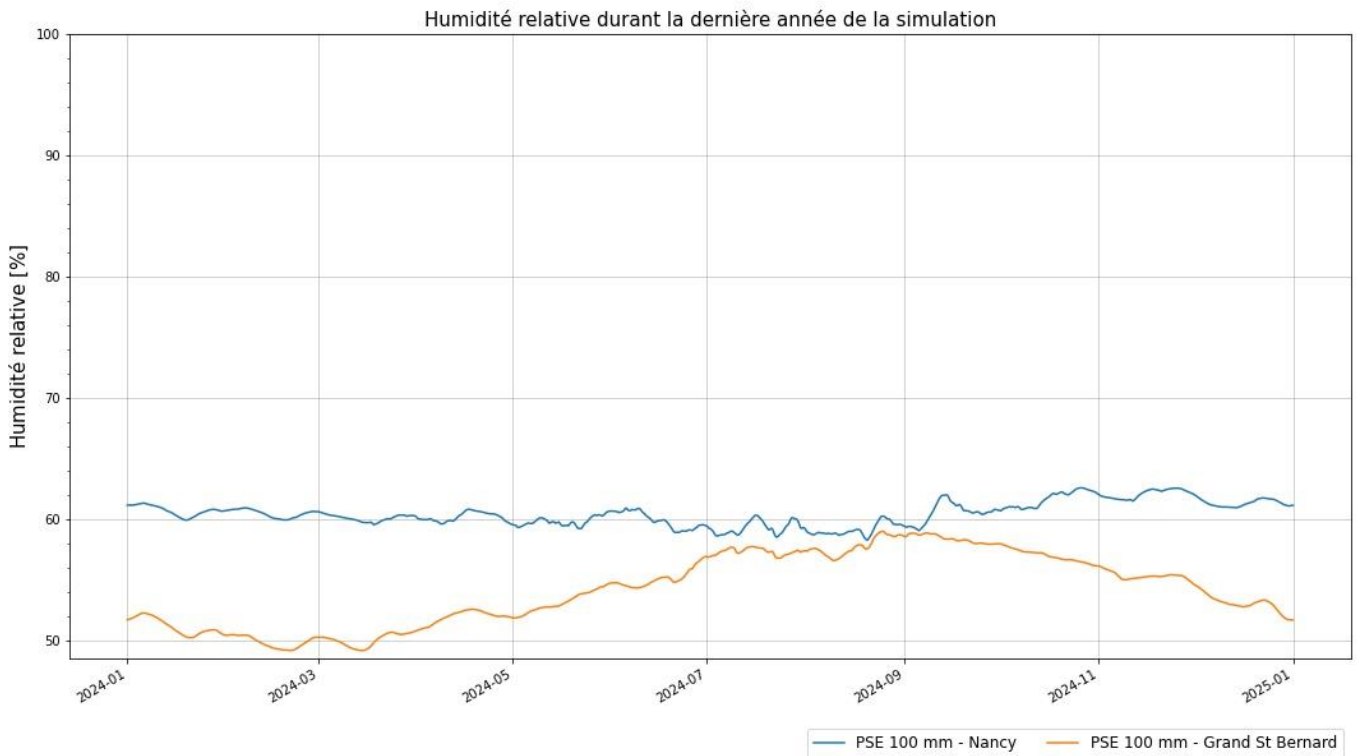
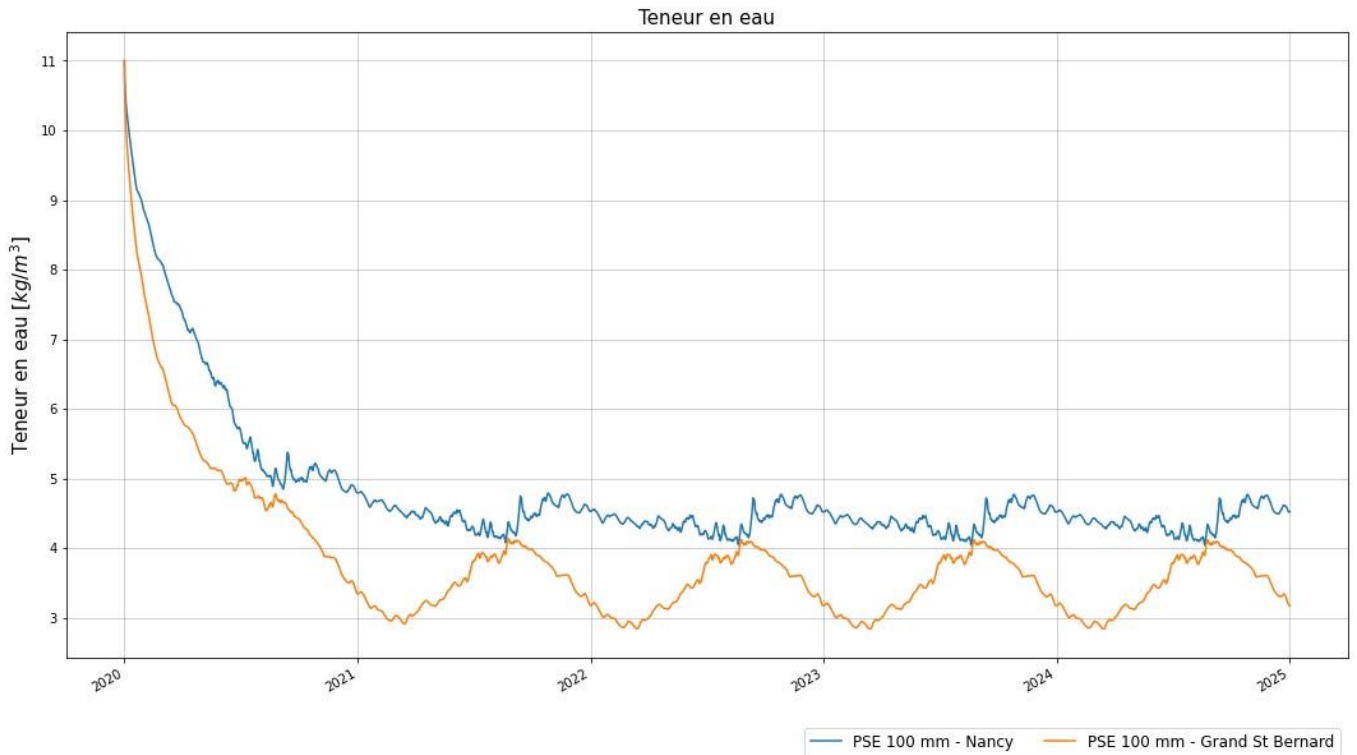
PSE 100 mm | Fig1 : Paroi globale





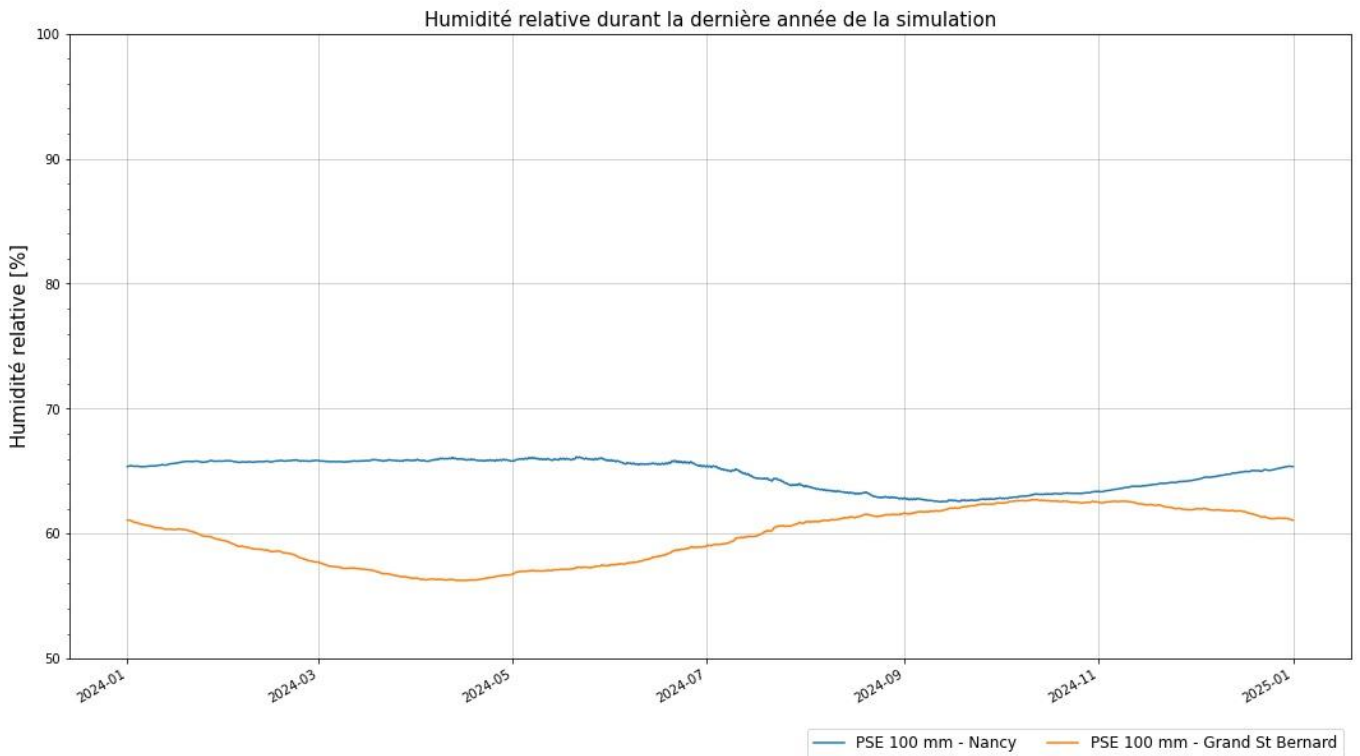
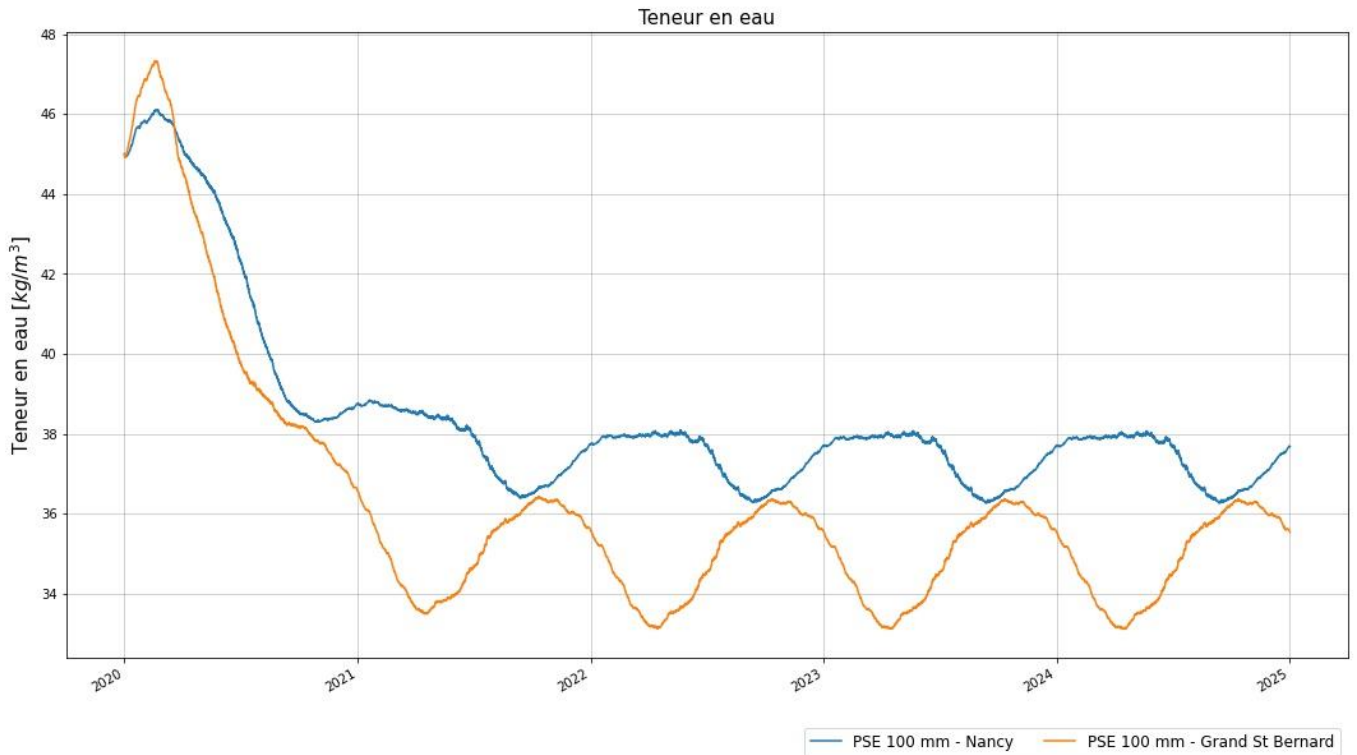
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig2 : Mur support



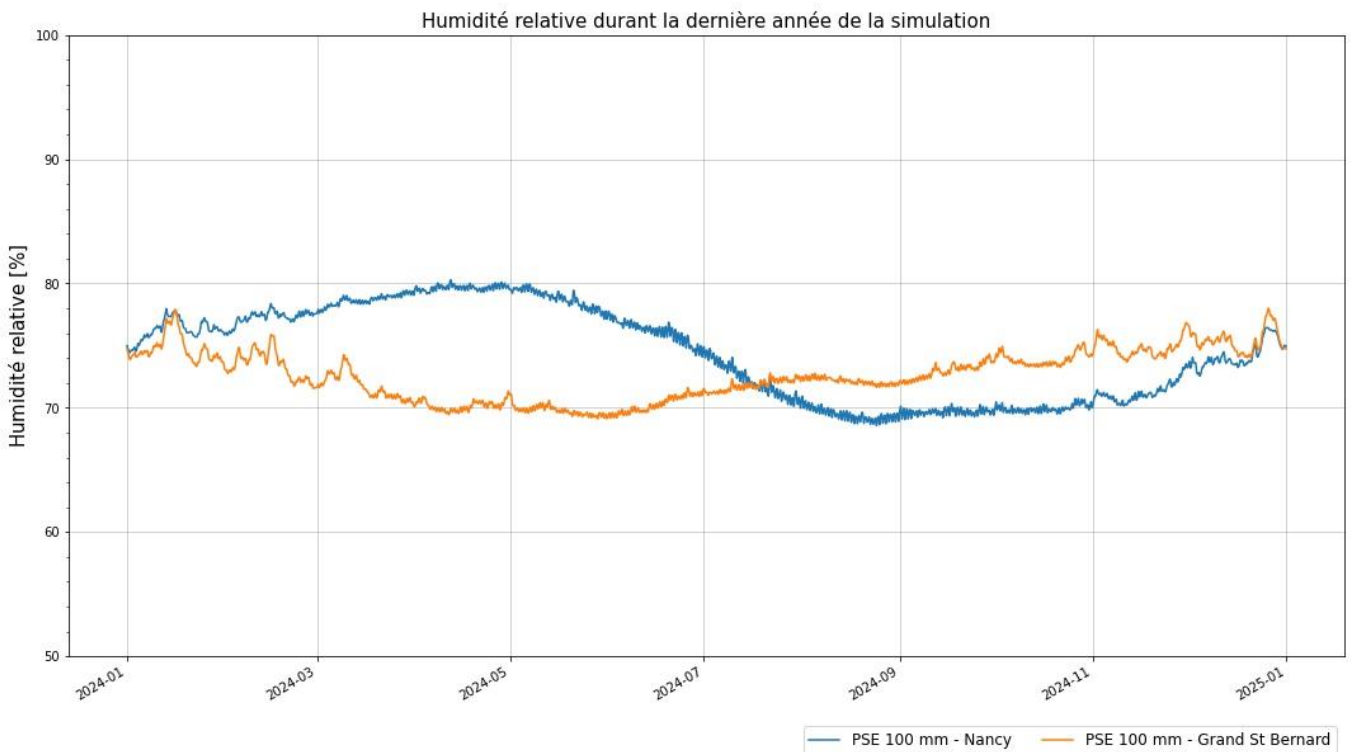
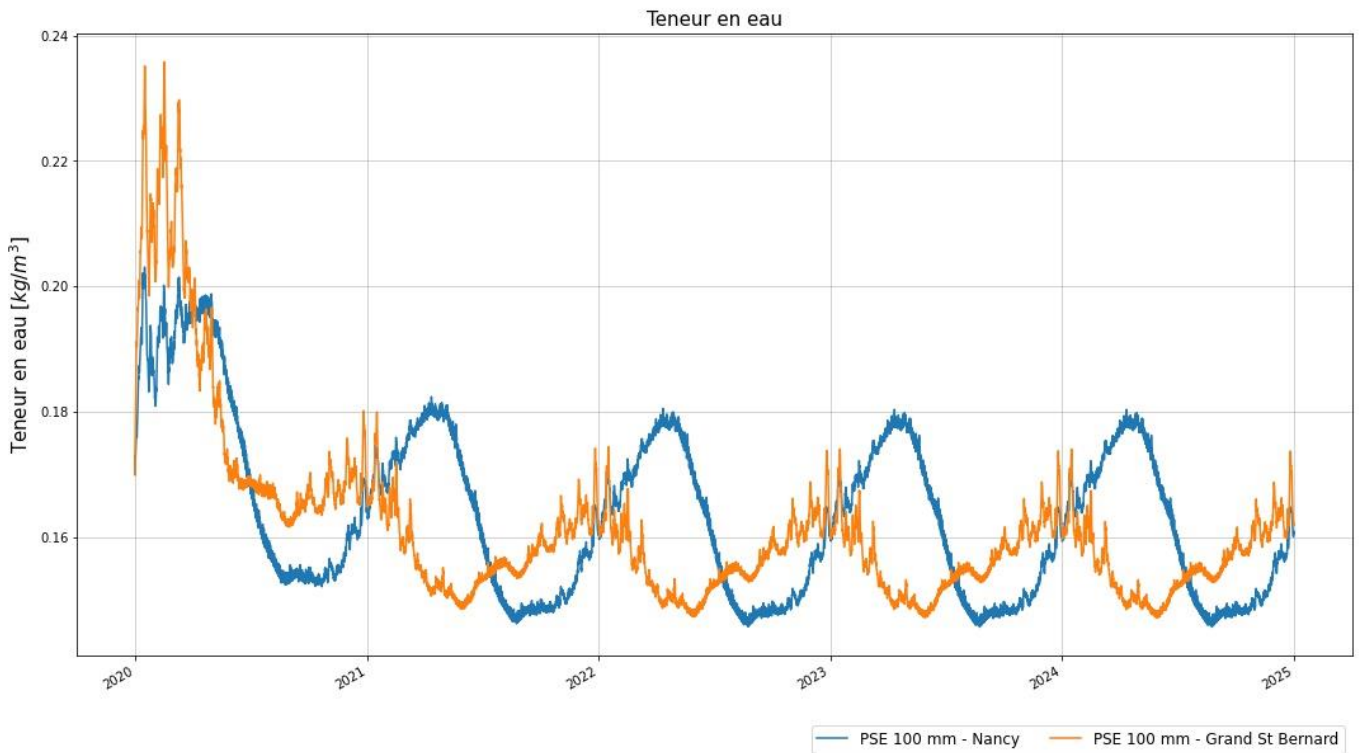
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig3 : Couche A96 (collage du panneau PSE)



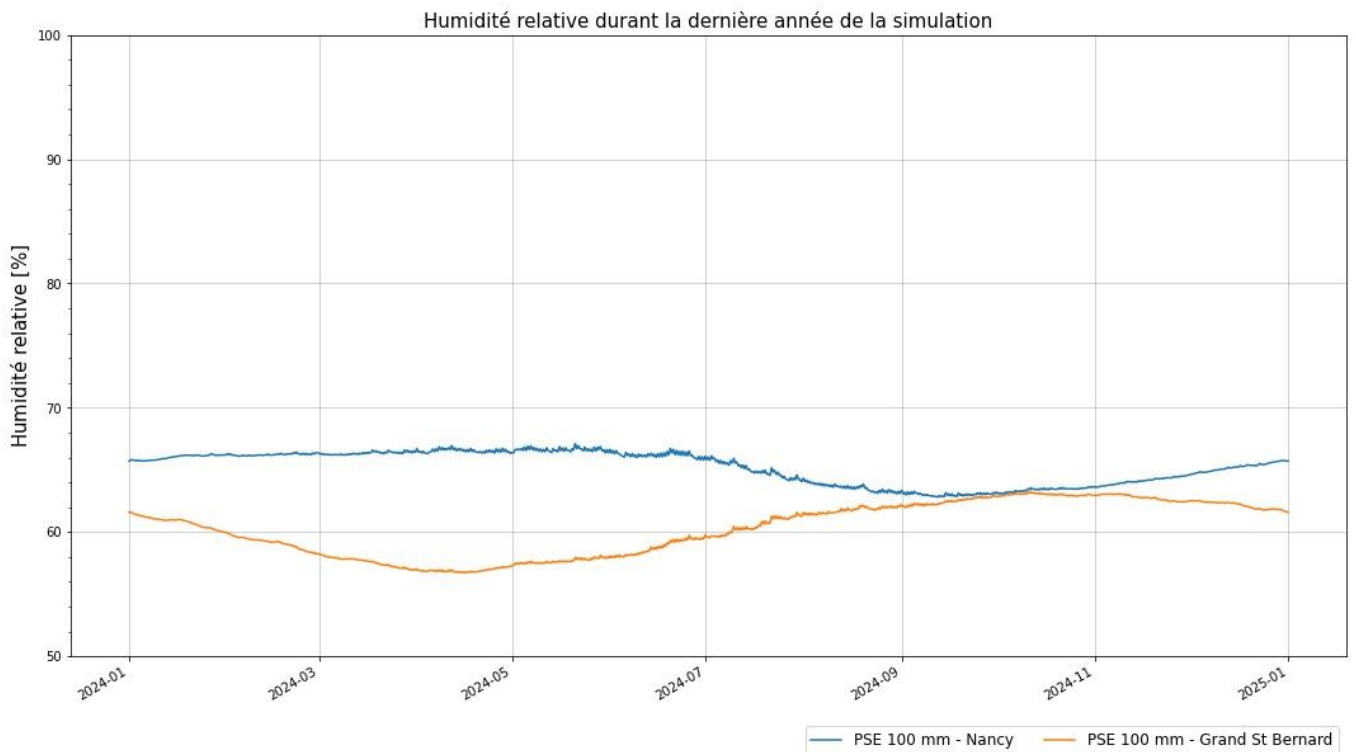
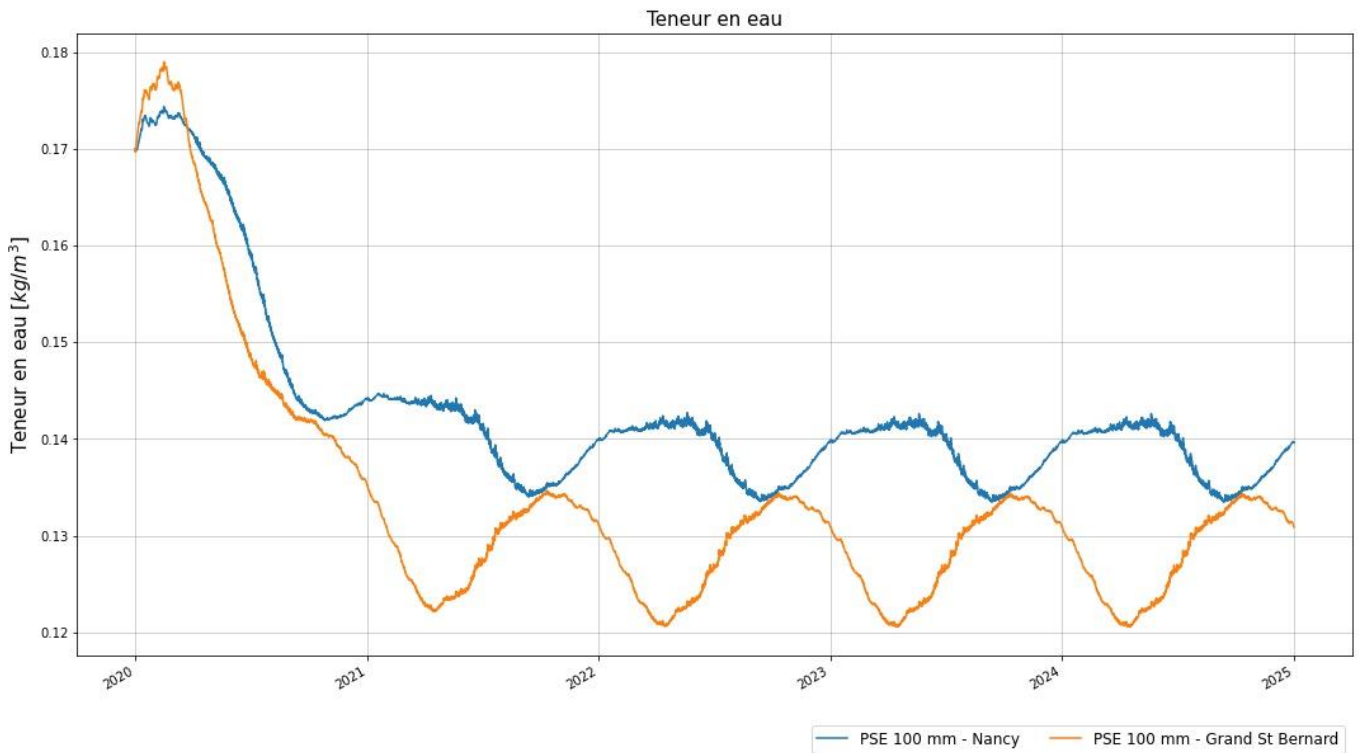
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig4 : Panneau PSE



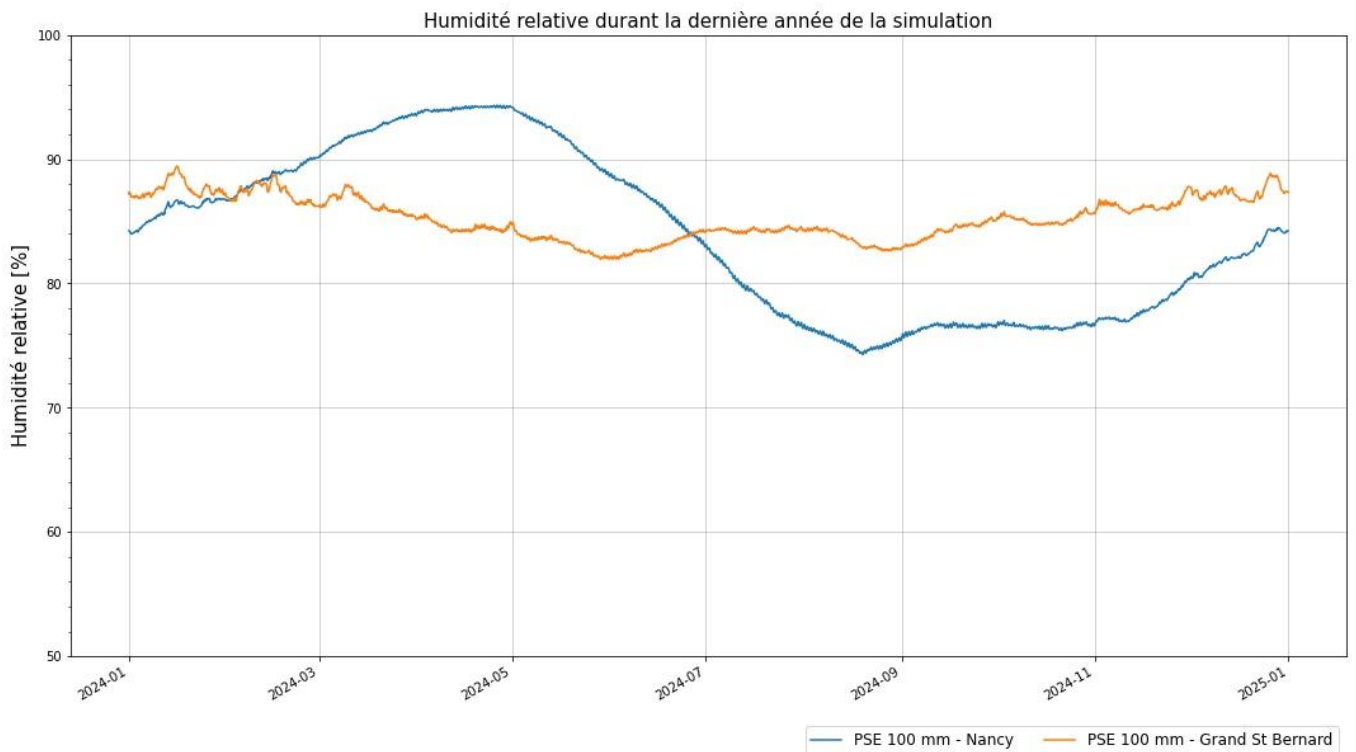
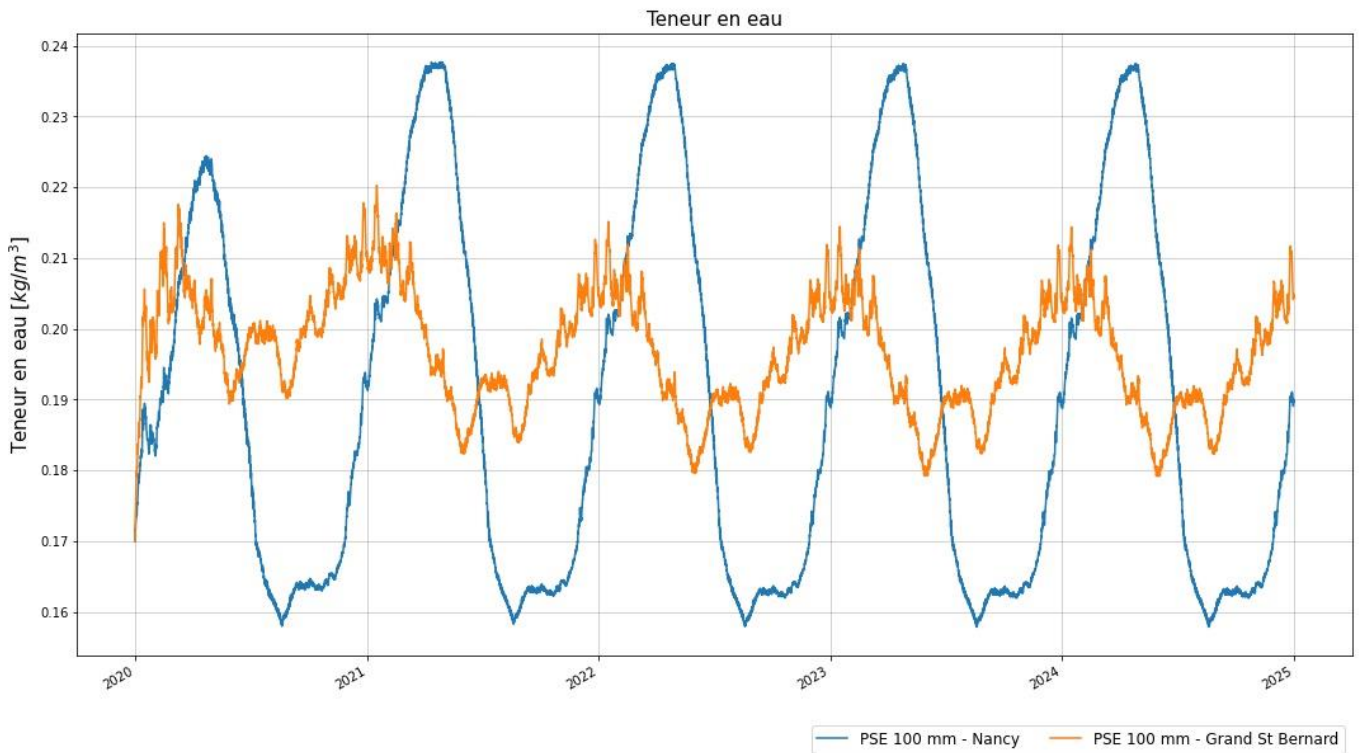
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig5 : Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96



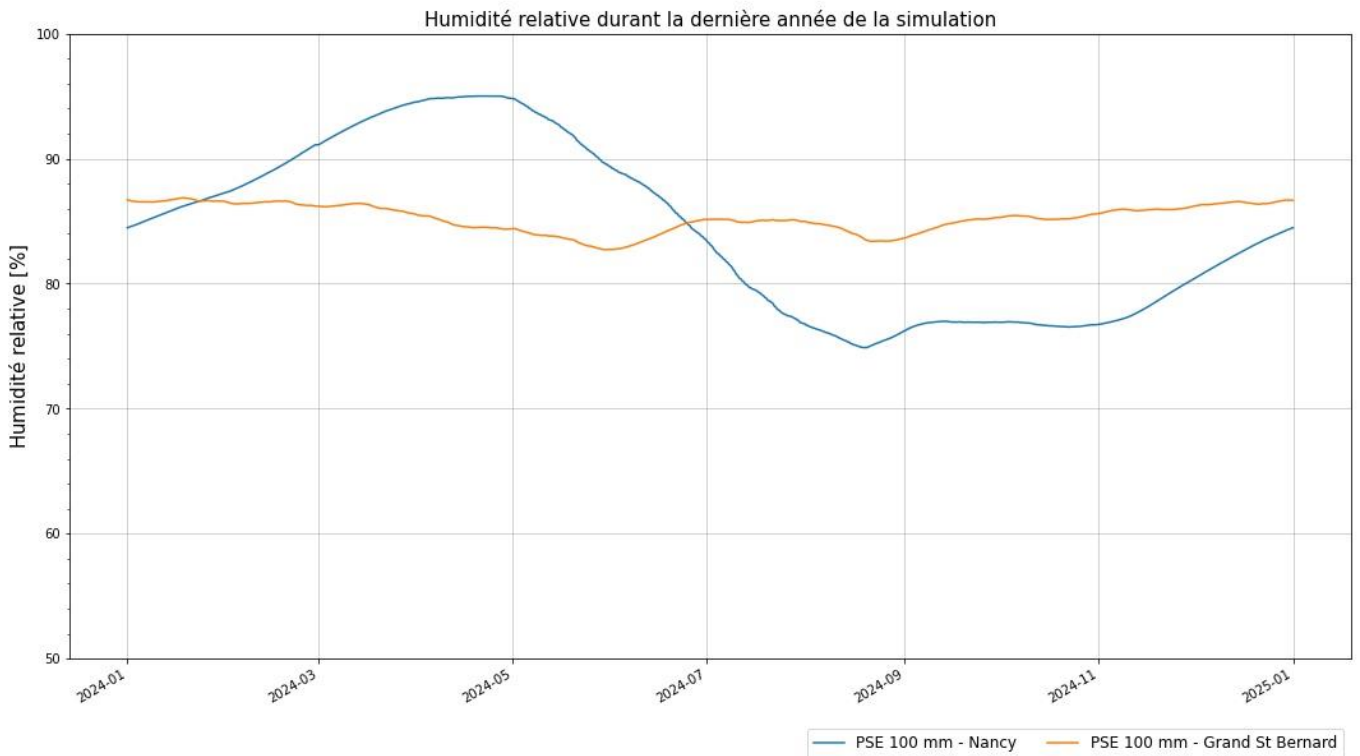
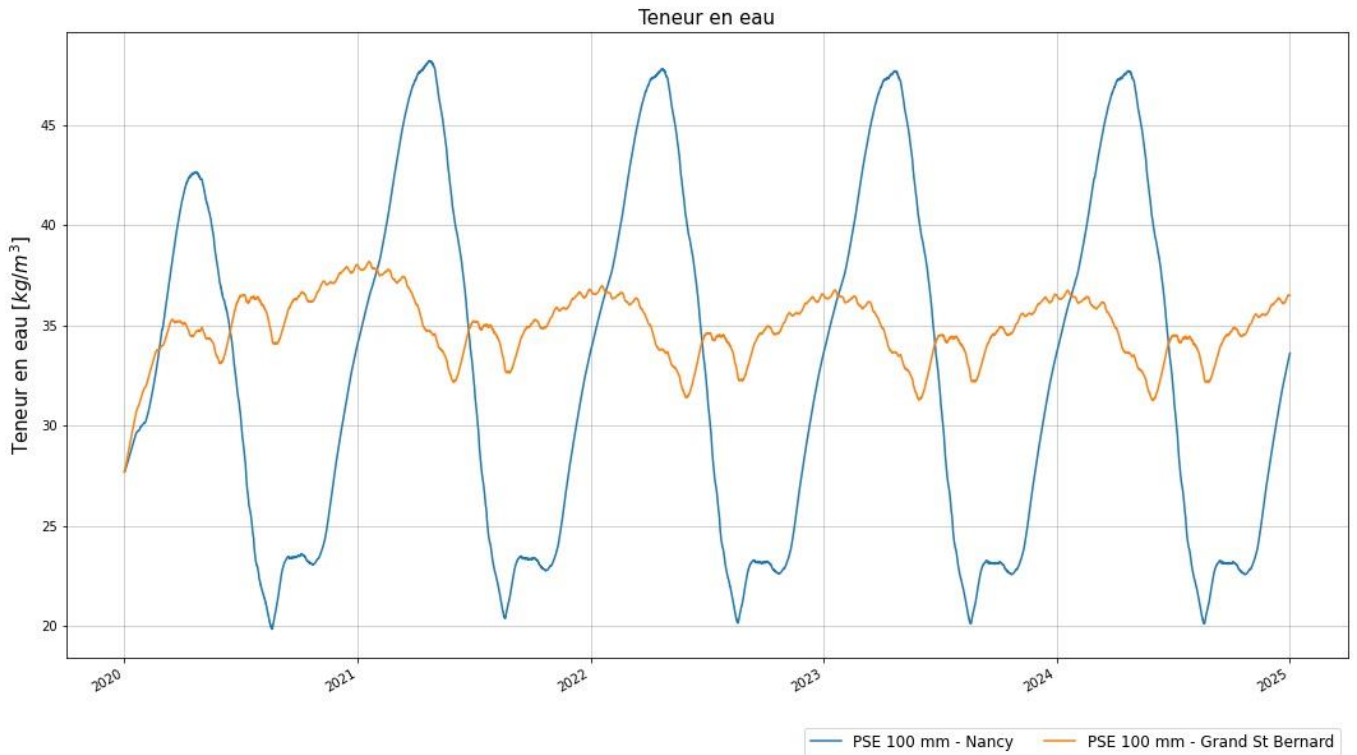
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig6 : Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema



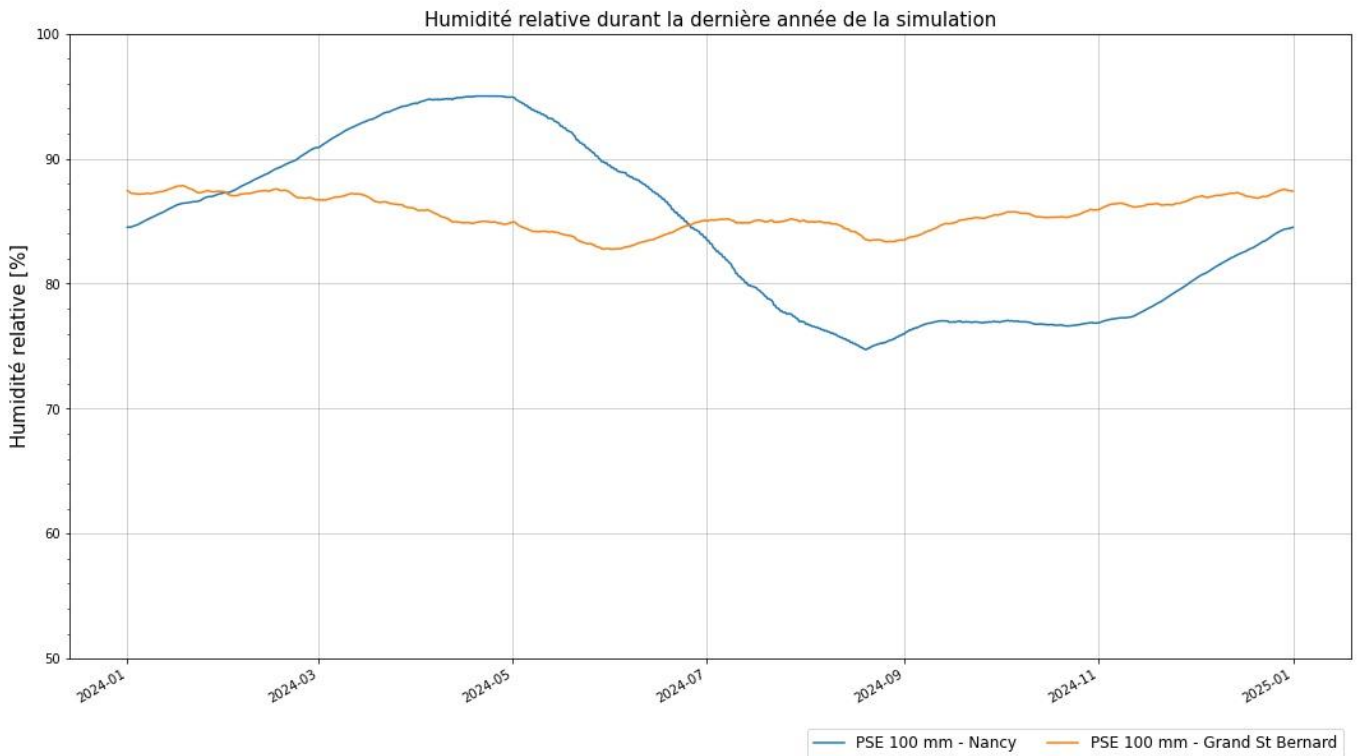
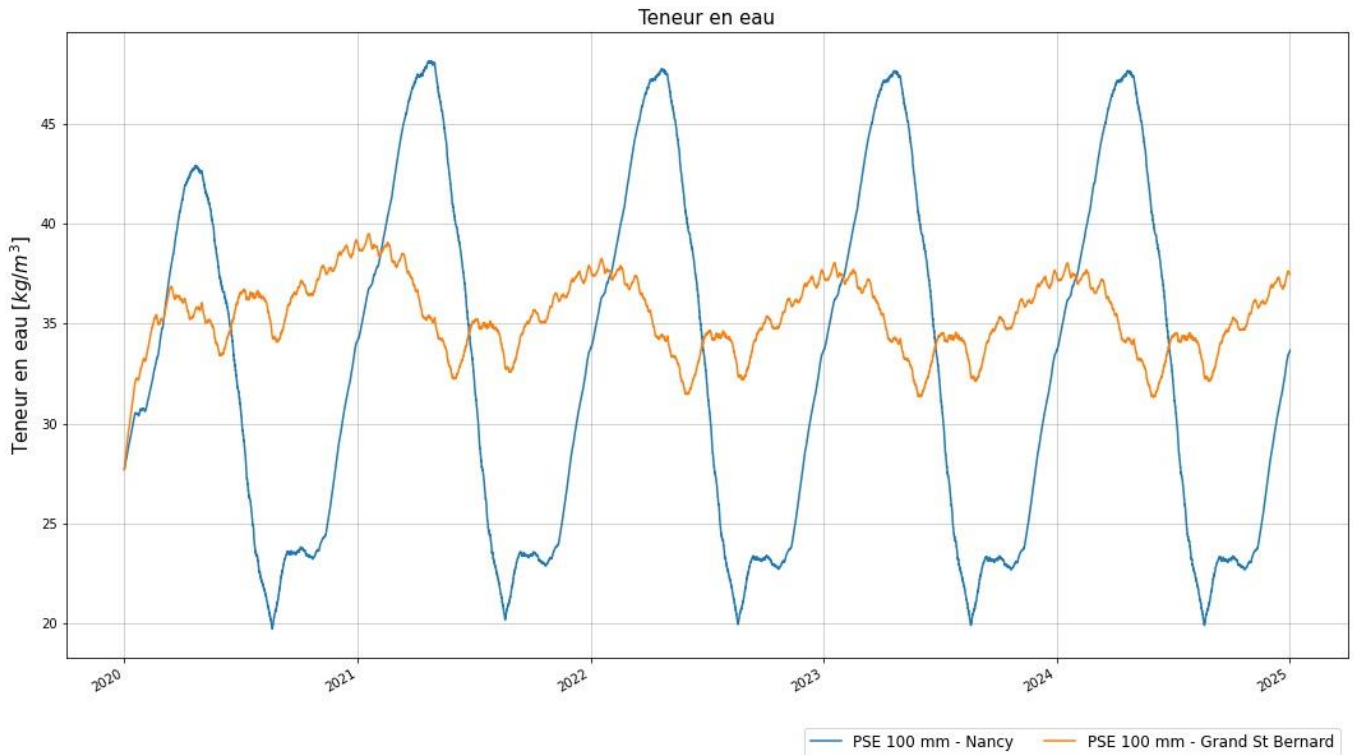
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig7 : Complexe Mastrosistema



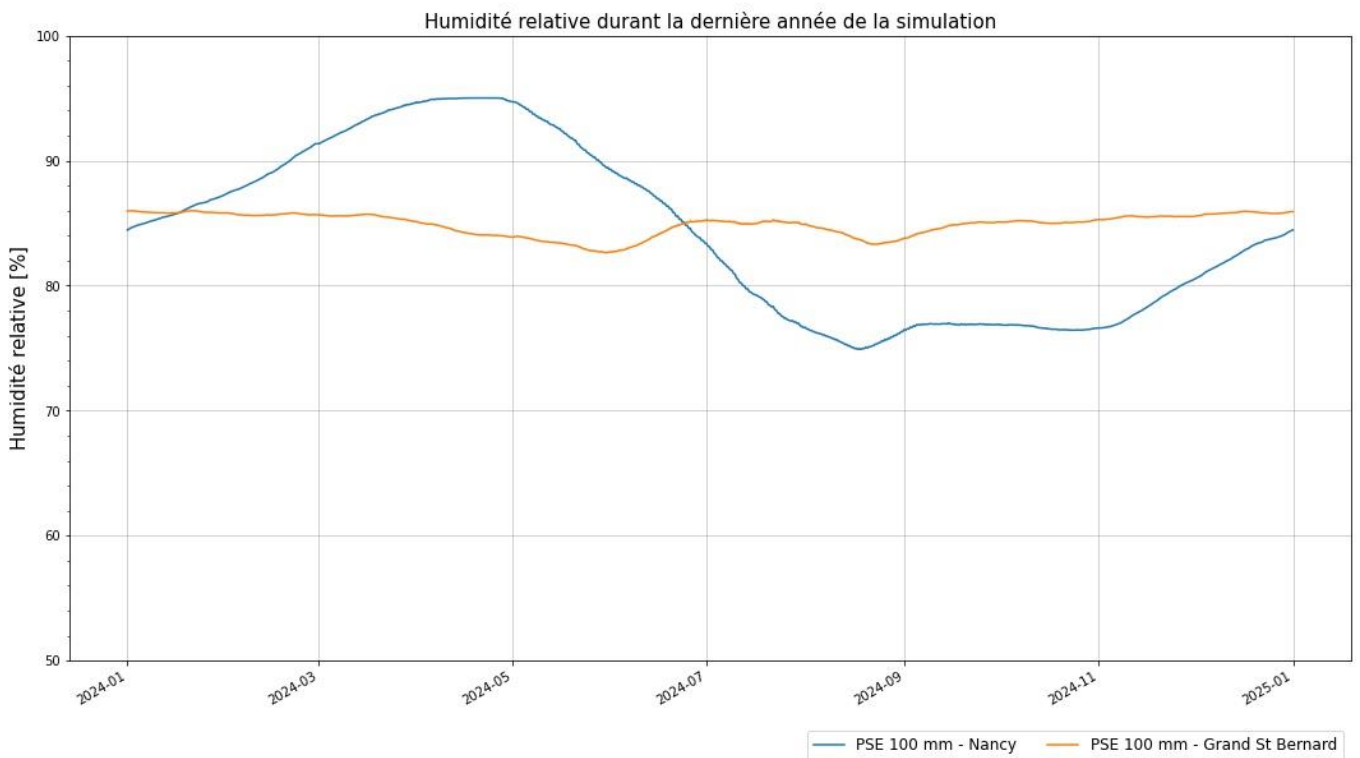
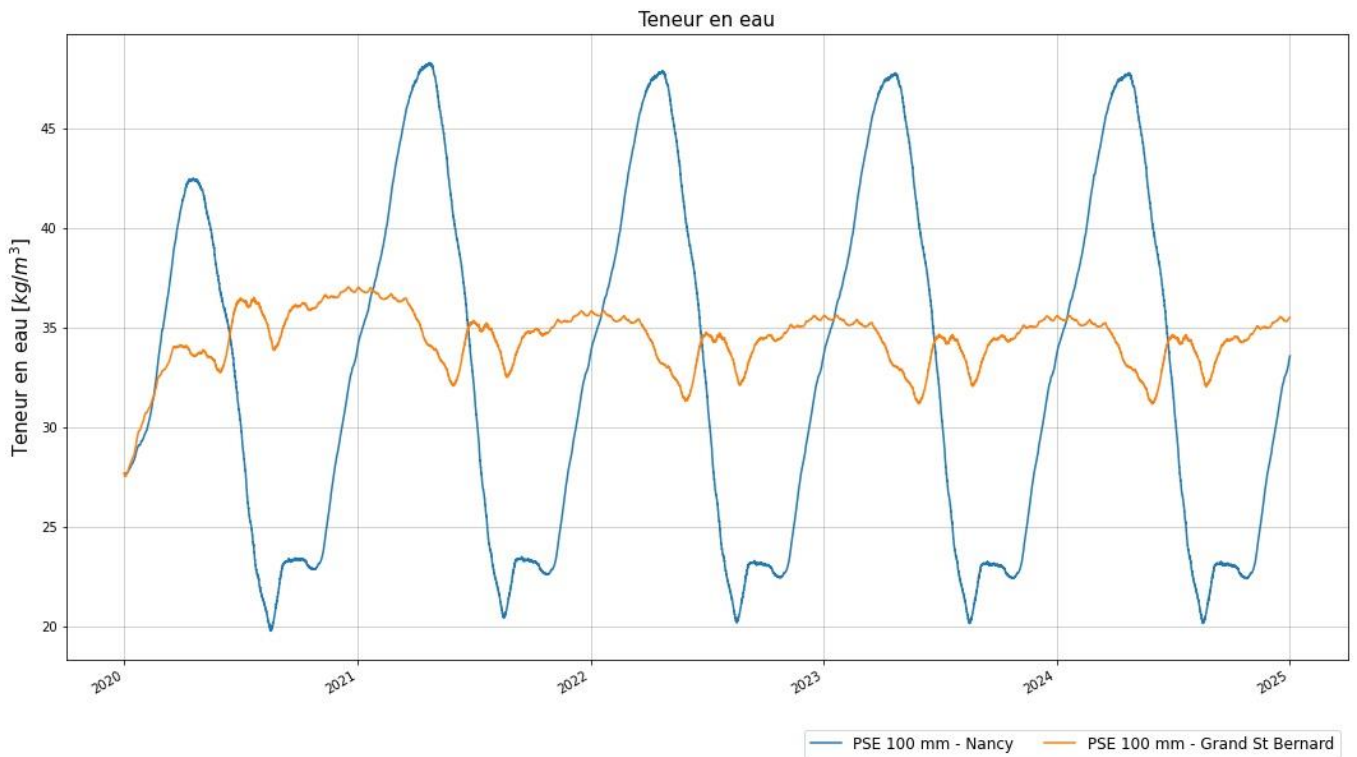
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig8 : Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE



RAPPORT D'EXPERTISE

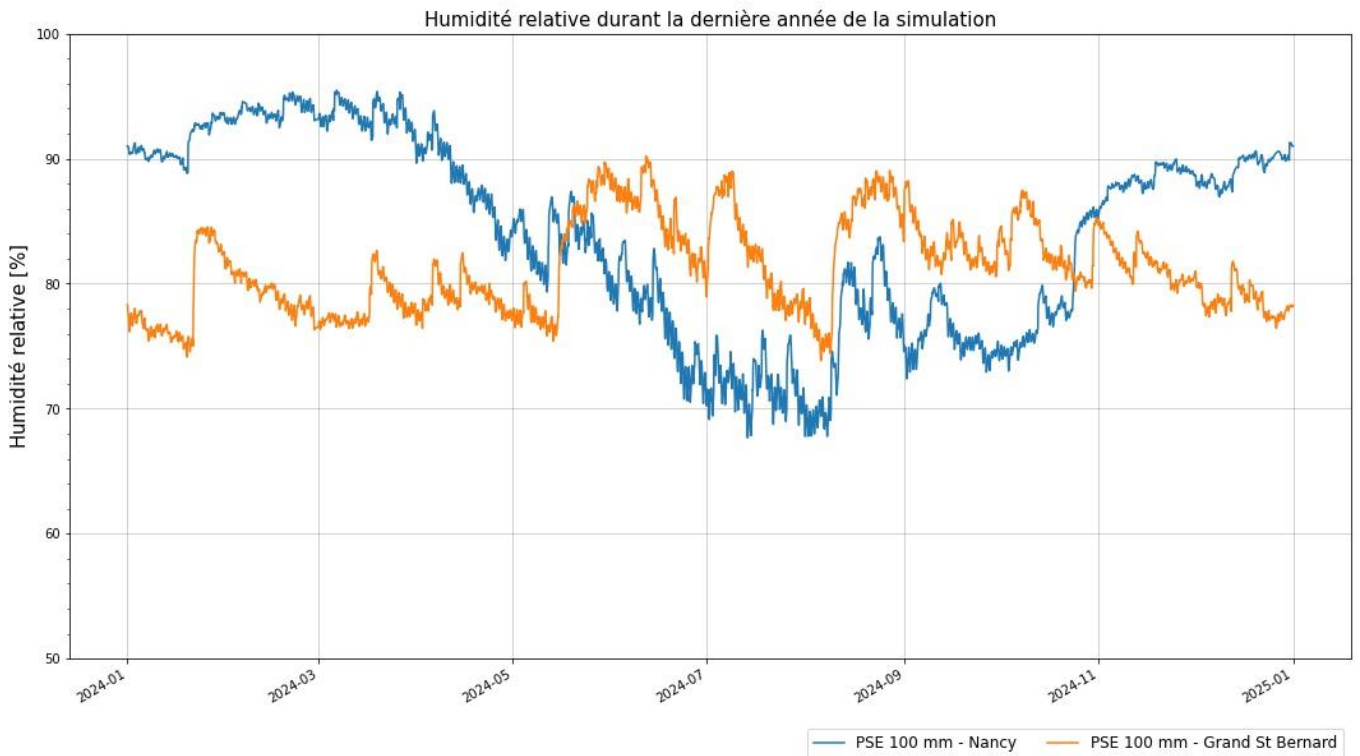
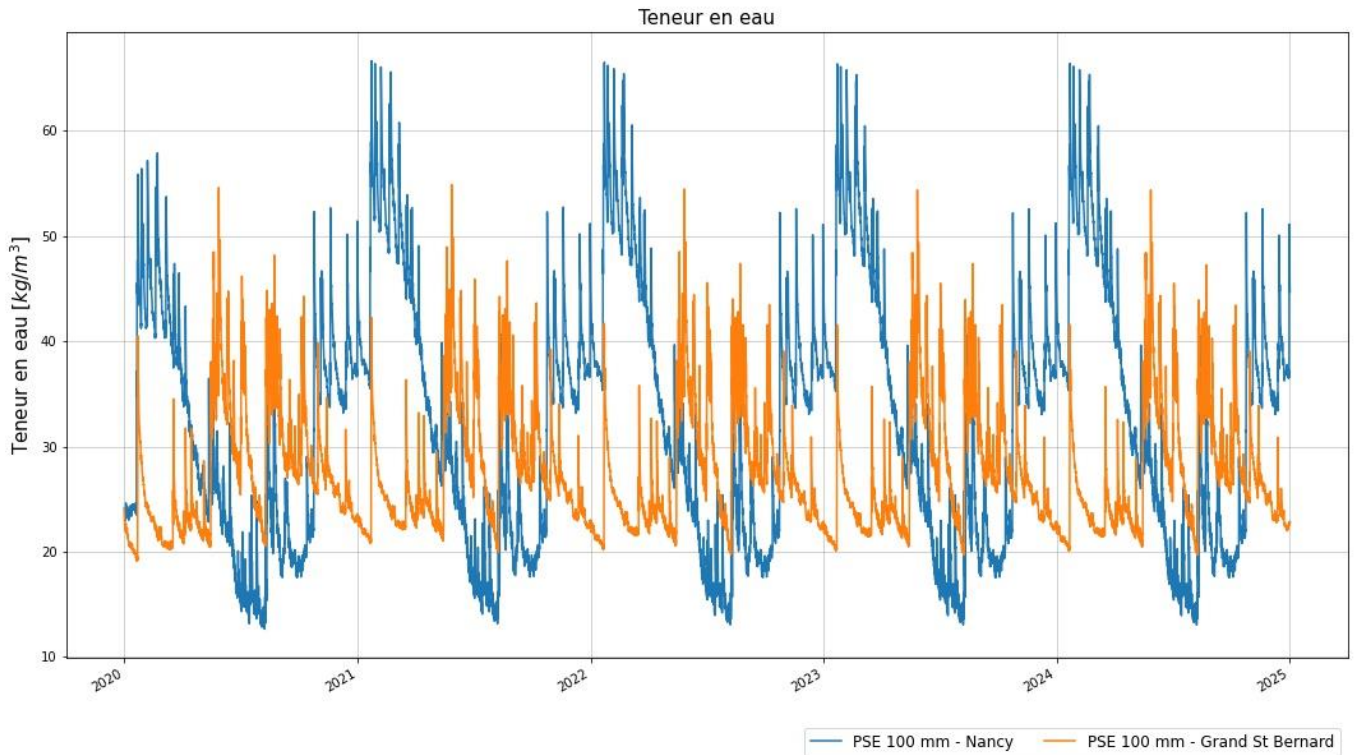
PSE 100 mm | Fig9 : Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra





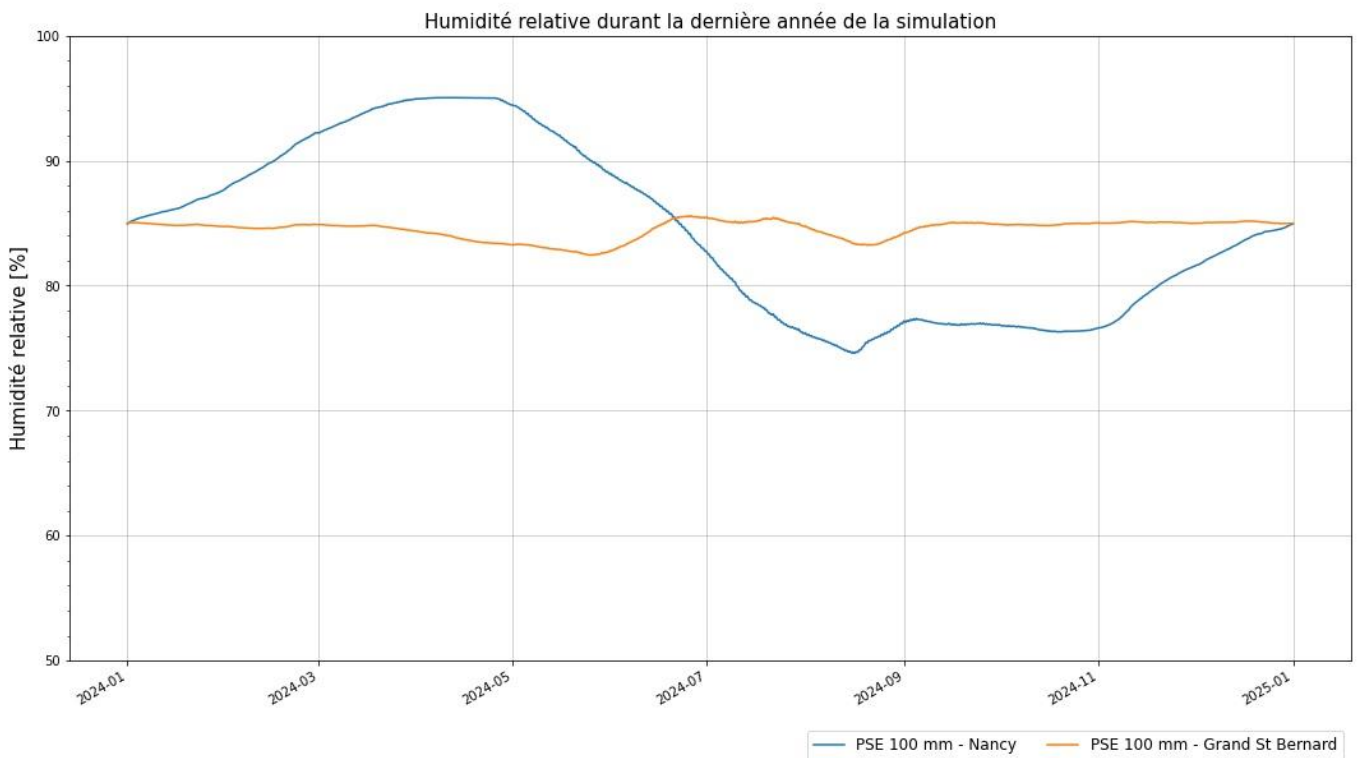
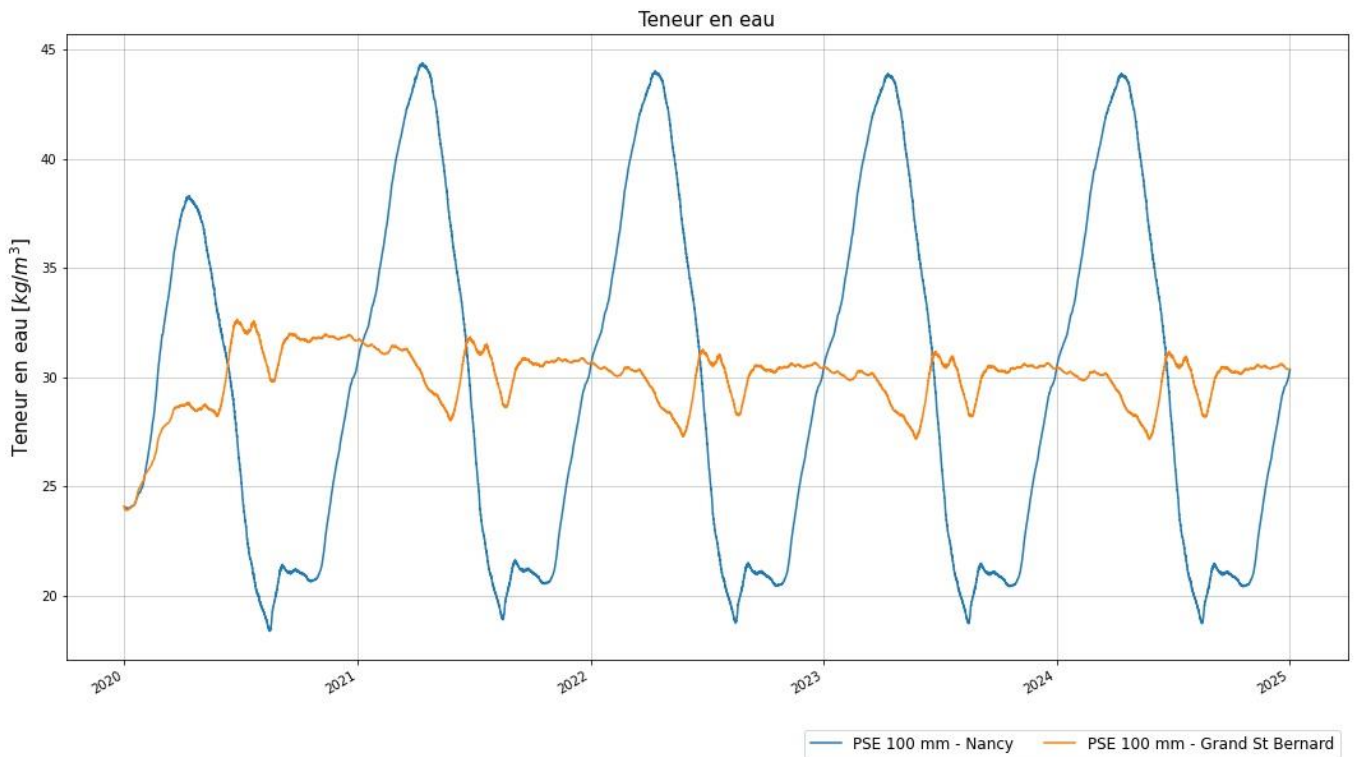
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig10 : Pierre reconstituée Geopietra



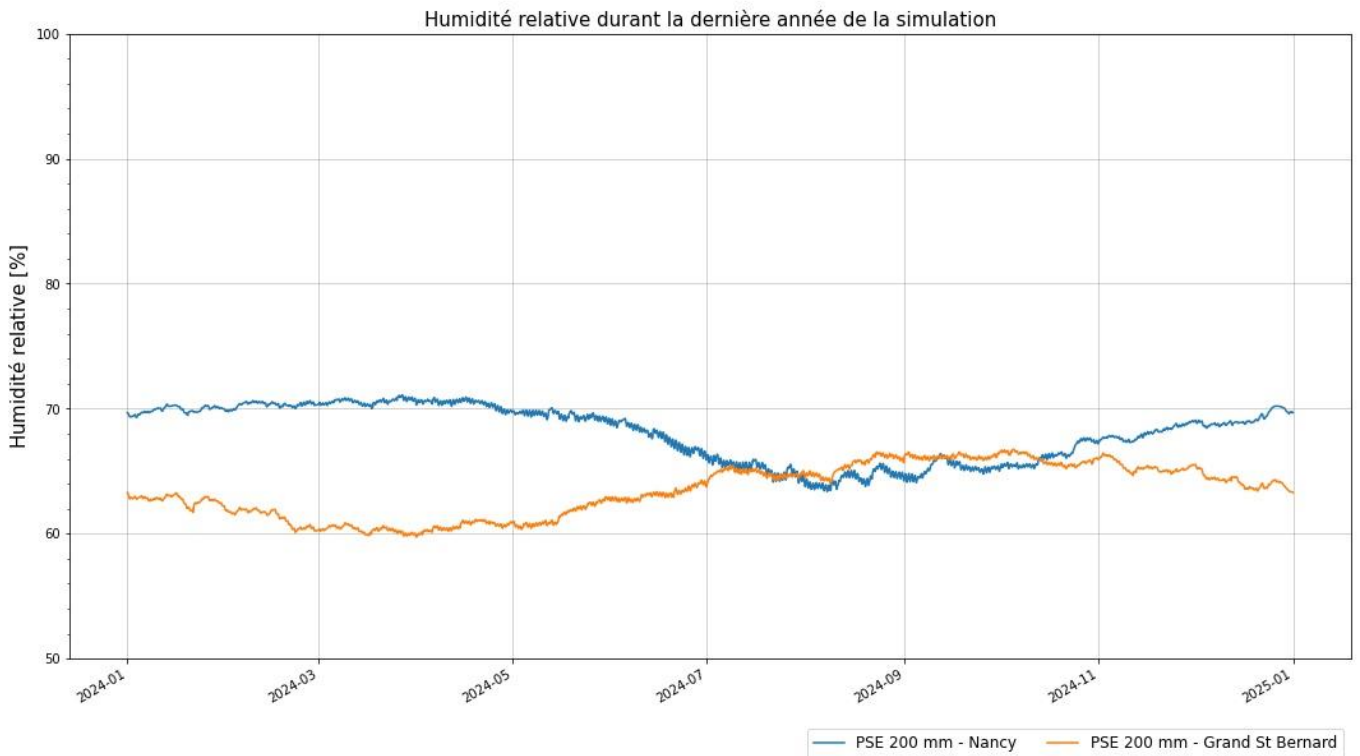
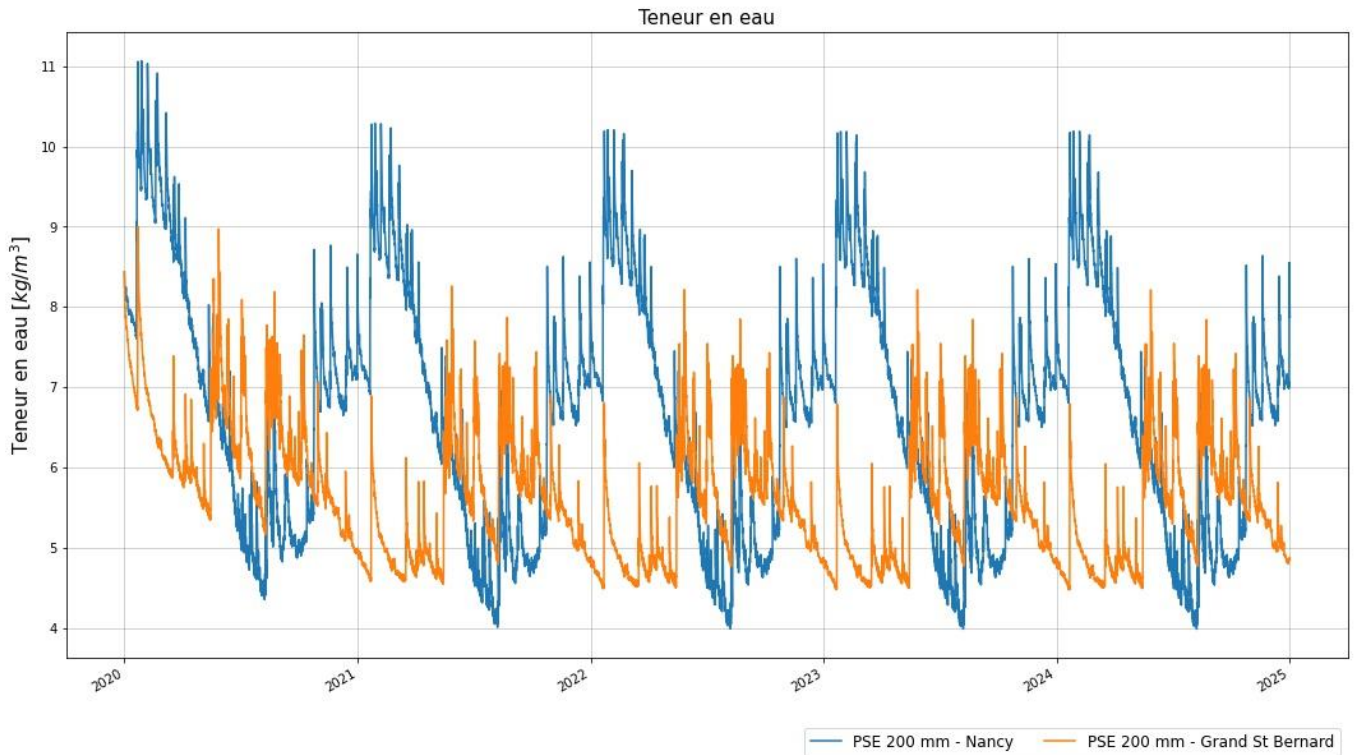
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 100 mm | Fig11 : Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema



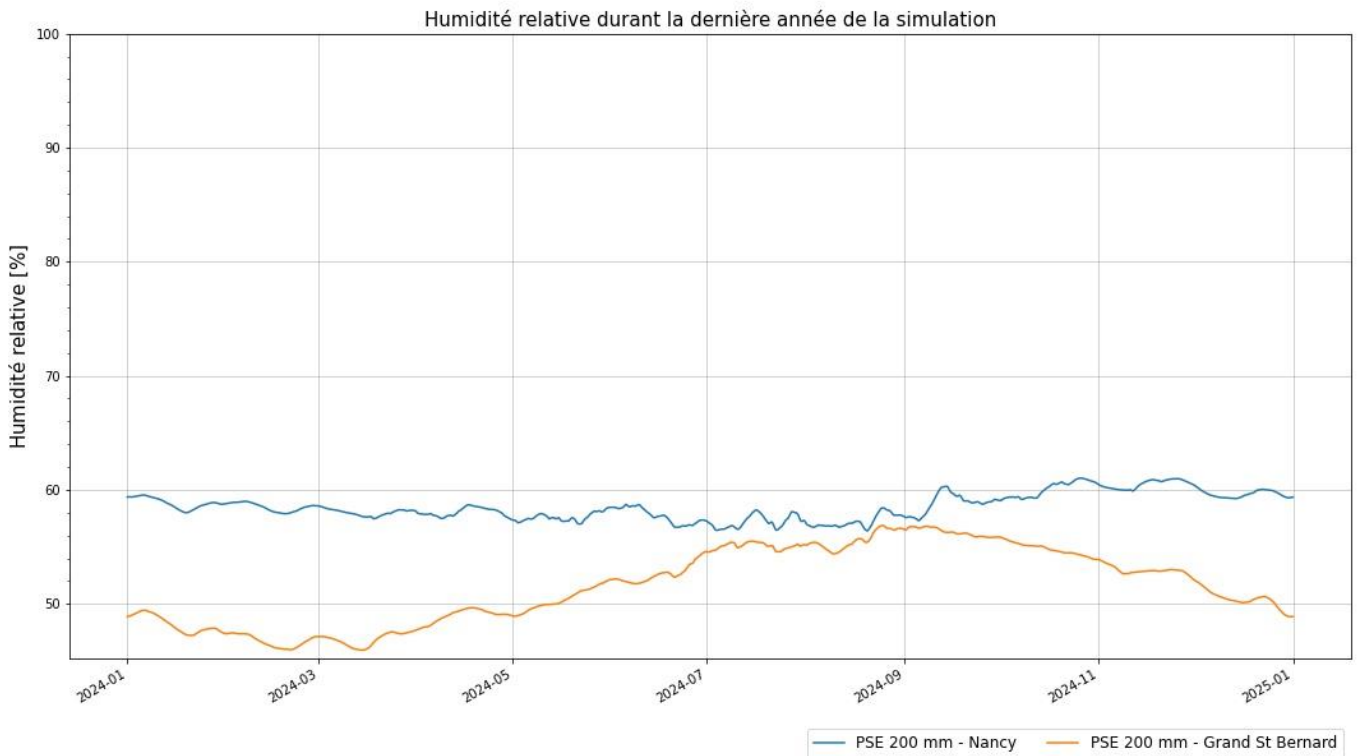
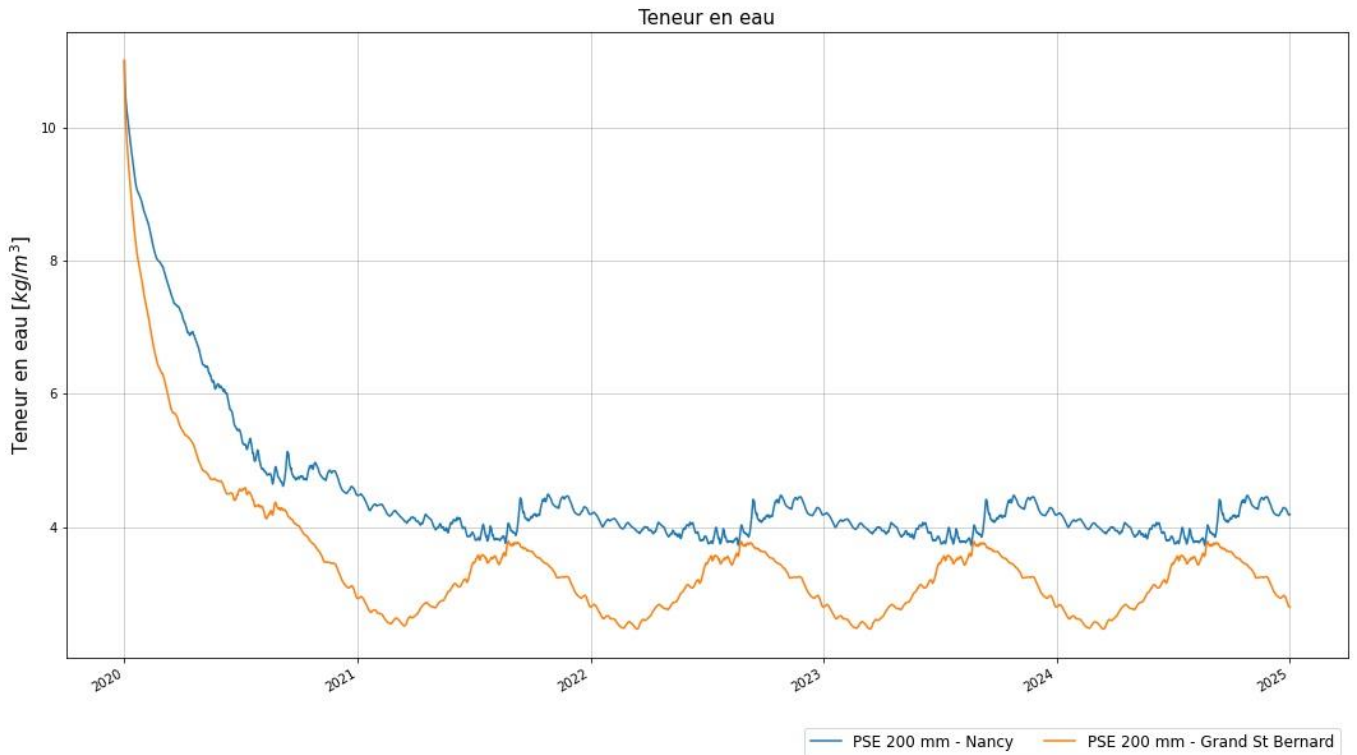
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig1 : Paroi globale



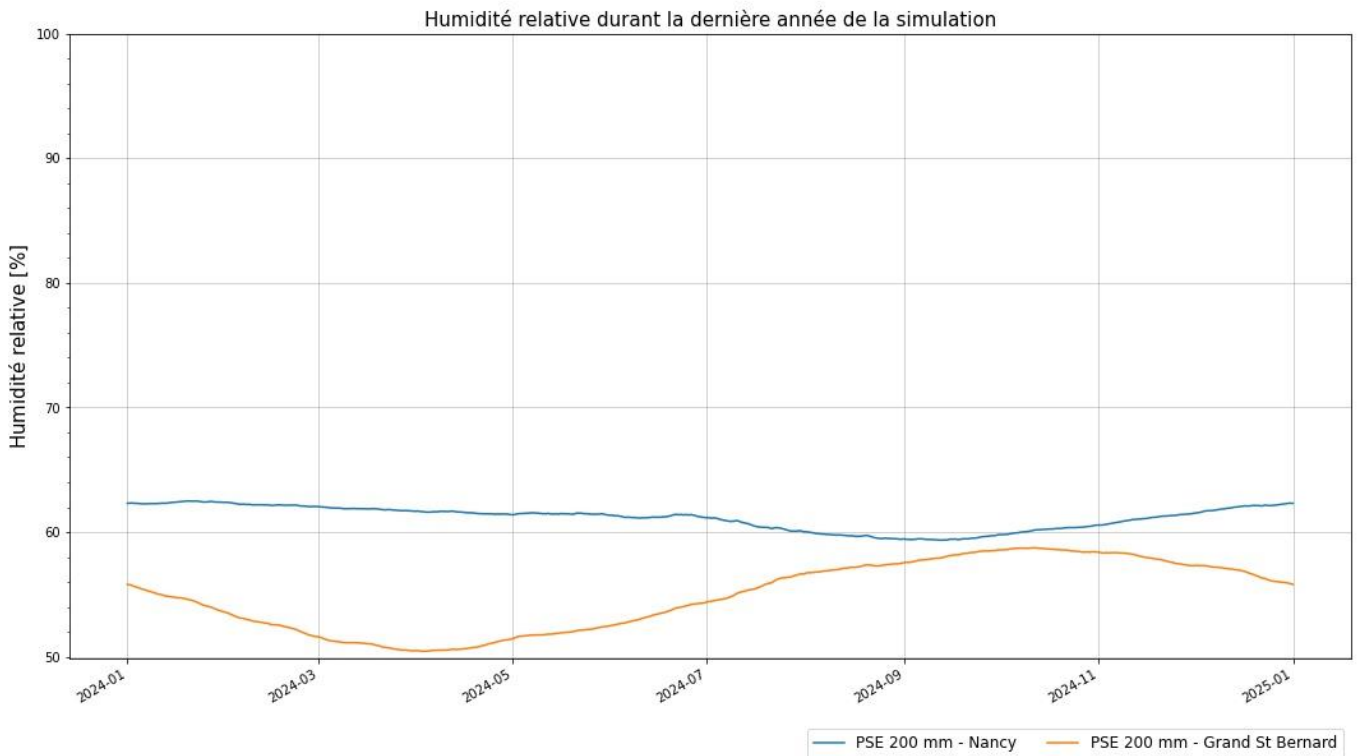
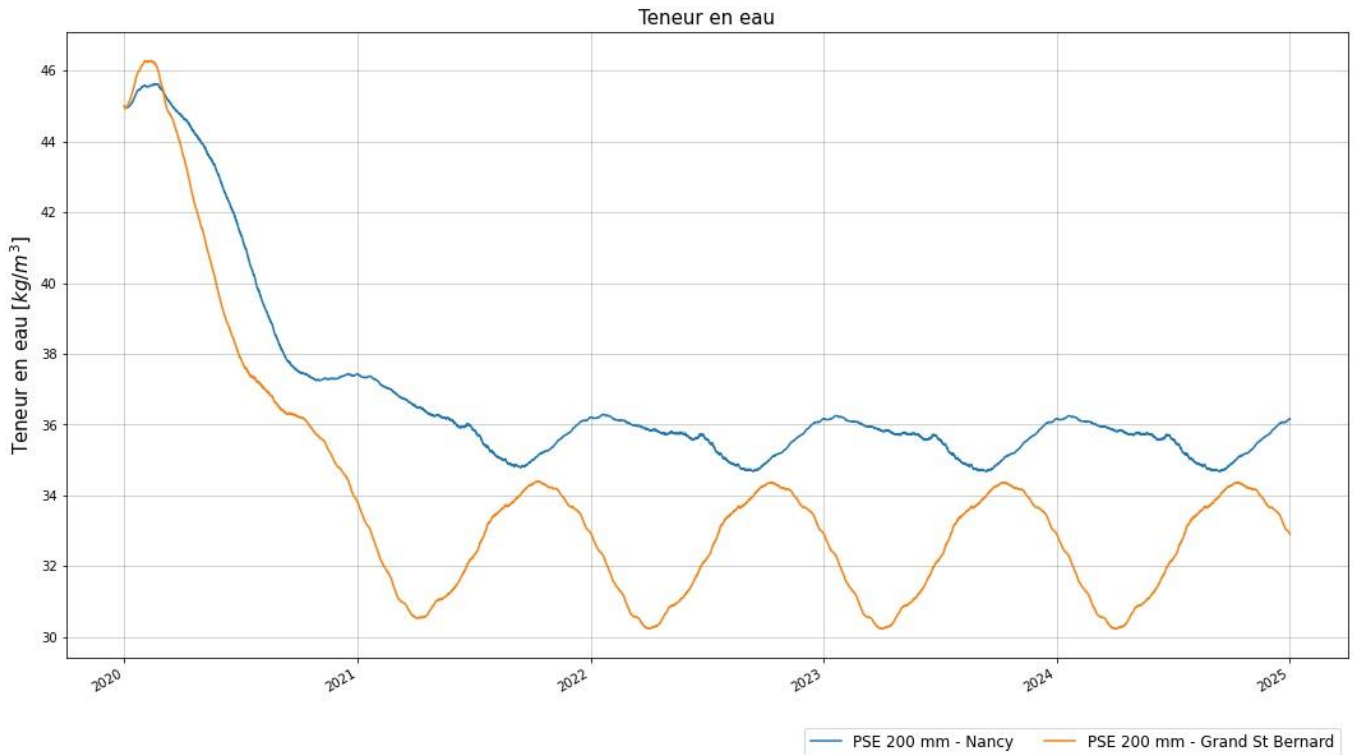
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig2 : Mur support



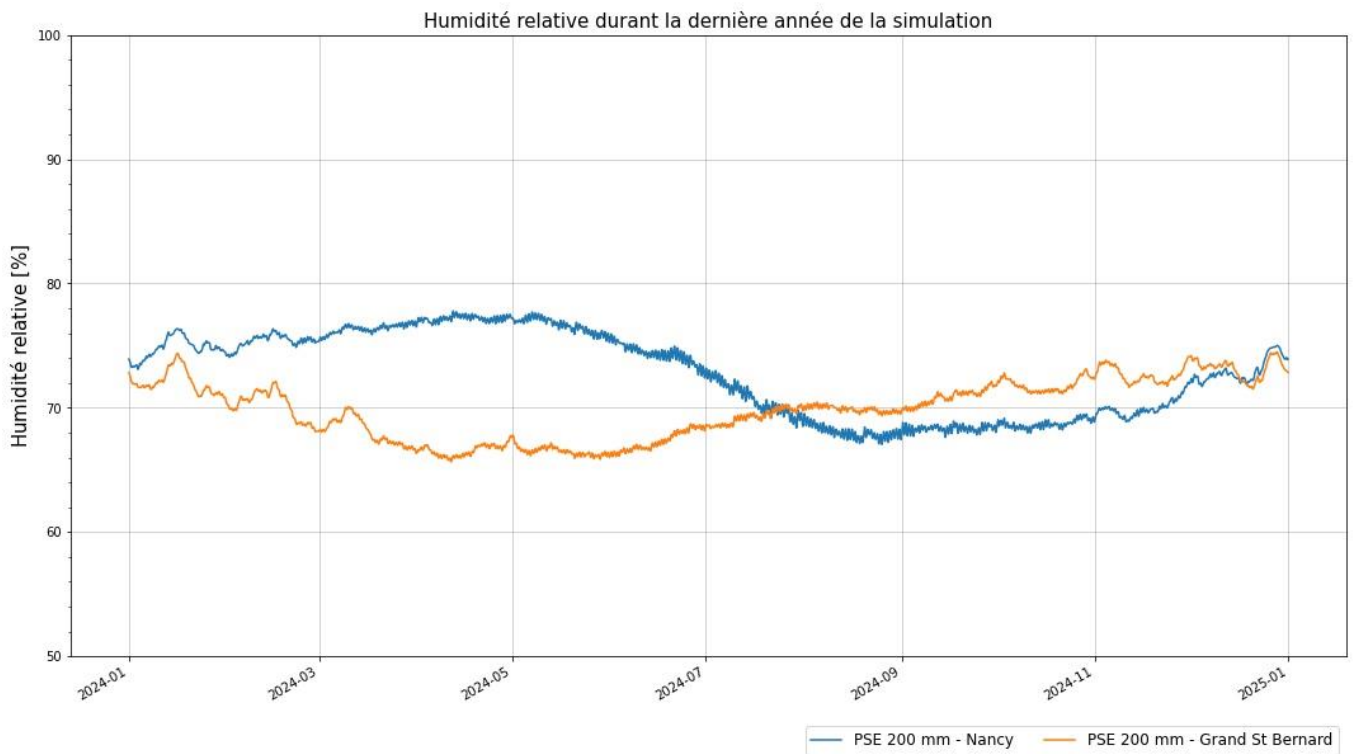
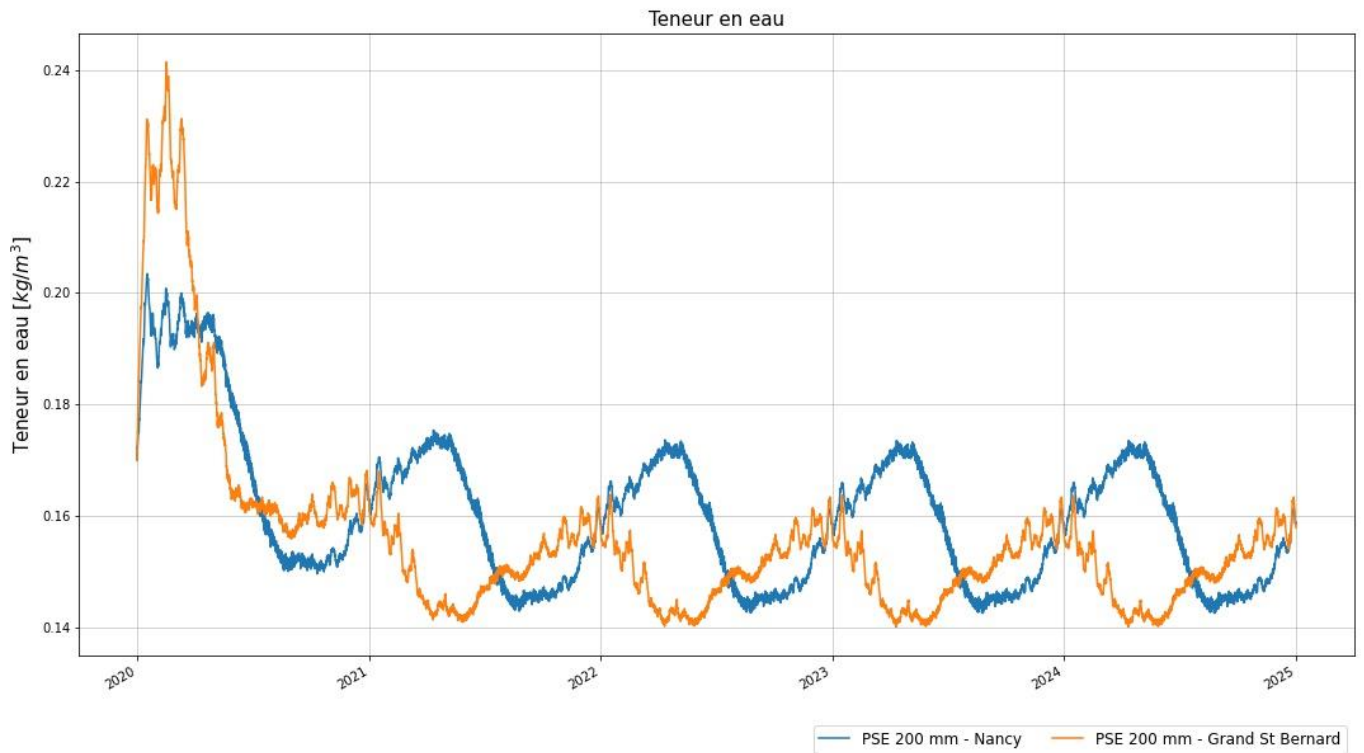
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig3 : Couche A96 (collage du panneau PSE)



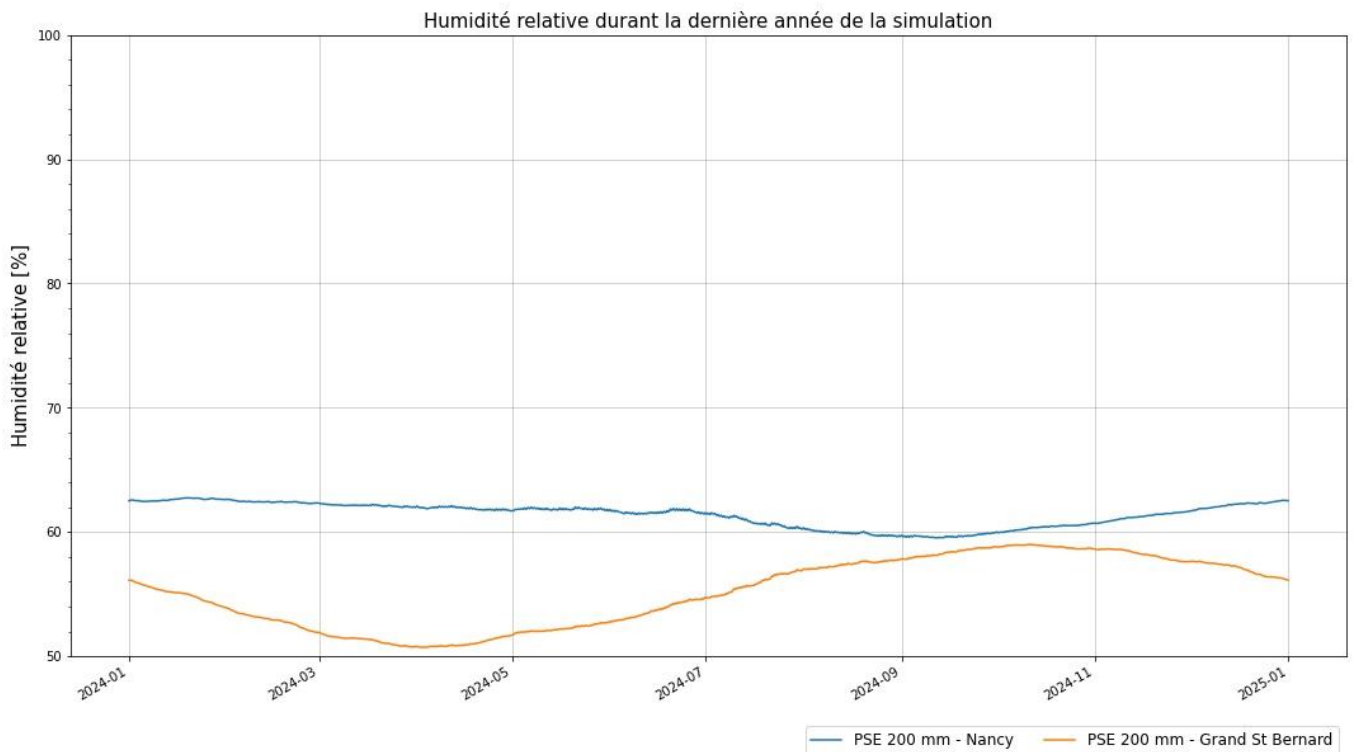
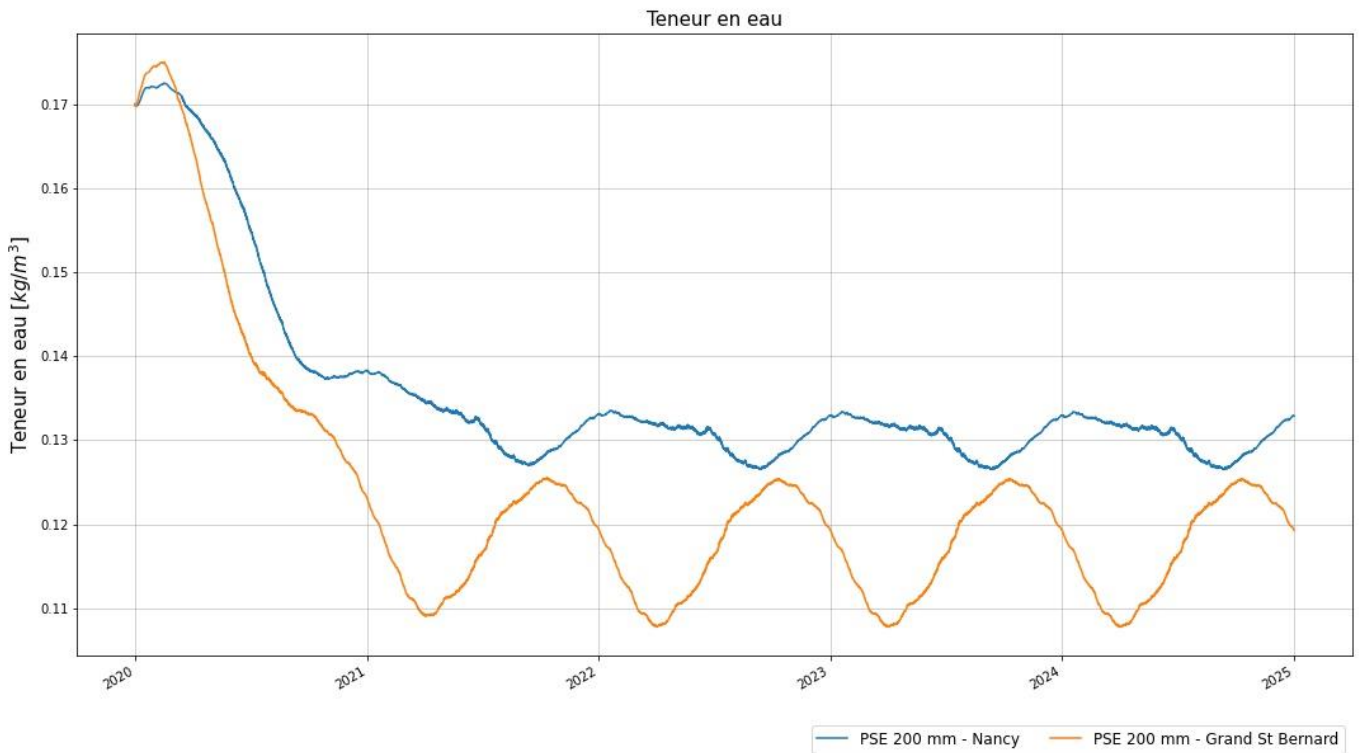
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig4 : Panneau PSE



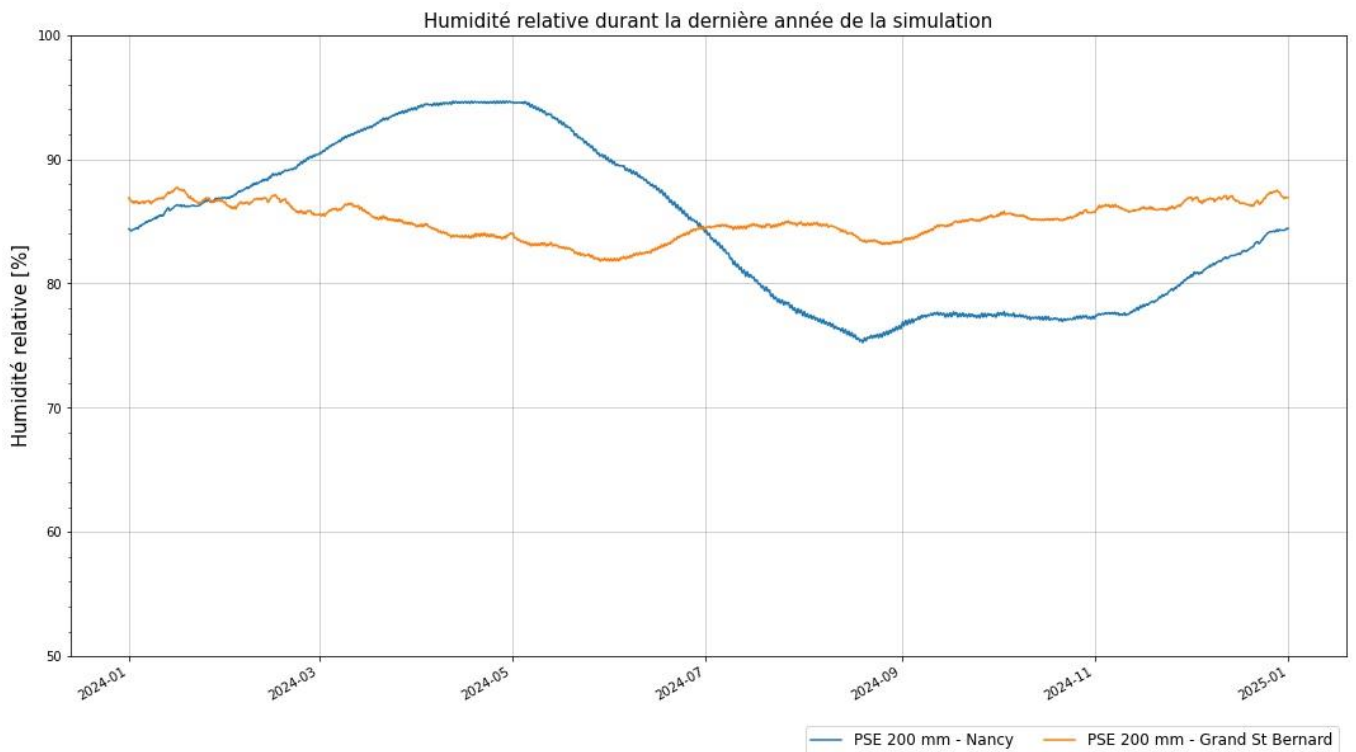
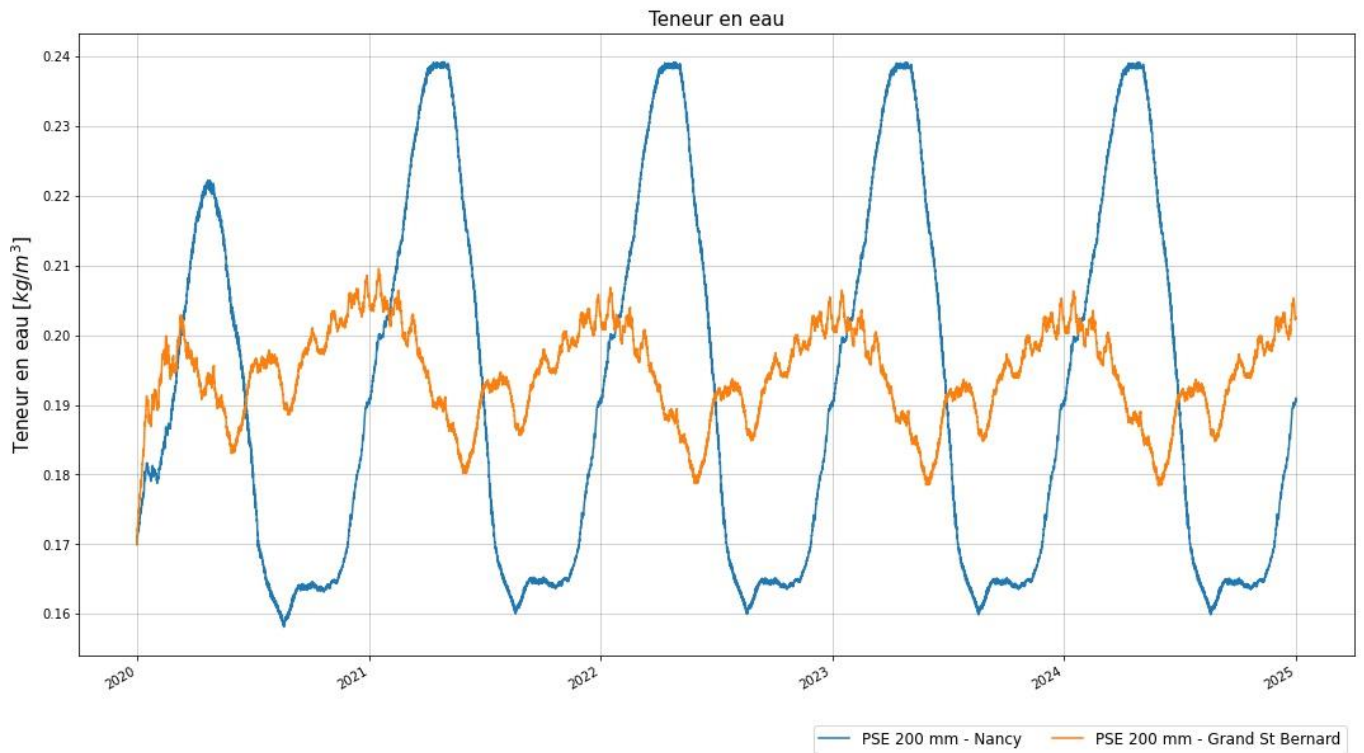
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig5 : Zone (5mm) du PSE à l'interface de la couche A96



RAPPORT D'EXPERTISE

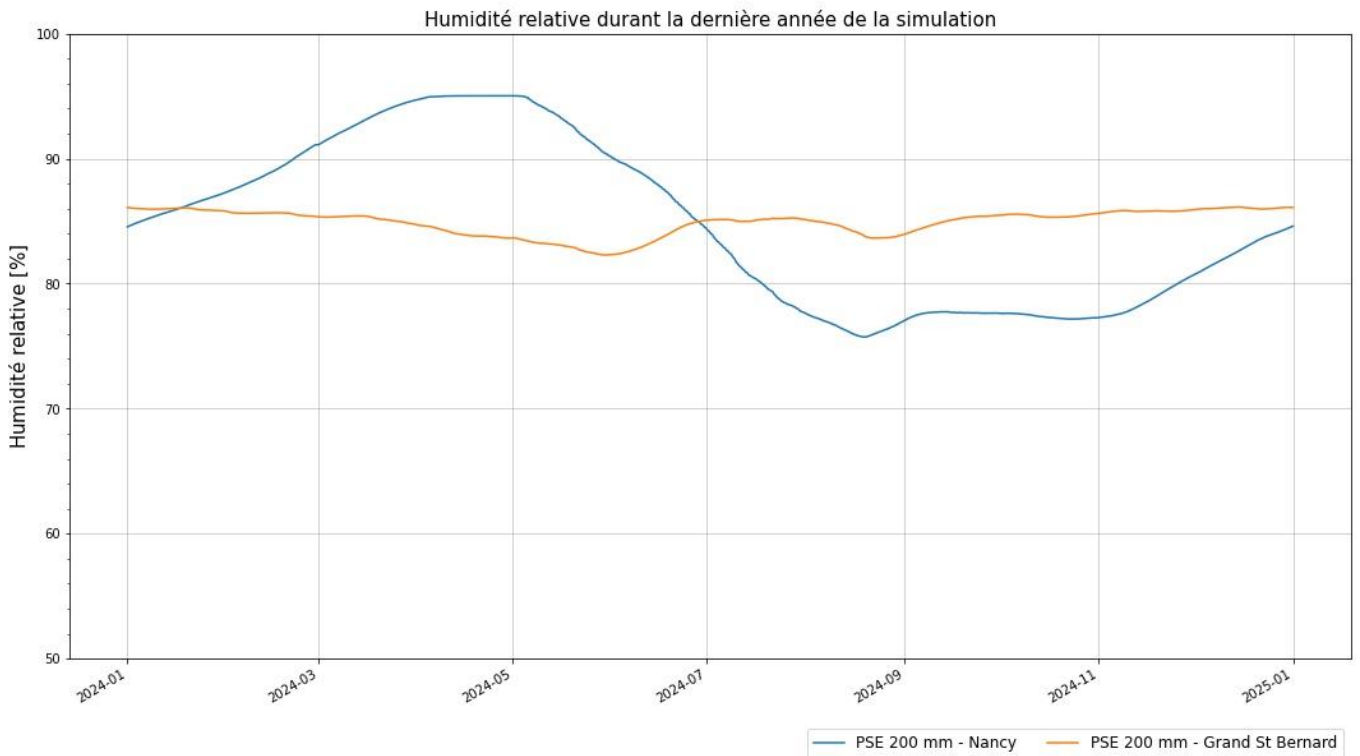
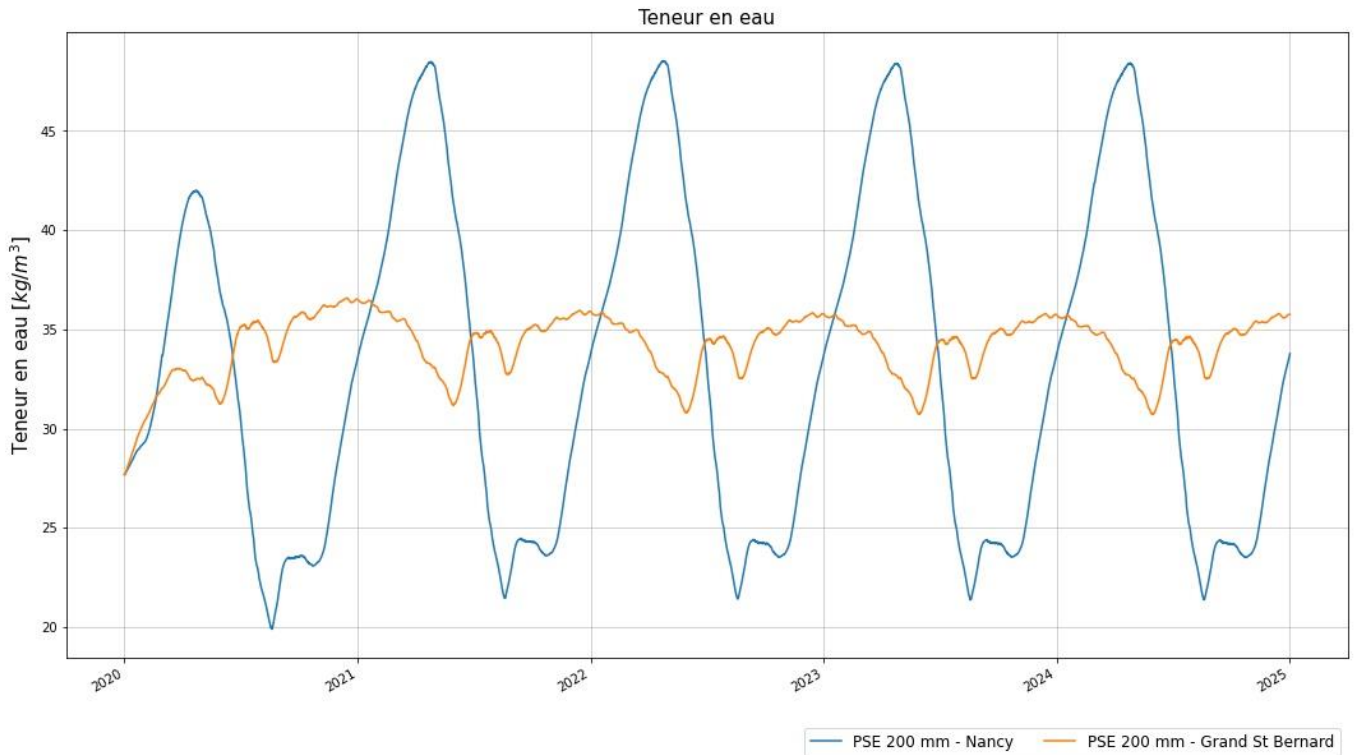
PSE 200 mm | Fig6 : Zone (5mm) du PSE à l'interface du Mastrosistema





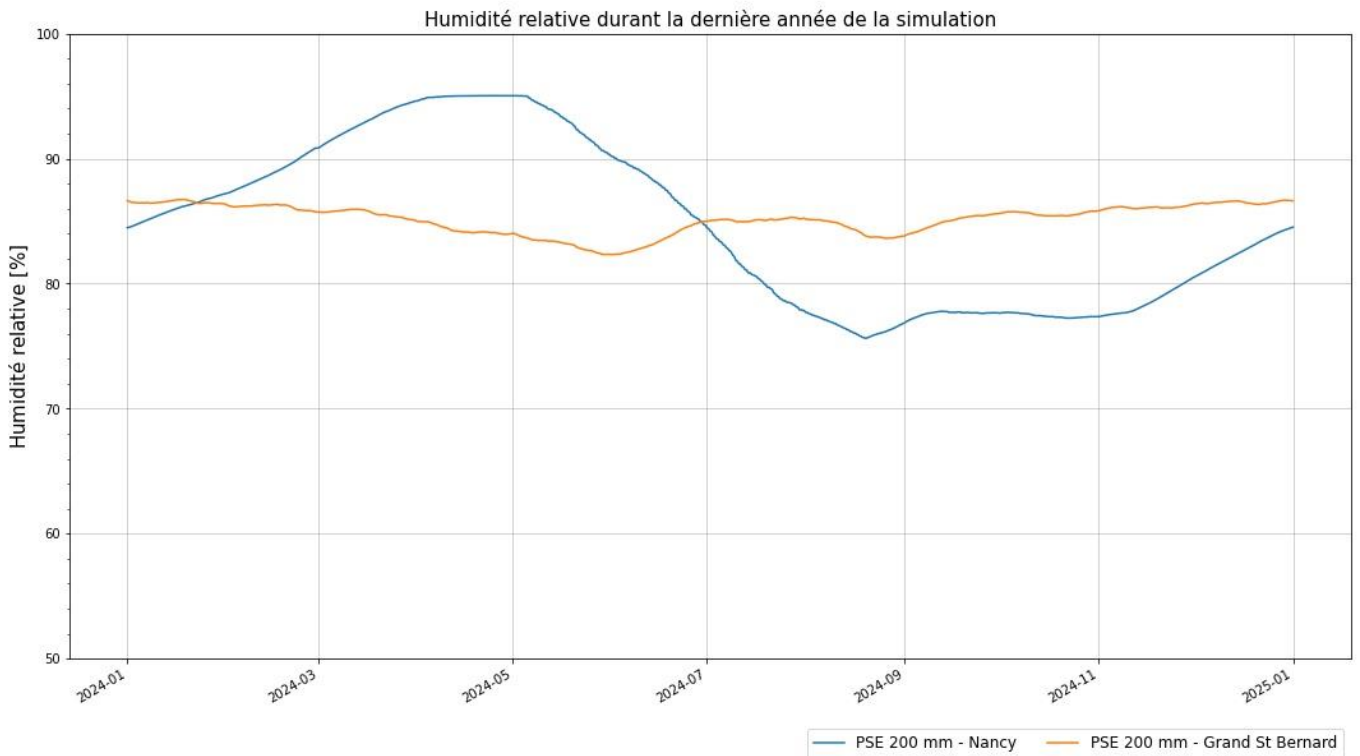
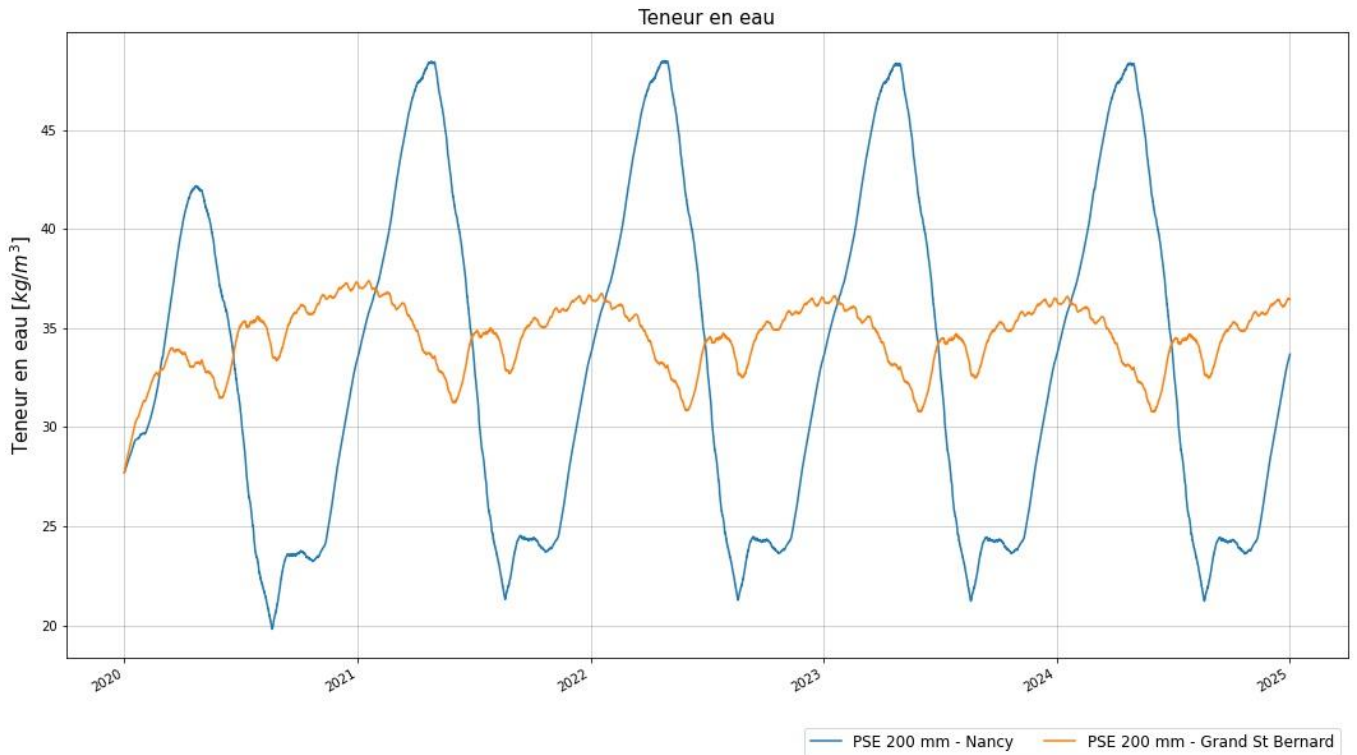
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig7 : Complexe Mastrosistema



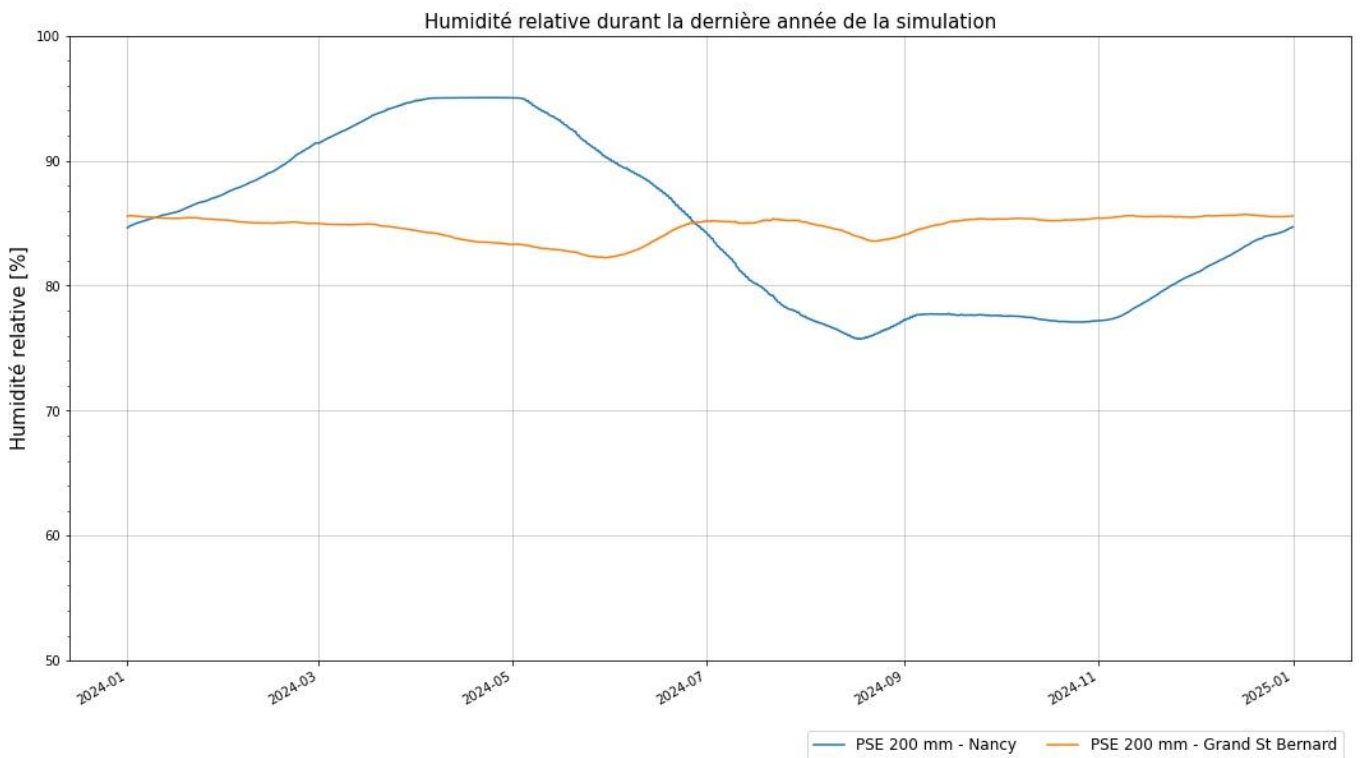
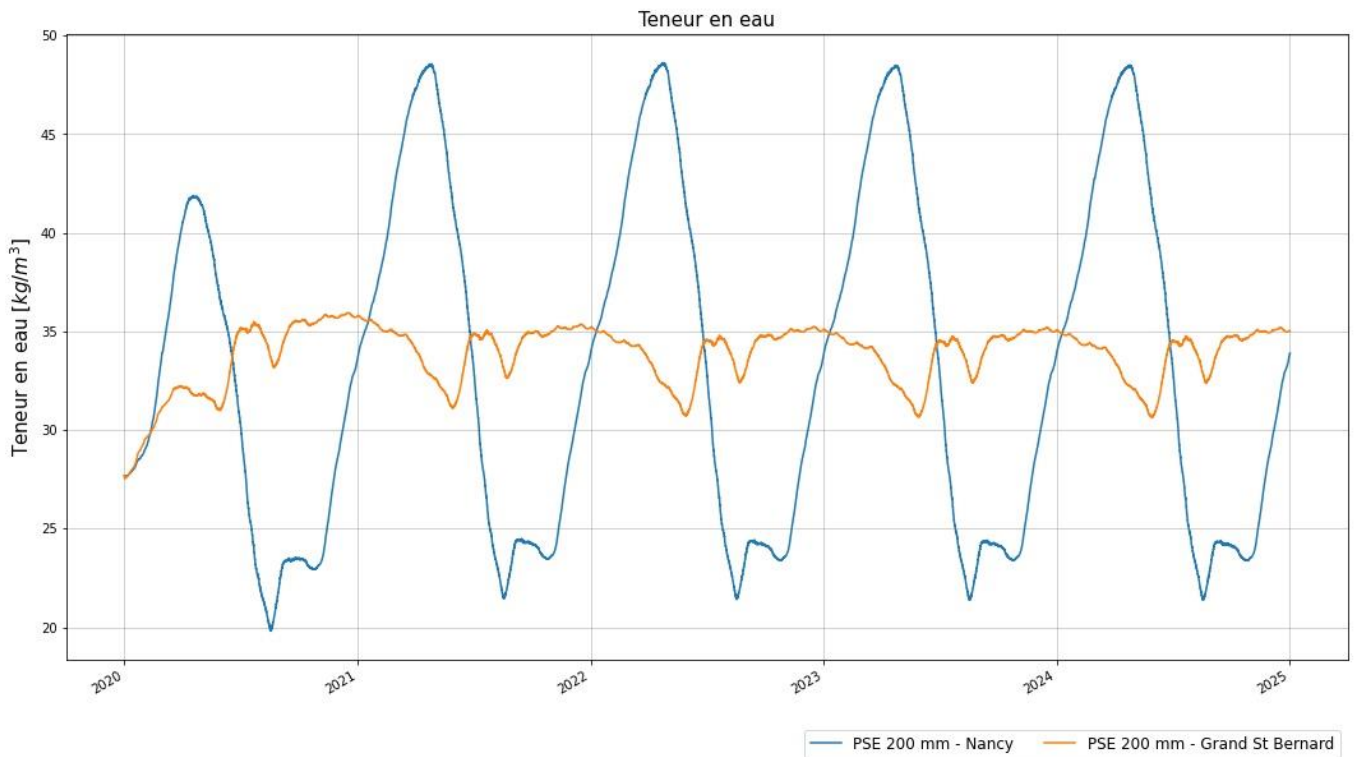
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig8 : Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface du PSE



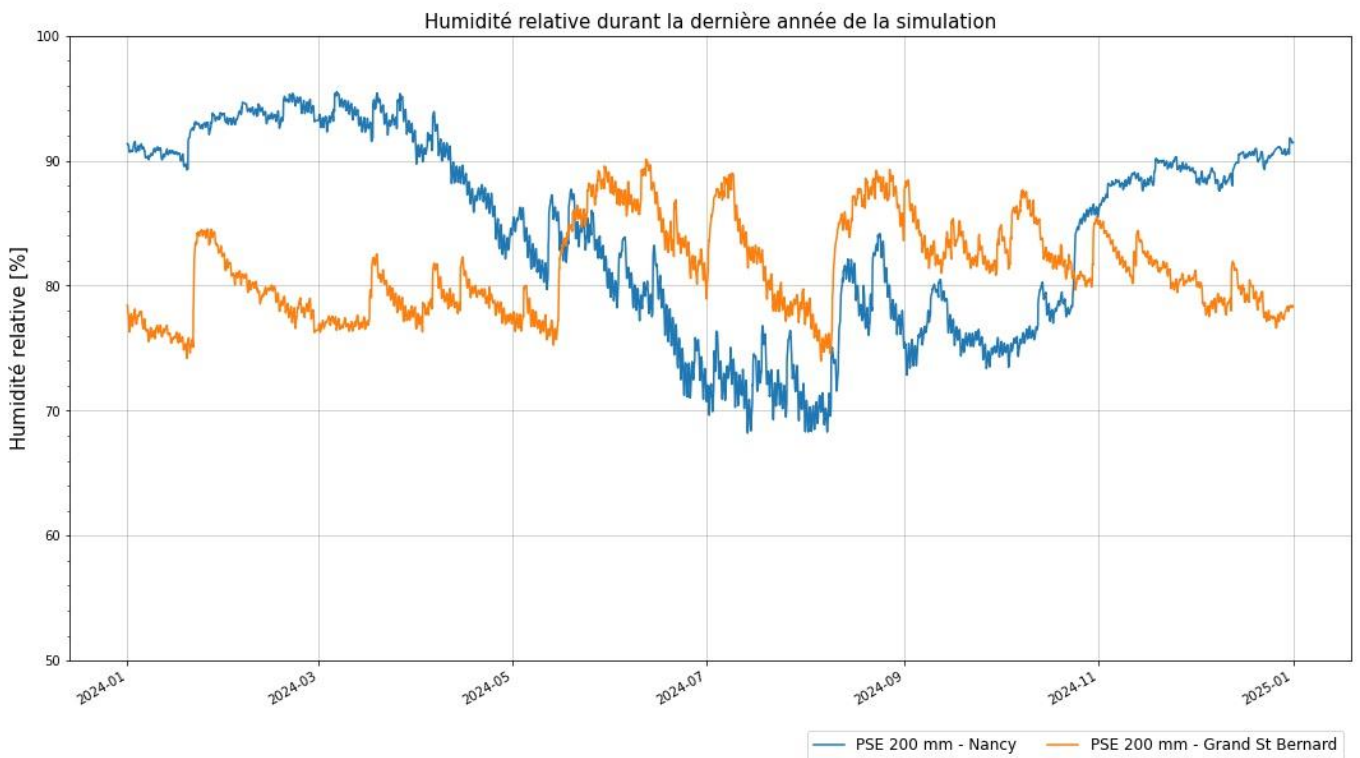
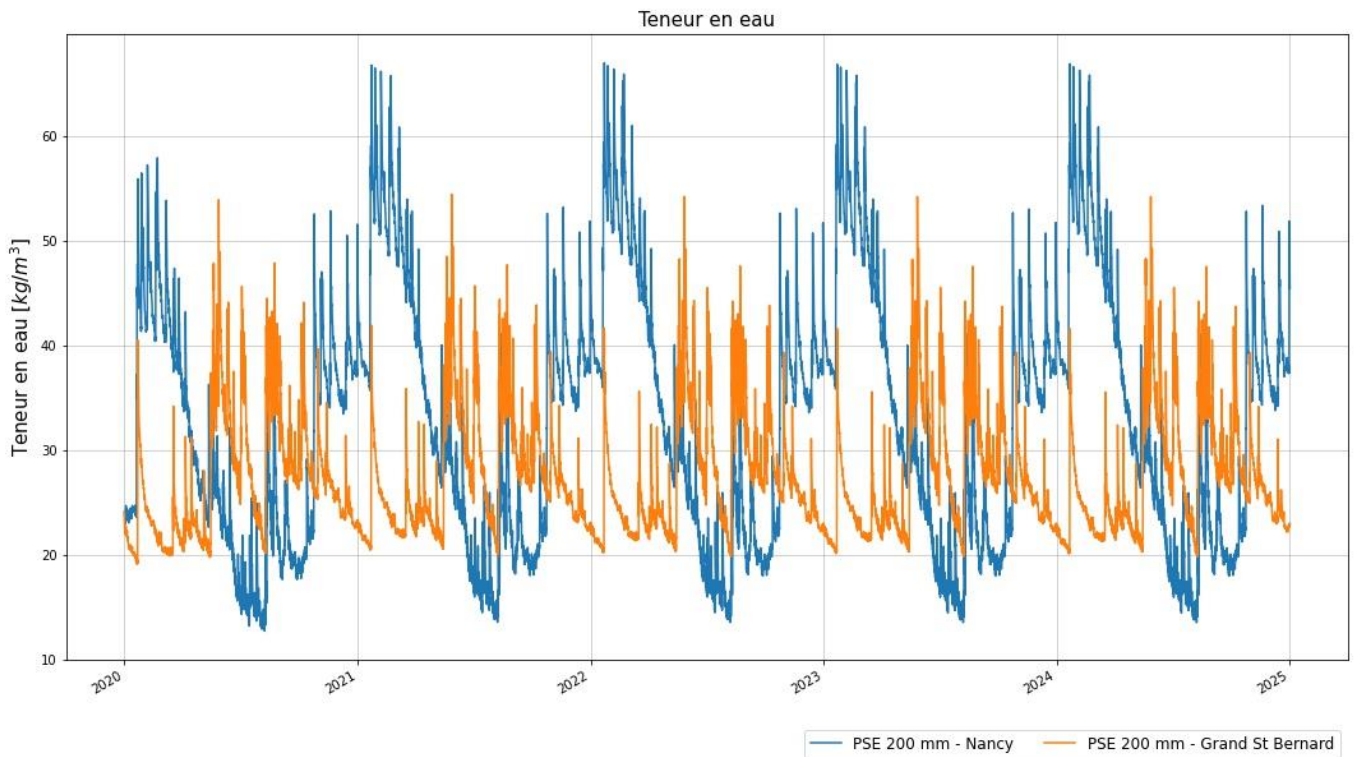
RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig9 : Zone (5mm) du Mastrosistema à l'interface de la pierre Geopietra



RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig10 : Pierre reconstituée Geopietra



RAPPORT D'EXPERTISE

PSE 200 mm | Fig11 : Zone (5mm) de la pierre Geopietra à l'interface du Mastrosistema

