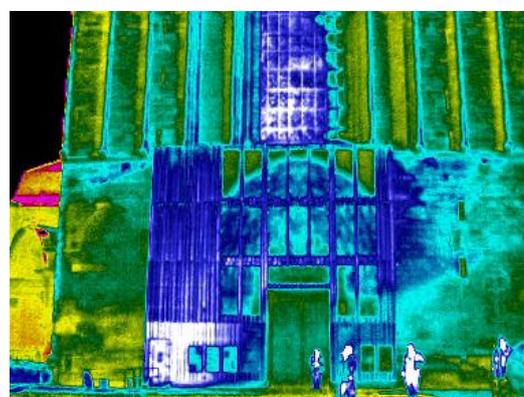


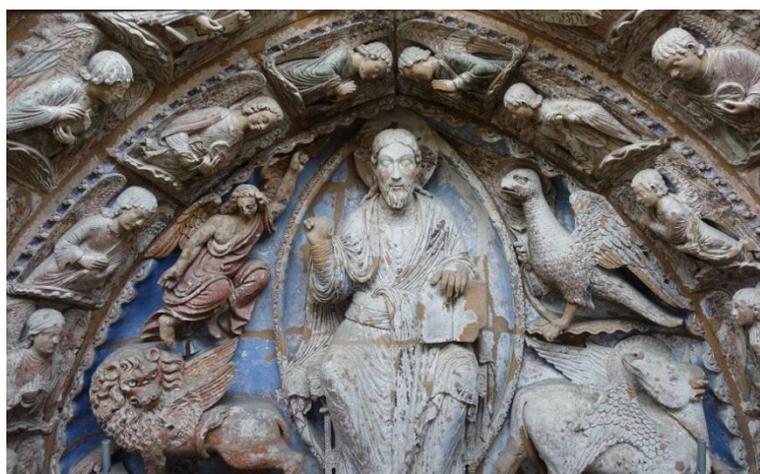
Étude climatique du portail occidental de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers Suivi de septembre 2015 à juillet 2017



Façade de la cathédrale Saint-Maurice et structure de protection du portail occidental

Thermographie de la façade et de la structure provisoire protégeant le portail occidental (en haut à droite)

Motif central du portail sculpté et peint protégé par cette structure (ci-contre)



Géologie
Environnement
Conseil

30, rue de la République F-09200 SAINT-GIRONS, mel@geconseil.com, <http://www.geconseil.com>

Étude et rédaction : Eurgeol François BOURGES,
William HEDIN (Master 2), Camille FABRE (chargée d'étude), Estelle FOURMENT (Master 2)

Septembre 2017

Sommaire

Sommaire	2
Introduction	3
I) L'instrumentation	5
a. <i>Le matériel</i>	5
b. <i>Mise en place des appareils et relevés des données</i>	6
II) Les données brutes	11
a. <i>Les données de la station climatologique</i>	11
b. <i>Les données des capteurs de confinement</i>	11
c. <i>Les données des triplets humidité températures air/paroi</i>	12
III) Analyses statistiques	18
IV) Analyse du microclimat dans la structure.....	24
a. <i>Analyse des relations extérieur-intérieur</i>	24
b. <i>Profils verticaux aux extrêmes hiver/été</i>	33
c. <i>Effets dus à l'ensoleillement à l'échelle de la journée</i>	35
d. <i>Effets dus au vent</i>	39
e. <i>Effets dus à la pluie et l'humidité</i>	42
f. <i>Effets dus au froid</i>	45
g. <i>Effet de confinement par les mesures en CO₂</i>	46
h. <i>Effets de condensations</i>	49
V) Analyse des thermographies	57
Conclusions et perspectives.....	61

Introduction

L'étude climatique de l'environnement du portail occidental de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers est réalisée par le Bureau d'études GEConseil (représenté par François Bourges) pour la Direction régionale des Pays de la Loire (DRAC/CRMH) (Réfèrent : Clémentine Mathurin). Nous présentons ici les résultats de cette étude fondée sur un suivi de près de deux années des paramètres climatiques.

L'étude climatique s'insère dans le projet général de garantir la conservation des sculptures et des polychromies restaurées du portail occidental de la cathédrale d'Angers par la construction d'une protection architecturée. Cette structure aurait la même fonction que la galerie qui a protégé le portail du XIIIème au XIXème siècle. Les altérations des peintures, celles de leur support de tuffeau et des sculptures dépendent de la qualité des matériaux et de leur exposition aux agents atmosphériques. Le portail de l'édifice, en situation topographique dominante, ouvert sur un large parvis, est très exposé aux vents et intempéries venant principalement de l'ouest. Les conditions microclimatiques de la dégradation de certains éléments du monument doivent être identifiées afin d'envisager des remédiations adaptées.

L'objectif de l'étude climatique est d'évaluer l'effet de confinement du volume bardé en bois sécurisé qui protège actuellement le portail échafaudé. L'étude de l'environnement microclimatique du portail dans cette configuration (volume de protection en place) est réalisée de septembre 2015 à juillet 2017 pour fournir le contexte microclimatique des altérations précédemment observées. Une prolongation du suivi initialement prévu sur une année a porté sa durée à 650 jours. Ce travail est mené en collaboration avec Clémentine Mathurin (conservatrice du Patrimoine) et les experts de la pierre au LRMH, afin d'aboutir à la compréhension des altérations puis éventuellement à la modélisation du microclimat en vue des futurs projets de construction. Des résultats préliminaires ont été présentés en comité scientifique des 12 décembre 2015 et 9 juin 2016. Un rapport initial a été rendu en novembre 2016 à l'issue de la première année. Le présent rapport est une mise à jour finale qui intègre la totalité des données acquises pour cette étude.

L'opération est fondée sur les éléments de connaissance des altérations des matériaux poreux par les agents atmosphériques. L'humidité joue un rôle principal dans ces transformations : lessivage des sels, transferts de contaminants, gonflement-rétraction, effets de gel, dissolution, biodétérioration. La capacité des matériaux à fixer l'eau ainsi que les conditions microclimatiques contrôlent l'essentiel de ces phénomènes à différentes échelles :

- A l'échelle du microenvironnement, des mesures de température (air et paroi) et d'humidité, donnent les gradients thermiques et les gradients de pression partielle en vapeur d'eau qui dirigent les transferts d'eau vers ou depuis la paroi. Ainsi, les diverses situations hydriques peuvent être identifiées (condensation, adsorption, assèchement) en relation avec les altérations observées.
- A l'échelle de l'ensemble architectural, l'effet protecteur de la structure peut être caractérisé par le confinement induit en comparant les valeurs des gradients (thermiques, pression de vapeur) et des paramètres directs du confinement (CO₂ % Vol., humidité relative, température). Le couplage avec des paramètres du climat extérieur (ensoleillement, pluie,

vent, humidité relative, pression, température, teneur en CO₂) a pour but d'identifier l'origine des situations potentiellement les plus vulnérantes pour le monument.

Les moyens mis en œuvre sont une instrumentation en vue d'un suivi en continu des paramètres pertinents du microclimat à l'extérieur en façade de la cathédrale et à l'intérieur de la structure.

Les contraintes d'instrumentation étaient fortes (précision et continuité des mesures, absence d'alimentation électrique, impossibilité de câbler) et nécessitaient l'utilisation de capteurs autonomes et de bonne qualité métrologique. Les données sont acquises en continu (au pas de 15 minutes) et permettent le calcul des gradients responsables des flux hydriques et thermiques sur les secteurs les plus exposés aux dégradations. Le traitement des données (analyses corrélatoires et spectrales, analyses en ondelettes continues), permet aussi d'identifier les phénomènes climatiques cycliques (infra journaliers, journaliers et saisonniers) dont la répétition est généralement à l'origine des dégradations les plus intenses. Des thermographies permettent d'étendre dans l'espace de l'information temporelle acquise sur les points de mesure et de rechercher d'éventuelles singularités.

Nous présentons l'instrumentation du site et les propriétés des capteurs (chapitre I), les données brutes sont ensuite exposées (chapitre II) puis analysées en utilisant des méthodes statistiques sur l'ensemble des chroniques (chapitre III) et ensuite en considérant chacun des impacts climatiques sur le volume protégé (chapitre IV). Les informations des thermographies compléteront ces analyses (chapitre V). Une synthèse et les perspectives sont présentées en conclusion.



La cathédrale d'Angers dessinée en 1699 avec la galerie médiévale accolée au portail occidental. Cette galerie détruite en 1806, a contribué à la préservation des polychromies. Les fondations et contreforts de la galerie ont été retrouvés dans les sondages de mai 2016.

I) L'instrumentation

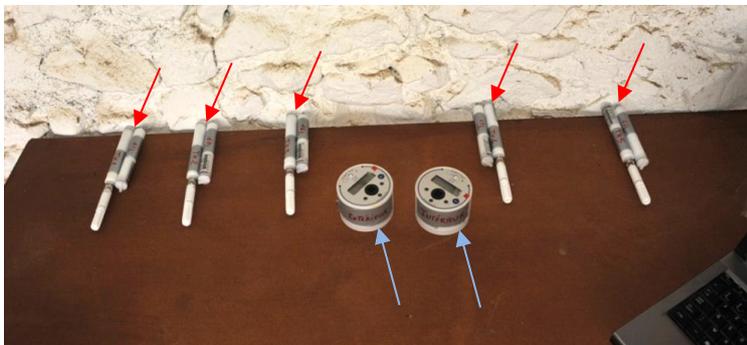
a. Le matériel



Le matériel, propriété de la DRAC Pays de Loire, se compose :

1) d'une station climatologique de marque Davis. La station est installée sur la structure avec les capteurs suivants : thermomètre, pluviomètre, hygromètre, baromètre, pyranomètre (mesure de l'ensoleillement) anémomètre (vitesse du vent) (*photo ci-contre lors des essais*).

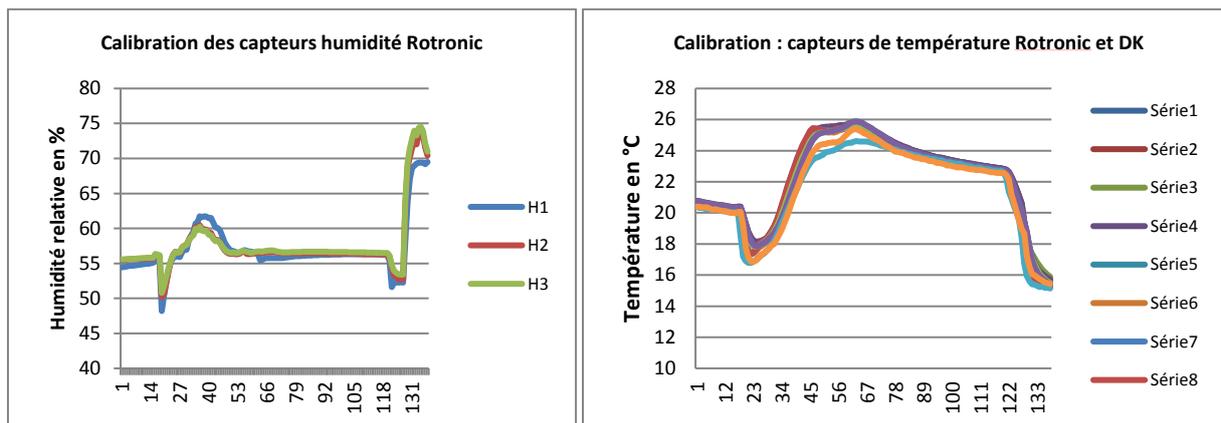
2) de plusieurs capteurs de température et d'humidité de marque Rotronic. À l'intérieur de la structure, quatre groupes de trois capteurs (triplets : température air, température paroi, hygrométrie) sont installés dans les secteurs pertinents pour la mesure. Un triplet identique est installé comme référence sur la façade (*photos ci-dessous, flèches rouges pour les triplets lors des essais*). Cinq points de mesure sont implantés sur la base de thermographies afin d'éviter une redondance excessive.



3) de deux capteurs de confinement (CO₂, température, hygrométrie) de marque DK (*flèches bleues sur la photo*) disposés l'un à l'intérieur, l'autre à l'extérieur de la structure portant le nombre de points de mesure d'humidité à 8.

Ce matériel bénéficie des dernières technologies pour la métrologie et l'autonomie. Les capteurs Rotronic sont précis (0,8% en HR, 0,1°C en température), de qualité homogène et sans dérive significative. Ils ont fait l'objet d'essais (montage à blanc) et d'un test de calibration par inter-comparaison avant installation (*résultat page suivante*). Les résultats sont satisfaisants et donnent des valeurs très homogènes entre capteurs dans la gamme de précision attendue.

Trois logiciels dédiés permettent de gérer la programmation et le relevé des appareils de mesure dont HW4 dédié aux capteurs Rotronic qui assure aussi la communication radio.



b. Mise en place des appareils et relevés des données

L'instrumentation concerne le portail échafaudé sur 3 niveaux, protégé par le bardage bois et par une toiture translucide. Les capteurs sont implantés à la fois dans la structure bardée bois et à l'extérieur de celle-ci de manière à pouvoir relier les impacts du climat extérieur aux variations microclimatiques enregistrées sur le portail.

À l'extérieur de la structure, les capteurs principaux ont été posés grâce à une nacelle. La station climatologique est fixée en partie haute du bardage bois, elle est alimentée par un panneau solaire, les capteurs sont reliés par radio au coffret qui collecte les données et qui est situé au niveau 2 de l'échafaudage et accessible de l'intérieur. Un triplet « 1 » de référence (température air, humidité air, température paroi) a été fixé en façade, aussi avec la nacelle, à un niveau correspondant à la mi-hauteur du portail. Un capteur de confinement extérieur a été posé en bordure du toit translucide.

A l'intérieur de la structure, les triplets températures/humidité ont été fixés directement sur la paroi (triplet 3) ou à partir de l'échafaudage en partie basse (triplet 2). En partie haute (triplets 4 et 5) la fixation initiale a été améliorée sur les conseils d'Olivier Roland, avec l'utilisation de « bras magiques » à partir de serre-joints fixés sur les claveaux et non plus sur les tubes de l'échafaudage qui bougent sous les coups de vent. Les triplets sont constitués de capteurs autonomes en énergie et en mémoire. Fonctionnant sans fil, ils sont relevés par communication radio à partir d'un logiciel et d'une antenne radio branchée sur port USB de l'ordinateur de terrain. Le capteur de confinement autonome a été posé sur un élément du portail au niveau 1.

Les opérations de pose, relevés et d'analyse des données ont été réalisées lors de 8 missions :

Mission 1 : thermographies de l'édifice, de la structure et de détails du portail occidental, installation des capteurs du 21 au 24 septembre 2015.

Mission 2 : relevé des enregistrements (30 novembre 2015), première exploitation des mesures (1^{er} décembre), exposé lors du comité scientifique du 2 décembre 2015.

Mission 3 : relevé des enregistrements (17 mars 2016), thermographies et mesures complémentaires (le 18 mars).

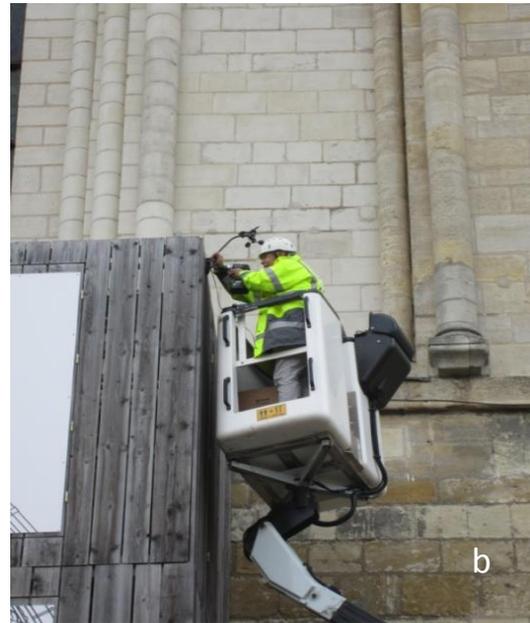
Mission 4 : relevé des enregistrements (7, 8 juin 2016), exposé au comité scientifique du 9 juin 2016.

Mission 5 : relevé des données et mesures complémentaires (21 et 22 septembre 2016).

Missions 6 : prolongation de la mission, relevé, maintenance (14 décembre 2016).

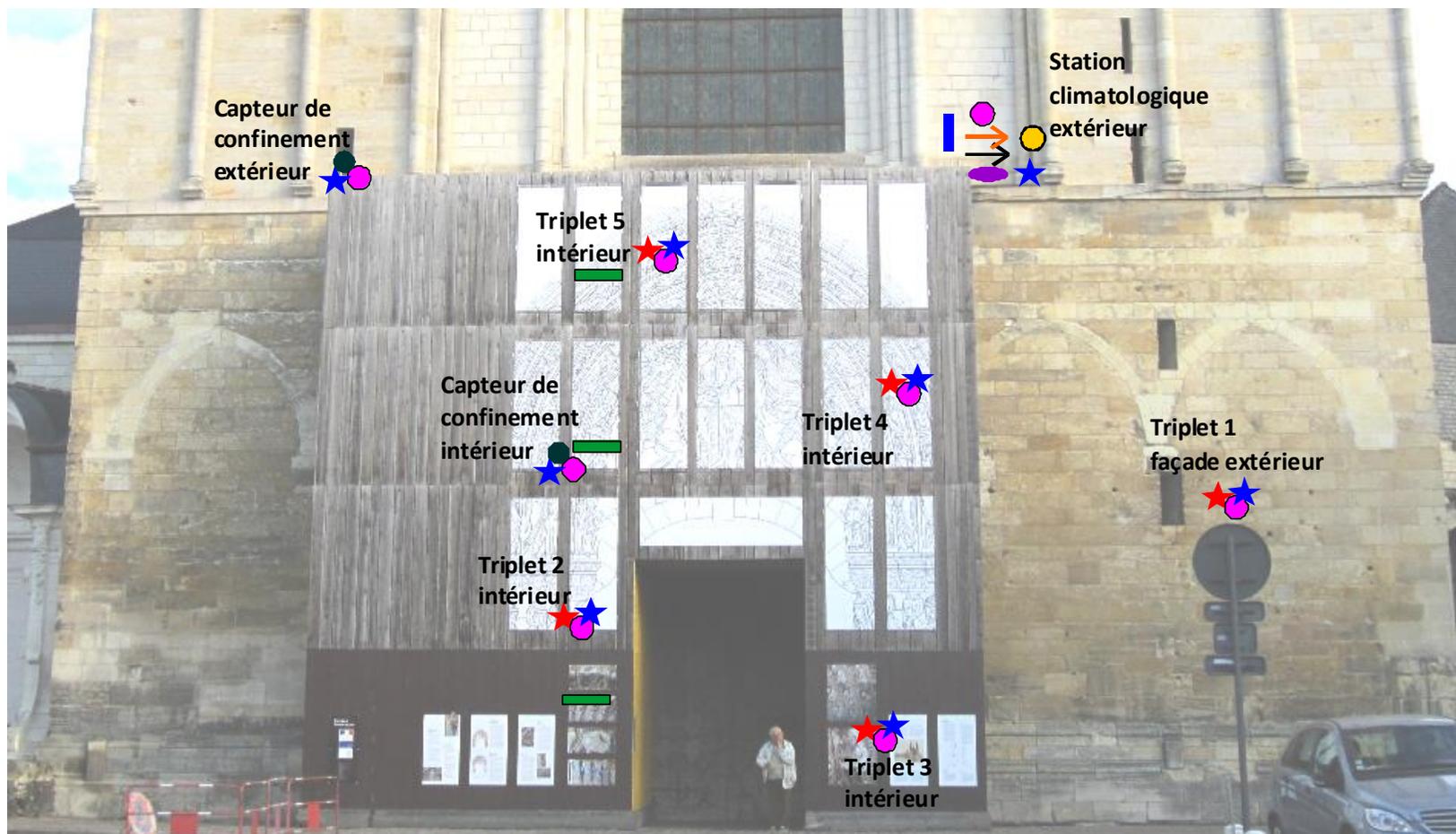
Mission 7 : Mission complémentaire, maintenance, relevé, dépose du TH2 qui a été brisé (le 30 mars 2017).

Mission 8 : prolongation de la mission jusqu'au 5 juillet 2017 : dépose du matériel de mesure accessible.



Les appareils de mesure utilisés ou posés à l'extérieur de la structure bardée : caméra infrarouge pour la thermographie (a), station climatologique (b), capteurs d'humidité et de température (c).

Instrumentation climatique du portail occidental de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers Position des différents capteurs à l'intérieur et à l'extérieur de la structure



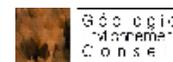
Paramètres mesurés

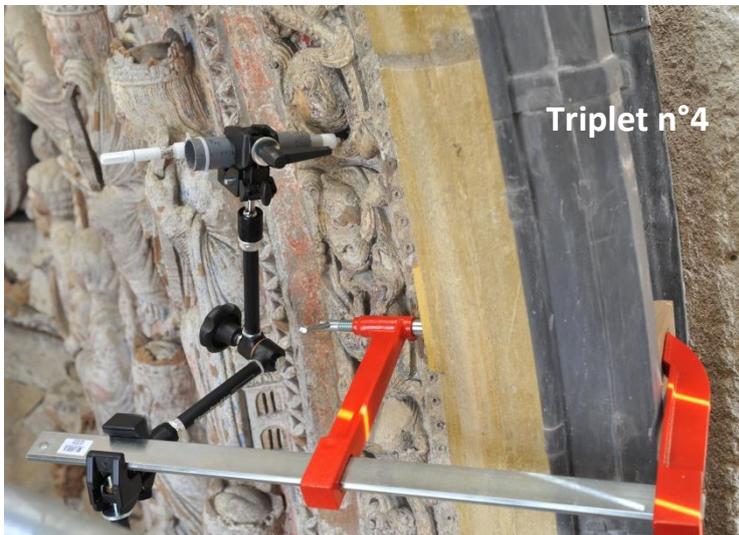
Humidité relative ●
 Température air ★
 Température paroi ★
 Gaz carbonique ●

Pression ●
 Vitesse du vent →
 Direction du vent →
 Ensoleillement ●
 Pluviométrie |

Température air pas de 10s
 Thermographies d'ensemble

Direction Régionale des Affaires Culturelles des pays de la Loire
 Conservation Régionale des Monuments Historiques





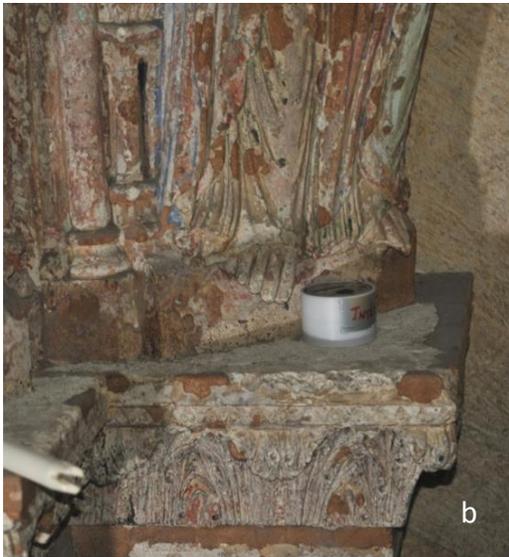
Triplet n°4

Triplet n°5 et triplet n°4 : capteurs de température et d'humidité (température air, température paroi, humidité air).





Autres capteurs de température, d'humidité (triplets température air, température paroi, humidité air) (a) et de confinement (température, humidité, CO₂) (b) à l'intérieur de la structure.



*Le portail est échafaudé sur 3 niveaux. Le volume étudié est protégé par un bardage bois couvert par un toit translucide (c).
Vue du niveau 3.*



II) Les données brutes

a. Les données de la station climatologique.

Les capteurs de la station climatologique ont fourni des données complètes et de bonne qualité (figure n°1) jusqu'à l'arrêt le 5 juillet 2017.

Les températures. Lors du suivi initial, les températures de l'hiver 2015-2016 sont restées clémentes : il n'y a jamais eu de situation de gel durable ni dans la structure ni à l'extérieur. Des températures négatives n'ont été enregistrées que le 17 février au matin (de 4h à 9hTU (11 quarts d'heure).

Les températures d'été sont assez fortes, dépassant les 40°C (41,9°C le 19 juillet 2016), s'expliquant par la forte réverbération en milieu urbain sur la façade de l'édifice.

Les missions complémentaires ont permis d'acquérir, pendant l'hiver 2016-2017, une période avec des valeurs négatives autour de -5°C les 20 et 21 janvier 2017 et un total de 205 heures de températures négatives.

Les humidités relatives les plus élevées près de la paroi sont présentes en hiver dans la gamme de températures°-5 - 12°C. En effet, la quantité de vapeur d'eau nécessaire pour obtenir la saturation est plus faible pour l'air froid que pour l'air chaud.

La pression barométrique est enregistrée correctement : les fluctuations d'hiver sont les plus importantes du fait du passage des dépressions atlantiques.

Les vents sont également bien enregistrés avec des épisodes venteux en hiver lors des perturbations. Certaines périodes d'hiver sont très calmes en hautes pressions lors des inversions thermiques associées à des brouillards alors qu'en été le vent est plus faible mais régulier.

La radiation solaire : le capteur montre l'effet de la course du soleil avec un minimum en plateau en hiver (mi-novembre à début février) dû aux édifices qui portent ombre lorsque le soleil est bas. L'ensoleillement de printemps a été meilleur en 2017 qu'en 2016 avec de nombreuses journées sous couverture nuageuse aux mois de mai et juin.

Le pluviomètre a bien fonctionné avec des valeurs similaires et toujours inférieures à celles des stations climatiques voisines. Sur l'année de mesure du suivi initial (septembre 2015 à septembre 2016), les précipitations totales ont été de 497,2 mm, sensiblement inférieures aux 680 mm de la station de Météo-France d'Angers. L'effet de protection de l'édifice explique cet écart.

b. Les données des capteurs de confinement

Les données issues des **deux capteurs de confinement** (figure n°2) ont donné des résultats cohérents avec les autres capteurs. Les comparaisons entre ces deux capteurs indiquent que les valeurs de températures de CO₂ et d'humidité sont très proches voire identiques à certaines périodes. Notons que les batteries ont dû être changées en décembre 2016 suite à un arrêt sur les deux capteurs et que le paramètre CO₂ du capteur supérieur a dysfonctionné à partir de fin octobre 2016 (probablement à cause de projections d'eau).

c. Les données des triplets humidité températures air/paroi

Les capteurs ont fonctionné parfaitement, les comparaisons montrent que généralement les amplitudes thermiques journalières sont légèrement plus élevées en façade nue que dans la structure bardée avec, en période froide, des températures moyennes légèrement plus basses (figures n°3, 4). Pendant les jours les plus froids de la première année du suivi, seul le capteur température air de la voussure sud du portail (-0.35°C) et le capteur de confinement extérieur (-0,81°C) ont enregistré des valeurs inférieures à 0°C durant seulement quelques heures. En paroi, aucune température négative n'a été relevée. L'hiver 2016-2017 a en revanche été marqué par des périodes froides plus importantes avec 1119 quarts d'heure de températures négatives sur l'air de la façade (soit 12 jours pleins) contre 36 quarts d'heure l'hiver précédent et aussi par 564 quarts d'heure de températures négatives sur l'air du piédroit droit (soit 5,8 jours) contre aucune l'hiver précédent.

En période chaude, le capteur extérieur présente toujours de plus grandes amplitudes thermiques (15,5°C d'écart air/paroi au maximum journalier) que le capteur intérieur le plus protégé, mais les températures moyennes extérieures sont cette fois supérieures à celles des capteurs intérieurs.

L'humidité relative (figure n°5) est, en hiver, plus élevée en façade (+2% en moyenne), tandis qu'en été l'humidité relative en façade est inférieure (1,2% en moyenne) à celle relevée à l'intérieur de la structure. Ces écarts restent cependant minimes et, sur la base des données brutes, le microclimat induit par la structure apparaît faiblement marqué.

Station climatologique extérieure
Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 7 juillet 2017

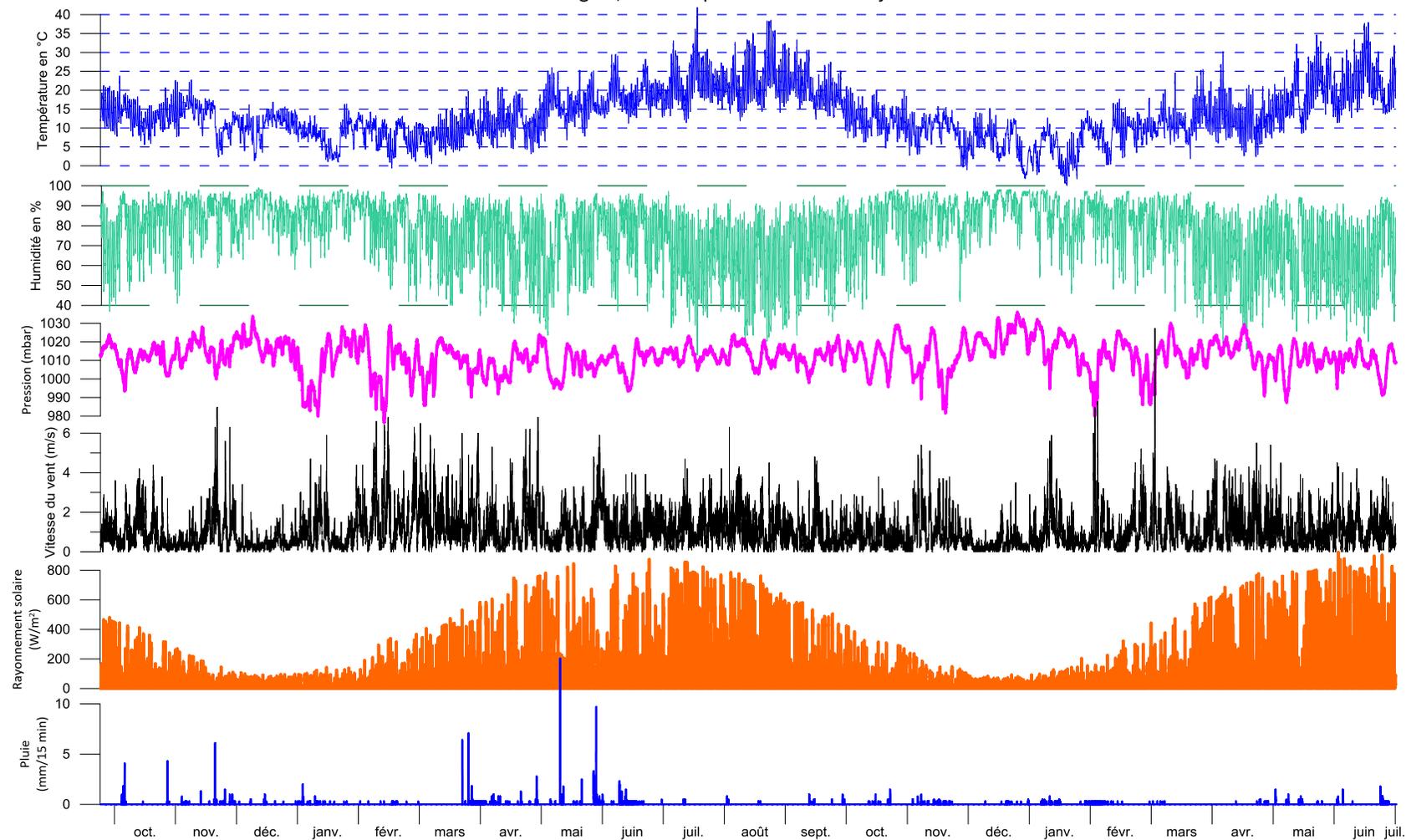


Figure 1 : chroniques de 6 paramètres acquis par la station climatologique au pas de 15 minutes du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017 (température, humidité relative, pression barométrique, vitesse du vent, rayonnement solaire, pluie).

Capteurs de confinement (température, humidité, CO₂)
Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 7 juillet 2017

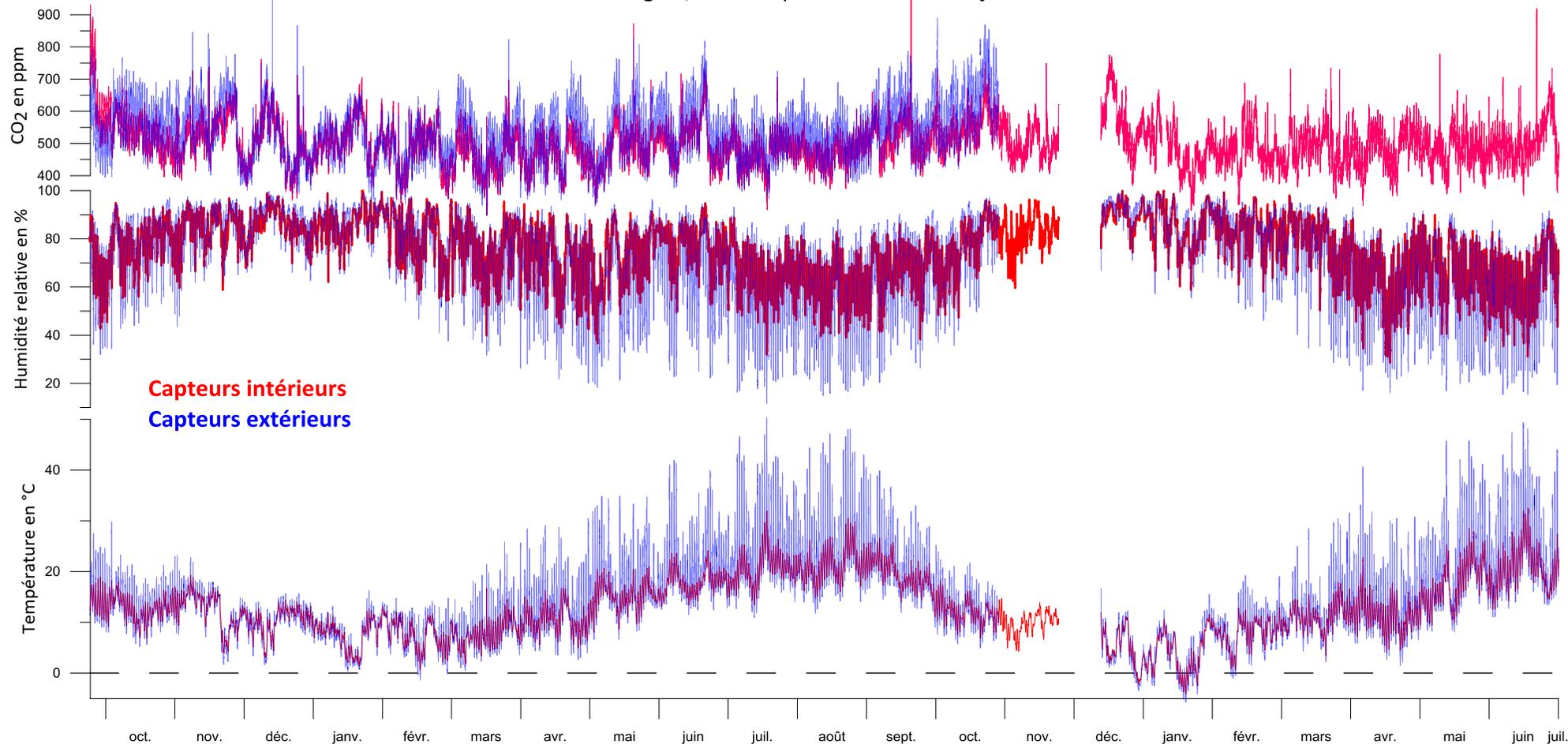


Figure n°2 : chroniques de la température, de l'humidité et du CO₂ issues des deux capteurs de confinement DK : l'un intérieur, l'autre extérieur à la structure. Notons que le CO₂ du capteur extérieur a dysfonctionné à partir de fin octobre 2016. Ces données ont été supprimées.

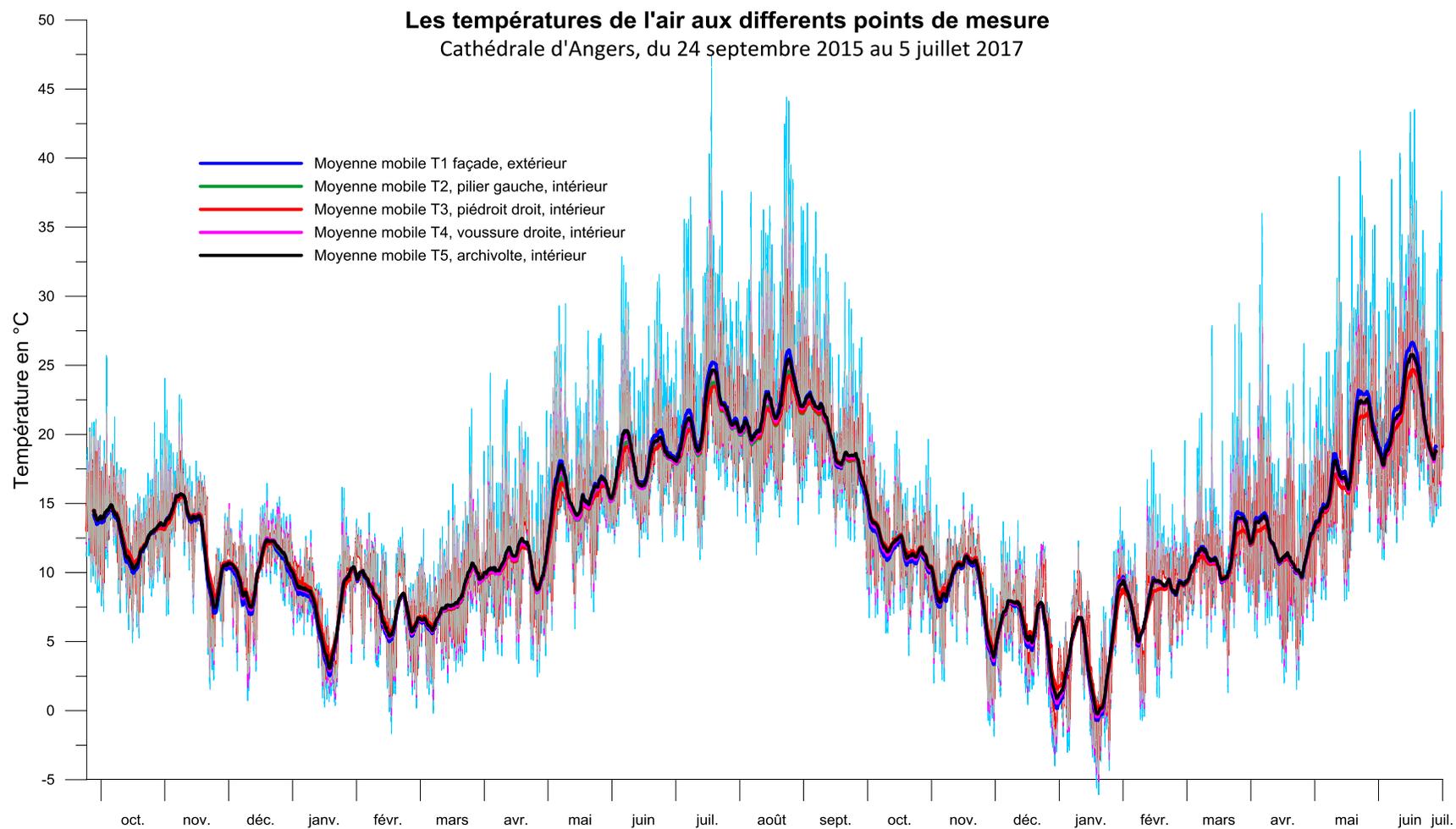


Figure n°3 : chroniques des températures de l'air, comparaison entre la façade (T1) et le portail protégé par la structure ; signal brut et moyennes mobiles à 7 jours. Le microclimat de la structure est identifié par la diminution des amplitudes thermiques journalières et des moyennes légèrement différentes en période très chaude ou très froide.

Températures des parois aux différents points de mesure Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017

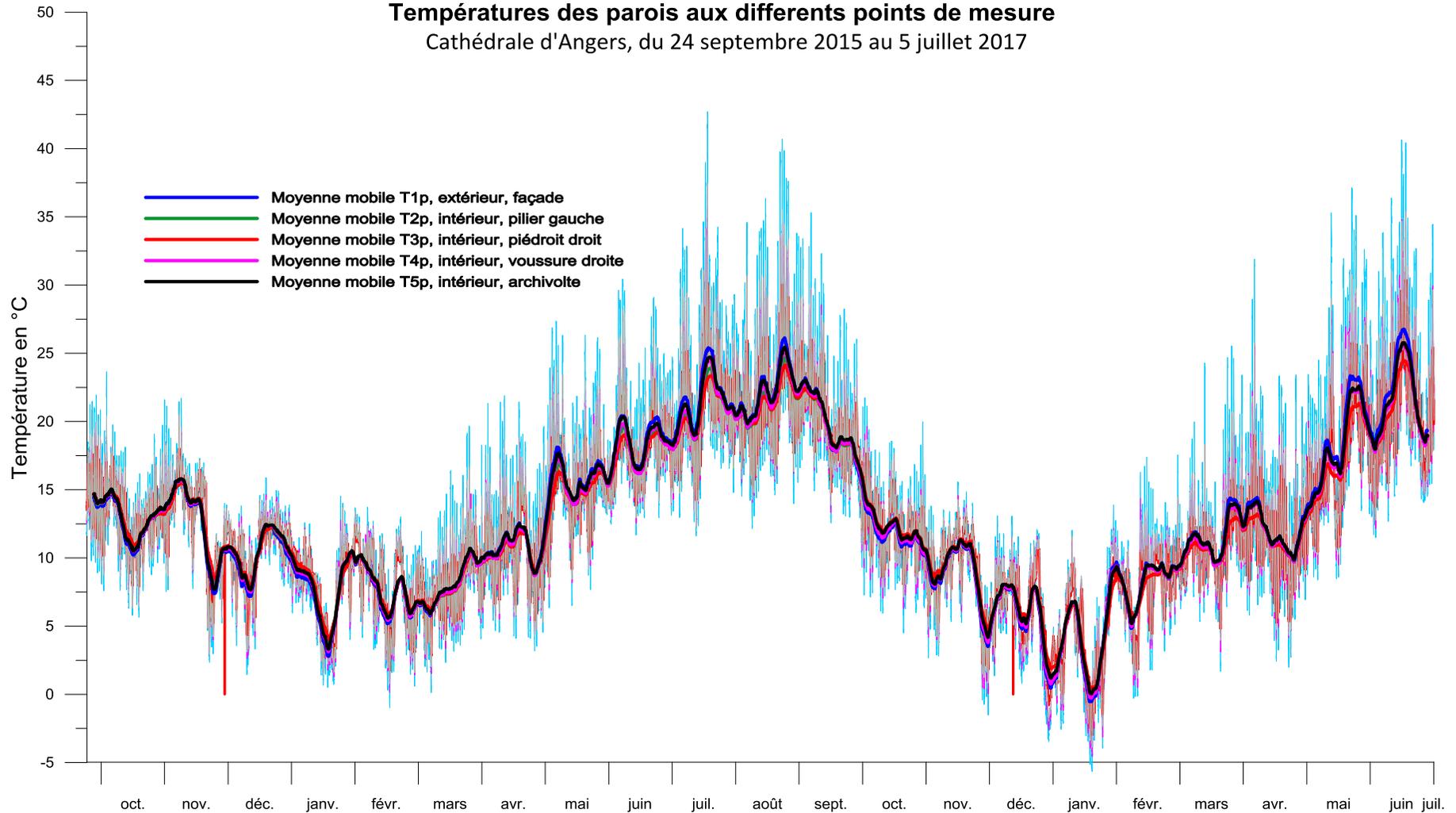


Figure n°4 : chroniques des températures en parois, comparaison entre la façade T1p et le portail protégé par la structure (piédroit sud T3p, pilier nord T2p, voussure sud T4p, archivolt T5p) signal brut et moyennes mobiles à 7 jours. Les amplitudes journalières sont réduites à l'intérieur de la structure. De même les températures moyennes sont légèrement différentes en période chaude et froide.

Humidité (capteurs Rotronic H1, H3, H5)
Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017

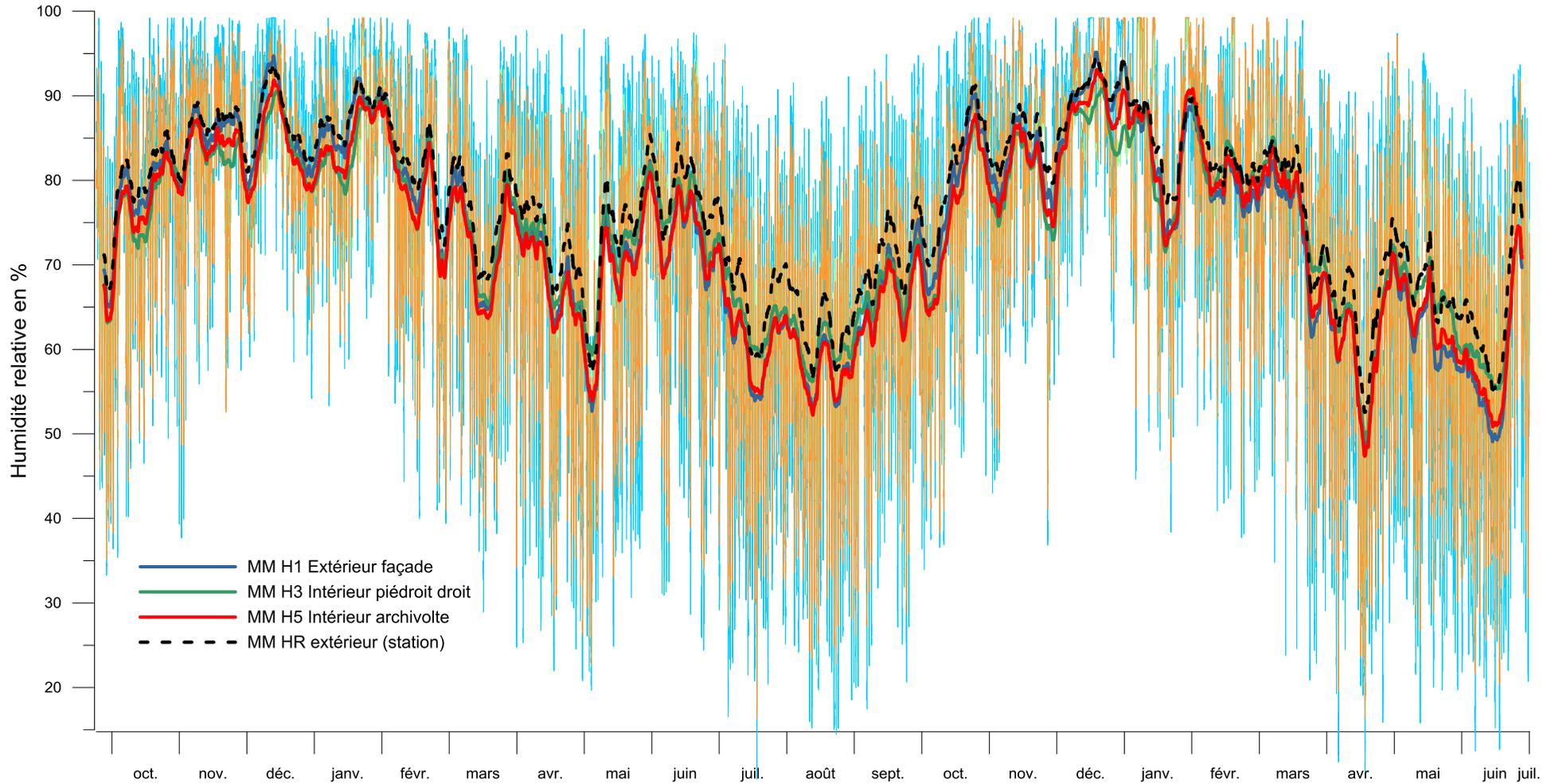


Figure n°5 : chroniques de l'humidité de l'air, comparaison entre le capteur façade et les capteurs intérieurs (piédroit droit et archivolte) ; signal brut et moyennes mobiles à 1 semaine. En hiver les humidités sont légèrement plus élevées en façade (+2% de moyenne). Cet effet s'inverse en été (humidité de la façade inférieure de 1,2% en moyenne).

III) Analyses statistiques

L'objectif des analyses statistiques est de caractériser les distributions des valeurs dans les séries chronologiques (moyenne, écart-type, médiane et quartiles), ce qui permet de comparer facilement les données enregistrées à l'intérieur de la structure et les données des capteurs de référence en façade et à l'extérieur.

L'analyse est réalisée sur la première année complète de suivi.

Tableau des moyennes	Humidité station météo 77.12 %HR	T° extérieure Station Météo 13.95 °C	H1 Extérieur façade 74.16 %HR	TH1 Extérieur façade 13.68 °C	T1p Extérieur façade 13.83 °C
		T° confinement extérieur 14.26 °C	H2 Int pilier gauche 74.43 %HR	TH2 Int pilier gauche 13.55 °C	T2p Int pilier gauche 13.68 °C
		T° confinement intérieur 13.51 °C	H3 Int piédroit droit 74.33 %HR	TH3 Int piédroit droit 13.57 °C	T3p Int piédroit droit 13.64 °C
			H4 Int voussure droite 74.04 %HR	TH4 Int voussure droite 13.63 °C	T4p Int voussure droite 13.7 °C
			H5 Int archivolte 73.15 %HR	TH5 Int archivolte 13.75 °C	T5p Int archivolte 13.88 °C

Tableau des écarts types	Humidité station météo 15.38 %HR	T° extérieure Station Météo 6.22 °C	H1 Extérieur façade 17.98 %HR	TH1 Extérieur façade 6.68 °C	T1p Extérieur façade 6.51 °C
		T° confinement extérieur 7.48 °C	H2 Int pilier gauche 12.80 %HR	TH2 Int pilier gauche 5.66 °C	T2p Int pilier gauche 5.63 °C
		T° confinement intérieur 5.61 °C	H3 Int piédroit droit 12.41 %HR	TH3 Int piédroit droit 5.52 °C	T3p Int piédroit droit 5.39 °C
			H4 Int Voussure droite 14.97 %HR	TH4 Int voussure droite 6.06 °C	T4p Int voussure droite 5.89 °C
			H5 Int archivolte 14.96 %HR	TH5 Int archivolte 6.11 °C	T5p Int archivolte 5.97 °C

Tableaux des moyennes et des écarts types sur l'année d'étude, pour les températures des triplets, des capteurs de confinement, de la station météo, et l'humidité relative mesurée par la station météo et les triplets.

Les moyennes et écarts types sont calculés de septembre 2015 à septembre 2016 (cf tableau). Ils donnent des premiers éléments d'analyse sur une année climatique complète.

Les moyennes. La température moyenne annuelle de l'air dans la structure est de 13,63°C, les écarts entre capteurs sont faibles : moins de 0,2°C entre les différents points de mesure des triplets. L'écart moyen le plus fort, de 0,75°C, apparaît entre les températures des deux capteurs de confinement. Celui qui est placé en limite de la toiture donne la moyenne annuelle la plus élevée à 14,26°C est soumis à un effet de serre induit par le toit translucide. Le tableau montre aussi une température de paroi en moyenne un peu plus élevée que la température de l'air, autour de +0,1°C. L'humidité moyenne dans la structure est de 74% alors que celle de l'air extérieur est de 77%, montrant un léger contraste probablement dû aussi à l'effet thermique de la toiture transparente.

Les écarts types. En prenant comme référence la station climatique, les écarts types indiquent un amortissement modéré des amplitudes thermiques et des humidités relatives par la structure et une amplification également modérée sur la façade confirmant l'effet protecteur de la structure. Le capteur situé près du toit translucide montre les écarts les plus importants. Les mesures prises au piédroit droit sont celles où l'amortissement des impacts climatiques extérieurs est le meilleur.

Les diagrammes en boîtes. Une autre représentation de la distribution des données sur un an par des « boîtes à moustaches » (figure n°6) montre un modeste effet tampon de la structure actuelle. Dans la structure, les écarts entre les extrêmes (températures comme humidités) sont réduits par rapport aux références situées sur la façade et sur la station climatologique. Les médianes des températures dans la structure sont proches de celles de l'extérieur, tandis que celles de l'humidité sont un peu plus faibles qu'à l'extérieur.

Des diagrammes en boîtes sont réalisés uniquement pour les saisons froide et chaude.

- En hiver 2016, l'amortissement très réduit des extrêmes et la similitude des quartiles et des médianes correspondent à un amortissement climatique mineur à nul de la structure. Il en va de même pour les humidités avec cependant une médiane et des quartiles un peu plus bas (3 à 4 % à l'intérieur de la structure) (figure n°7 et 7b). La même analyse réalisée sur les séries de l'hiver 2017 plus rigoureux ne montre pas de différence dans la distribution des valeurs.
- Pour la période estivale (figure n°8), les réductions d'amplitude thermique dues à la structure sont importantes sur les extrêmes et les quartiles alors que les médianes sont similaires sur tous les capteurs. La réduction de l'étalement des valeurs extrêmes et les quartiles plus resserrés montrent le même effet tampon sur l'humidité.

L'effet de tampon thermique de la structure est donc modeste en hiver et plus prononcé en été permettant d'éviter les pics de température sur le portail. Pour l'humidité, l'effet tampon est également avéré (réduction des écarts entre les extrêmes), mais c'est surtout la baisse des humidités élevées constatée l'hiver qui est l'effet le plus intéressant dans la structure car il limite le potentiel de condensation en paroi froide dans la plus grande partie de la structure.

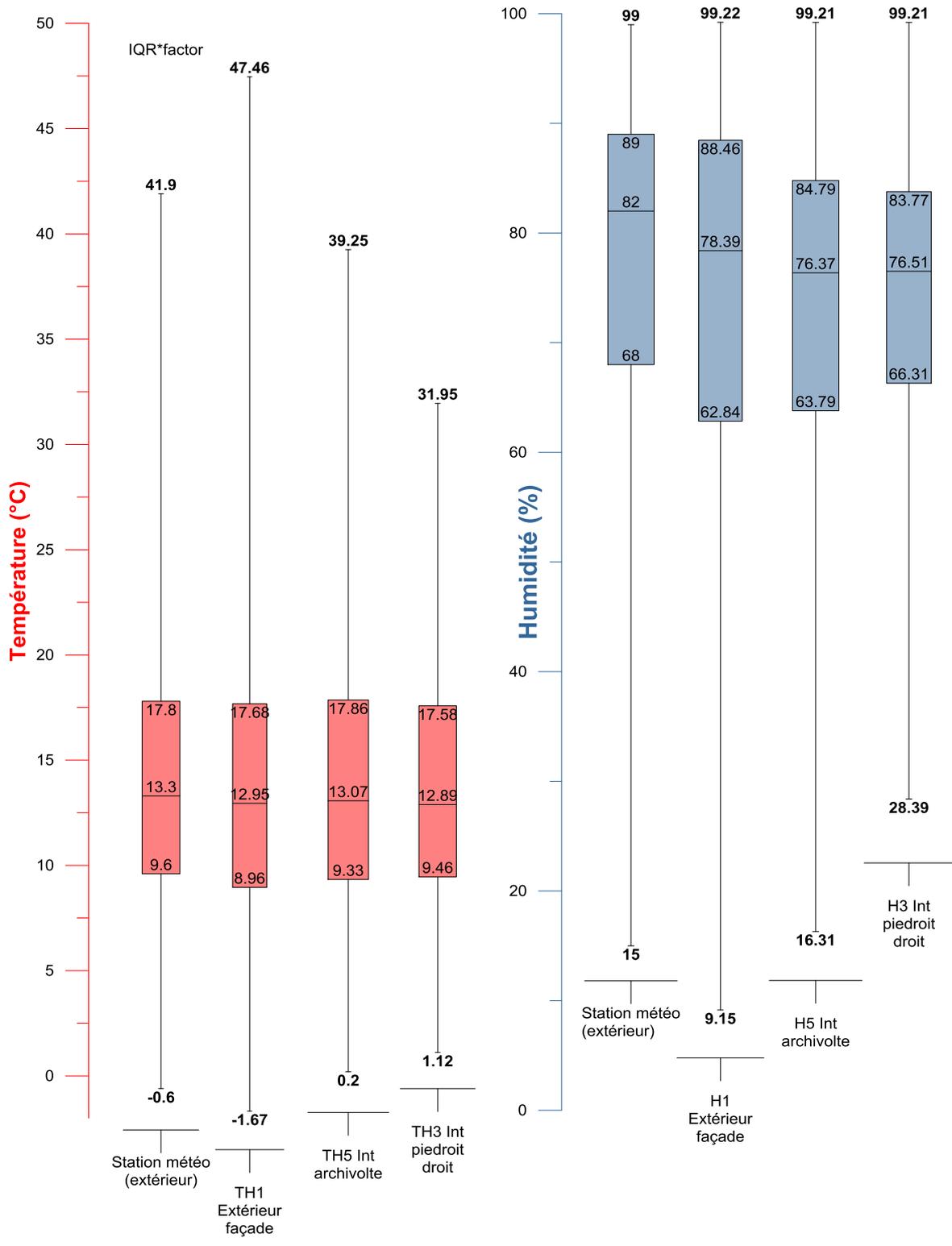


Figure n°6 : analyse statistique des données de température et d'humidité sur un an par les diagrammes en boîtes. La valeur centrale est la médiane, les extrémités des boîtes sont les 25% et 75% (quartiles), les valeurs extrêmes des séries constituent les extrémités des diagrammes. Ici deux points de mesure extérieurs (station météo et façade) sont comparés à deux points de mesure intérieurs (archivolte et piedroit droit). Les températures de l'air ne sont pas significativement différentes sur chaque station (sauf pour les extrêmes supérieurs) alors que l'amortissement est un plus marqué sur la distribution des valeurs des humidités.

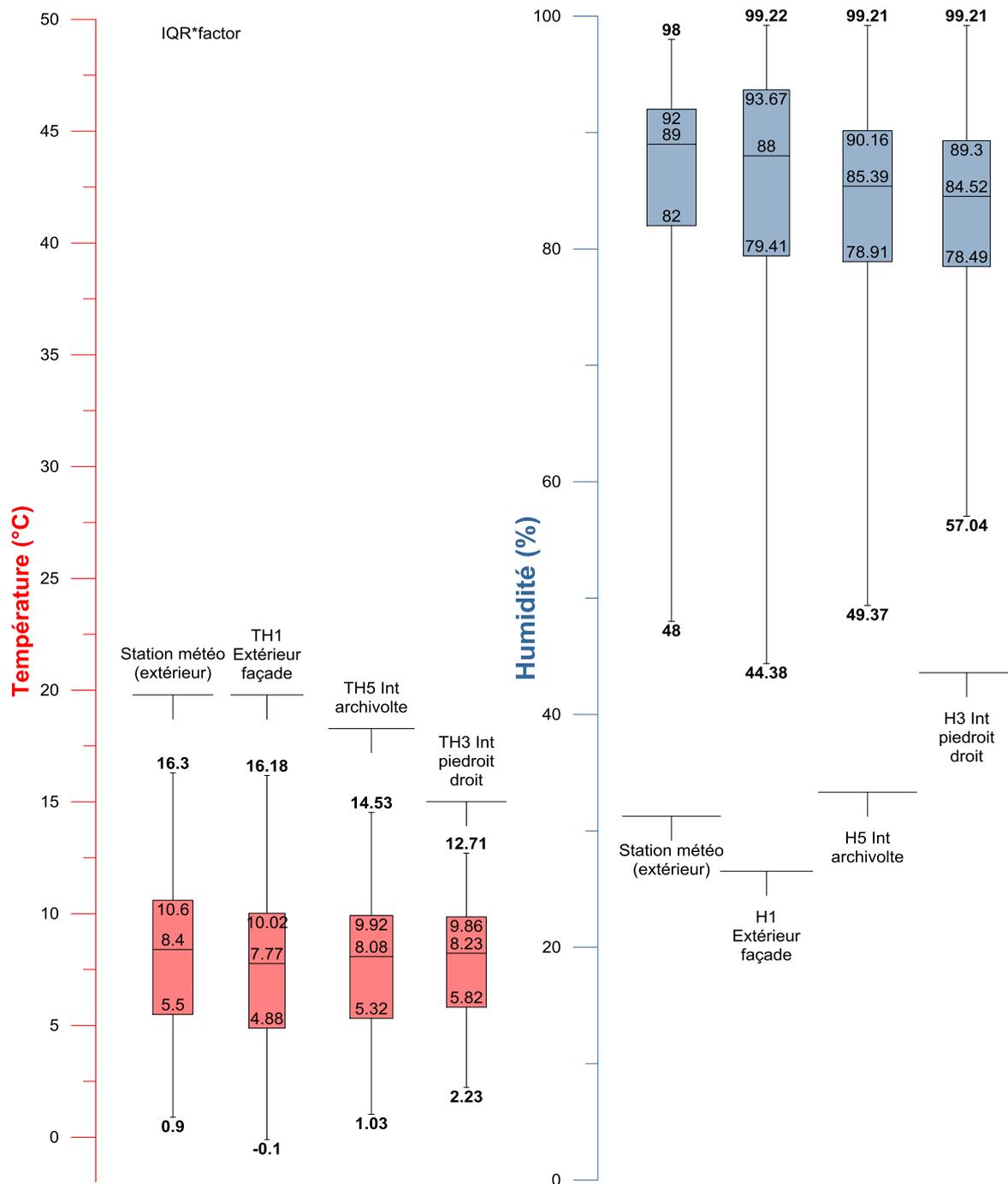


Figure n°7 : analyse statistique des données de température et d'humidité en hiver 2016 pour les mêmes capteurs (du 6 janvier au 16 février 2016, période caractéristique de l'hiver). Les valeurs des températures sont très resserrées en général avec un amortissement limité mais présent dans la partie basse de la structure (piedroit). L'effet est similaire pour l'humidité.

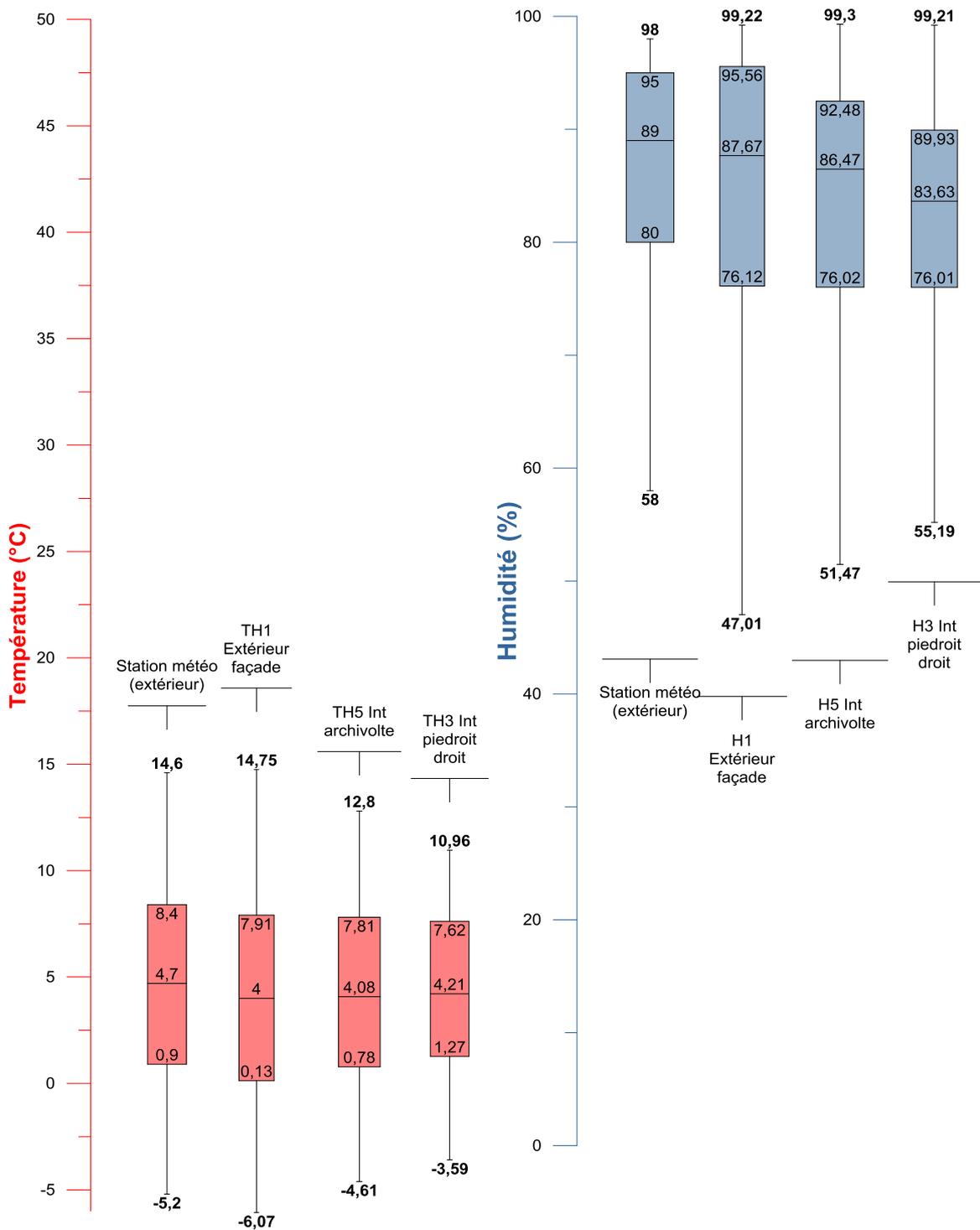


Figure n°7b : analyse statistique des données de température et d'humidité en hiver 2017 pour les mêmes capteurs (du 25 décembre au 4 février 2017, période caractéristique de l'hiver 2017). Les conditions plus rigoureuses (températures plus basses) de 2017 ne changent pas la répartition des valeurs avec les mêmes effets d'amortissement de la structure identifiés en 2016.

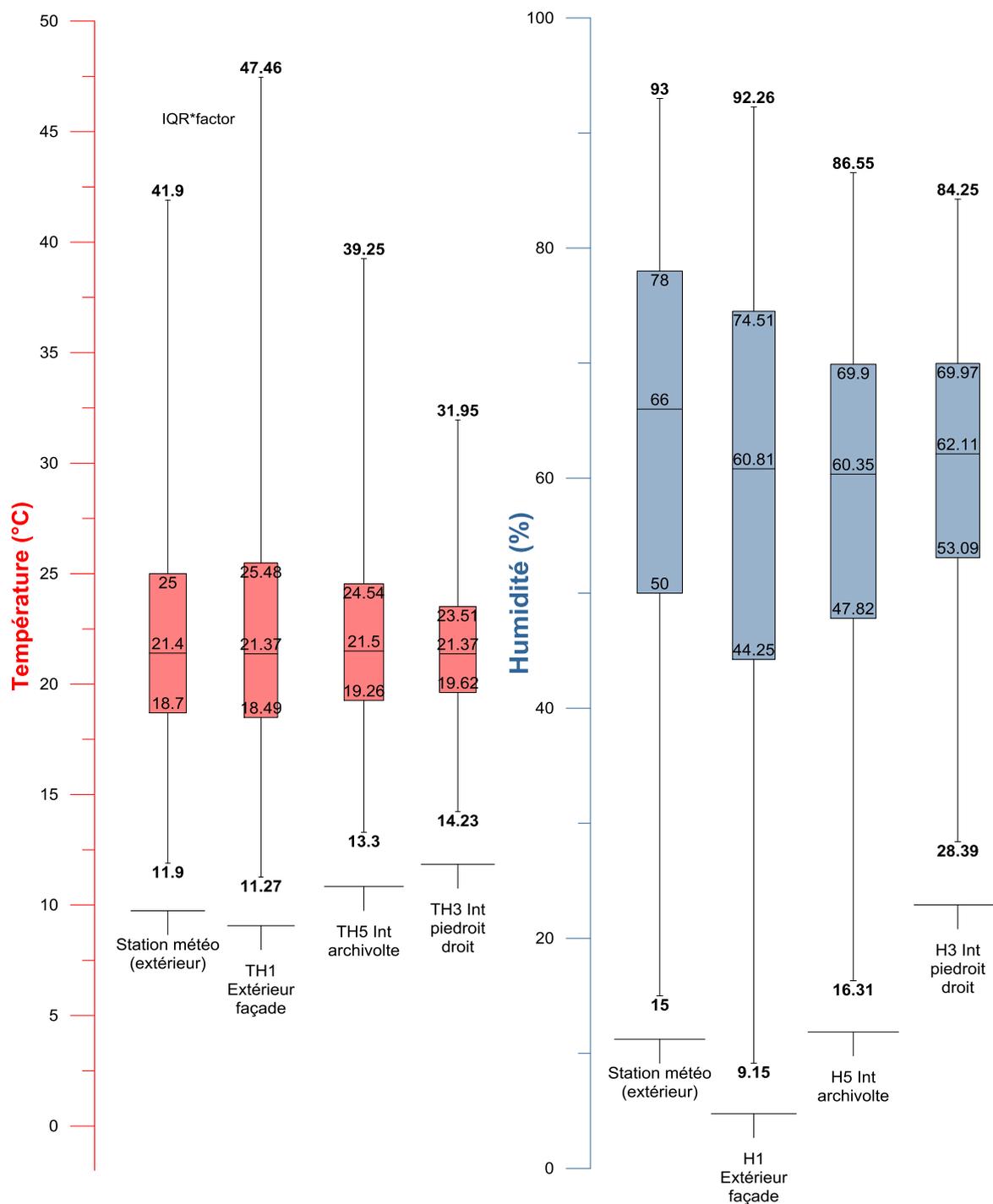


Figure n°8 : analyse statistique des données de température et d'humidité en été pour les mêmes capteurs (période du 15 juillet au 10 septembre 2016, caractéristique de l'été). La distribution des valeurs de la série montre des amplitudes plus importantes et un effet d'amortissement thermique et en humidité plus nettement marqué dans la structure.

IV) Analyse du microclimat dans la structure

a. Analyse des relations extérieur-intérieur

Les températures des capteurs de confinement placés l'un à l'extérieur, l'autre à l'intérieur de la structure indiquent des évolutions globales similaires (figure n°2, figure n°9). En hiver, la structure en bois n'isole pas le portail des fluctuations thermiques extérieures. En été, un amortissement thermique apparaît; il est d'autant plus net que les amplitudes thermiques journalières sont importantes. La température moyenne sur 7 jours à l'extérieur est très légèrement plus basse qu'à l'intérieur en hiver. En été, au contraire, la température moyenne sur 7 jours de l'extérieur est nettement supérieure à celle de l'intérieur et les pics thermiques journaliers atténués **signent clairement un effet protecteur de la structure.**

La corrélation croisée (figure n°9b) entre les chroniques des températures intérieures et extérieures montre une grande similitude (corrélation voisine de 1) mais aussi un déphasage moyen d'une heure entre l'extérieur et l'intérieur. Ces relations persistent en toutes saisons et durant les 650 jours de mesure. **Le faible déphasage et l'absence de dissipation correspondent à une très faible inertie thermique induite par la structure.**

Afin de caractériser l'effet protecteur, nous avons construit les chroniques des écarts thermiques et celles des écarts d'humidité relative entre l'intérieur et l'extérieur (figure 10a). Nous avons utilisé les points de mesure situés dans la zone la plus protégée (piédroit) et dans la zone la plus exposée (archivolte) pour les comparer avec les mesures prises en façade. Cette chronique des écarts entre la façade et l'intérieur de la structure montre une forte saisonnalité avec un amortissement net en été et faible en hiver. Le calcul des corrélations (figure 10b) entre les paramètres d'influence (radiation solaire, vitesse du vent) indique que la relation radiation solaire – écart thermique est très forte, proche de 1 et non déphasée. Le même calcul fait avec le paramètre vitesse du vent montre une relation médiocre. **C'est donc principalement l'arrêt du rayonnement solaire qui est à l'origine de l'effet protecteur thermique et hygrométrique de la structure.**

Nous avons cherché à caractériser l'effet saisonnier. Une période de transition entre un régime d'hiver et d'été (figure n°11) est identifiée en mars-avril. Le changement de régime est progressif : la température extérieure, initialement la plus froide, devient plus élevée que la température intérieure en partie basse de la structure (piédroit droit) tout en restant inférieure aux températures en partie haute de la structure (archivolte). Il faut attendre le mois de mai pour que la température extérieure moyenne dépasse également celle de l'archivolte. Notons cependant que les écarts moyens sont très faibles et ne sont mis en évidence que par la bonne précision des capteurs. En revanche les effets sur les pics journaliers sont eux très nets et d'amplitude significative.

Ecarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur de la structure (capteurs de confinement)
Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017

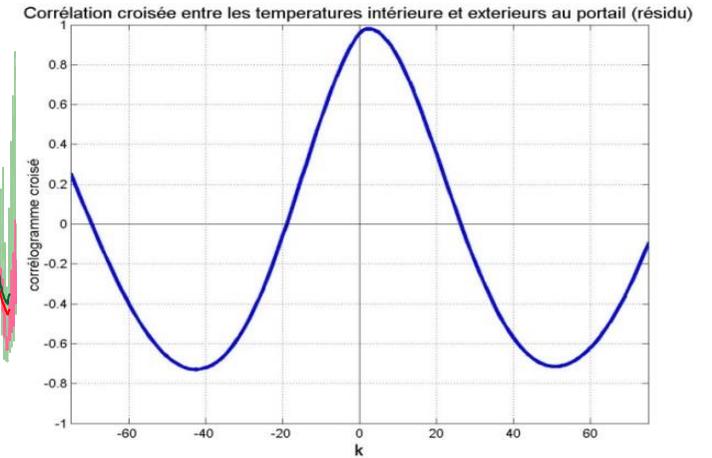
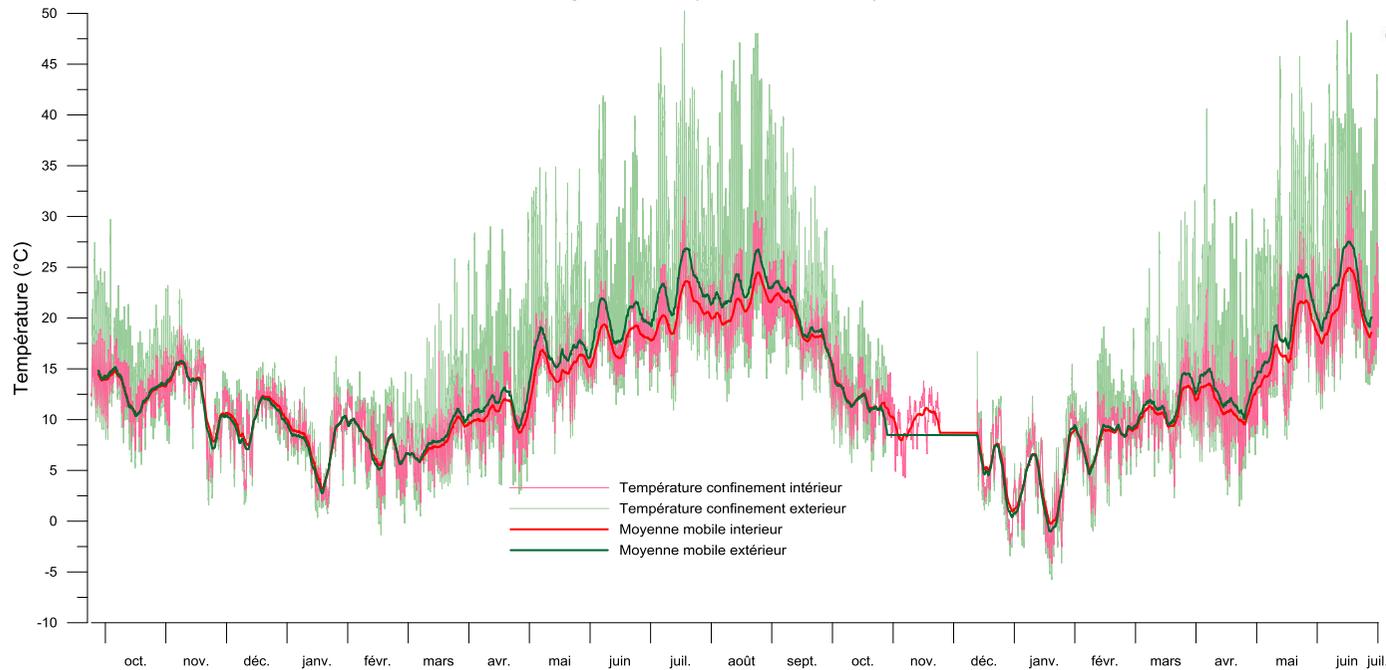


Figure n°9a b : températures relevées par les capteurs de confinement DK, au pas de 15 minutes, et moyennes mobiles à une semaine. La température intérieure (en rouge) présente de plus faibles amplitudes que la température extérieure (en vert). Les tendances des deux températures sont similaires, avec une température extérieure plus forte en été. On note aussi que les pics journaliers de température de la période chaude sont supprimés ou très réduits à l'intérieur. Ces effets sont attribués en majeure partie à la protection de la structure. La corrélation croisée entre les températures extérieures et intérieures montre que la relation est très forte en toutes saisons. L'absence d'amortissement significatif et de déphasage indiquent la faible inertie thermique de la structure.

Effets d'amortissement en température entre la façade et le piedroit et entre la façade et l'archivolte
 Effet d'amortissement en humidité entre la façade et le piedroit
 Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017

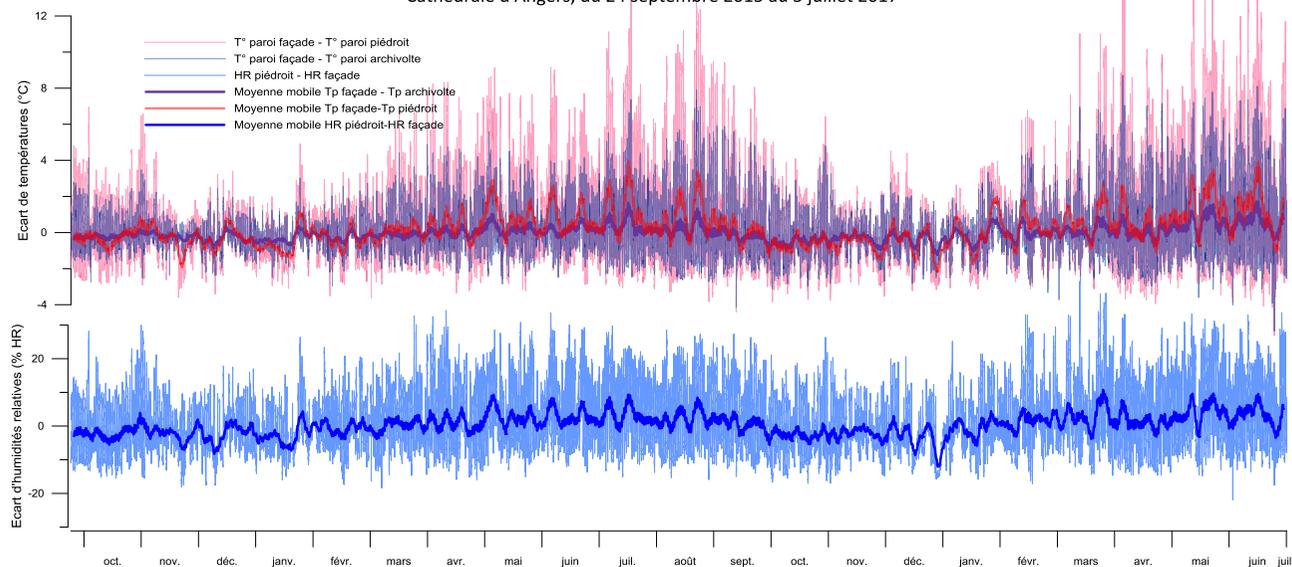


Figure n°10a: chronique des amortissements thermiques et en humidité sur l'ensemble de l'année : en thermique, l'effet d'amortissement est plus important en été indiquant deux régimes successifs essentiellement dus à l'effet de protection par rapport au rayonnement solaire direct. Ce phénomène est également présent sur l'humidité relative.

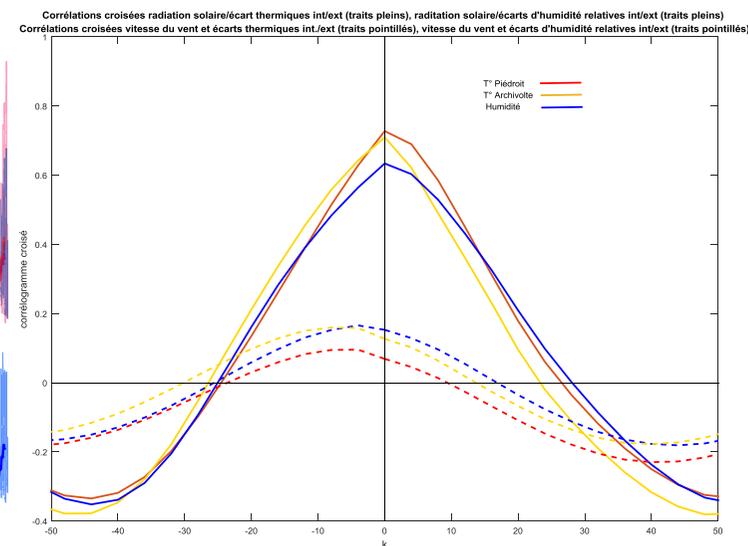


Figure n°10b : Corrélogramme croisé entre la radiation solaire et les écarts thermiques int./ext au piedroit (trait plein rouge) et à l'archivolte (trait plein en orangé). et entre la radiation solaire et l'écart d'humidité relative int./ext. (trait plein en bleu). La relation est très forte et synchrone.

Corrélogramme croisé entre la vitesse du vent et les écarts thermiques int./ext. et entre la vitesse du vent et l'écart d'humidité relative int./ext. (traits pointillés). La relation est faible.

Température de l'air en trois points, période de transition entre le régime d'hiver et le régime d'été
Cathédrale d'Angers, mois de février à mai 2016

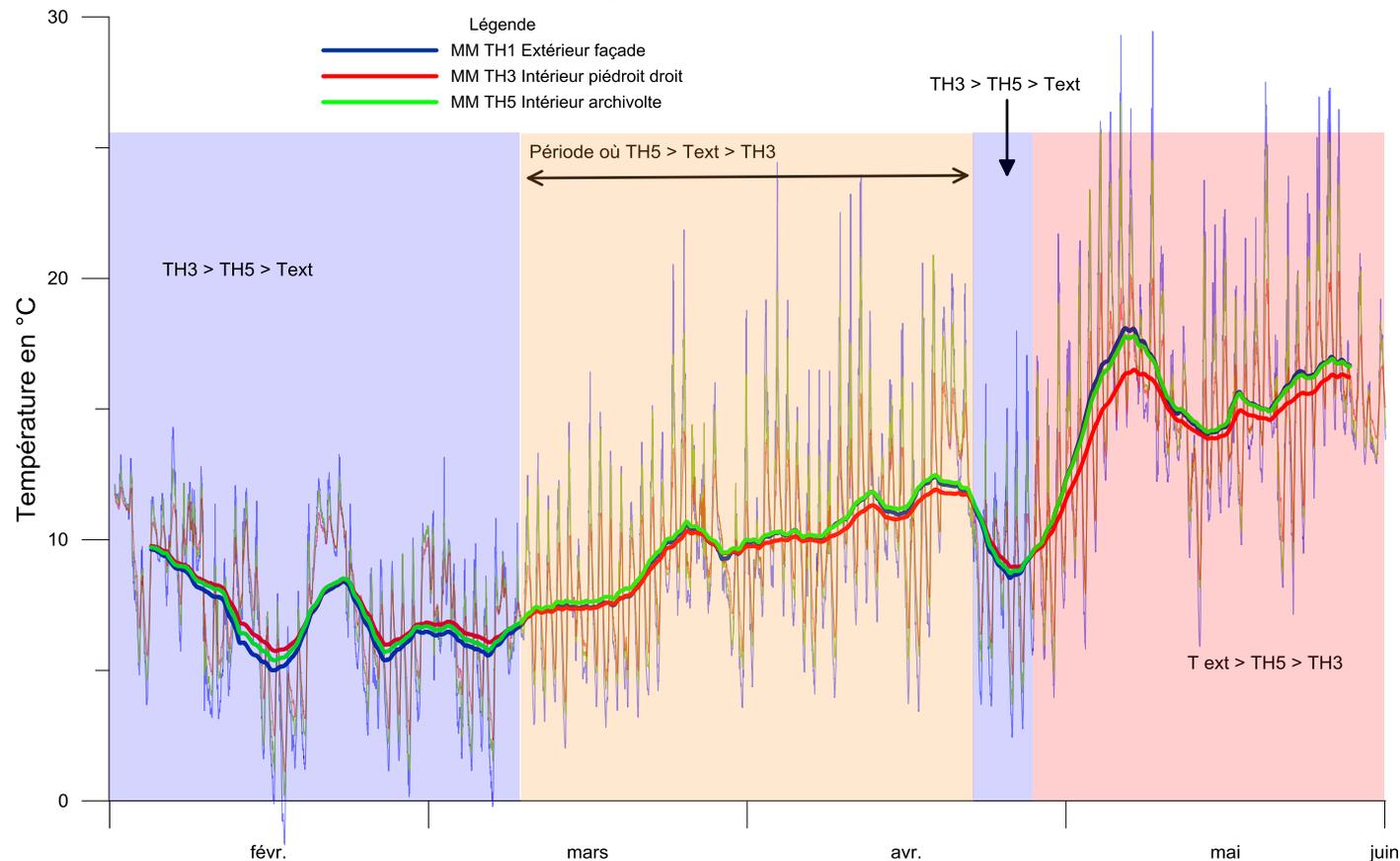


Figure n°11 : les amortissements thermiques : période de transition thermique entre le régime d'hiver et d'été. Chroniques des températures extérieures (façade), des températures intérieures (archivolte, piédroit droit), valeurs brutes et moyennes mobiles à une semaine. En fond bleu, période où les températures intérieures moyennes sont supérieures à celles de l'extérieur ; en fond jaune période où la température moyenne à l'archivolte est toujours supérieure à la température moyenne extérieure, mais celle du piédroit droit reste inférieure à la moyenne extérieure ; en fond rouge les températures intérieures sont toutes inférieures à la température extérieure.

L'effet protecteur s'exprime aussi par les écarts-types qui expriment la valeur d'amortissement caractéristique (cf. tableau ci-dessous).

Écarts-types des différences entre les températures paroi en façade et les températures en parois intérieures à la structure (première année de données)				
Ecart de température des parois	T1p-T2P	T1p-T3P	T1p-T4P	T1p-T5P
Période chaude	2,53	3,17	1,89	1,85
Période froide (hivernale)	0,754	1,088	0,540	0,645

Les différences par secteurs En considérant les températures de parois (écart entre le capteur de référence en façade (T1p) et les capteurs intérieurs à la structure (T2p, T3p, T4p, T5p), un meilleur amortissement apparaît sur les capteurs les plus enfoncés (piédroit sud et pilier nord) dans le portail par rapport au plan de façade par rapport à ceux qui sont en position plus externes (voussure et archivolt) cf. figure n°12. La position du point de mesure par rapport au plan vertical de façade semble à l'origine d'un complément de protection thermique, supplantant parfois celle de la structure bardée. Cet effet d'amortissement est plus marqué en période chaude (-13,39°C d'amortissement maximum et écart type de 3,17°C au piédroit Sud) qu'en période froide (+3,6°C maximum et écart type de 1,08°C) ou intermédiaire.

Les corrélations croisées entre les chroniques du triplet (Ta, Tp, HR) extérieur (façade) et celles des triplets internes à la structure sont calculées pour évaluer l'inertie de la structure en termes d'amortissement et de déphasage des impacts thermiques. Si la corrélation est proche de 1, l'amortissement est nul et donc l'effet protecteur est faible, de même lorsque le déphasage entre les signaux thermiques extérieur et intérieur est proche de zéro. La figure n°13 montre que, par rapport à la façade, les capteurs externes TH4 et TH5 (Voussure archivolt) ont le moins bon amortissement thermique pour l'air, la paroi et l'humidité. Les capteurs TH3 et TH2 (piédroit, pilier) indiquent un meilleur amortissement (déphasage atteignant 1h30 et dissipation plus importante). **Les deux groupes de capteurs (interne et externe) sont à nouveau individualisés.**

Remarquons que, dans les conditions les plus « rigoureuses » de l'hiver 2016 (tableau ci-dessous), les écarts air/paroi ne sont pas notablement modifiés par l'effet de la structure. Cependant, au moment où les températures sont les plus basses en 2016 (17 février), la structure paraît jouer un rôle en maintenant des températures en paroi de 1,37 à 2,7°C supérieures à celles de l'extérieur (référence façade). En 2017 (21 janvier), bien que les températures aient été plus basses (-6,07°C), les écarts entre les températures en paroi sont restés du même ordre de 1,23 à 2,84°C supérieures à celles de l'extérieur (référence façade). Les thermographies (voir chapitre V) indiquent des amplitudes du même ordre et parfois supérieures entre les zones chaudes et froides des sculptures (parties internes ou saillantes des sculptures) ce qui relativise l'effet de protection thermique de la structure en hiver. Les valeurs d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur de la structure sont relativement proches avec un amortissement qui se traduit dans les écarts types diminuant depuis 13,1% en façade, 11,2% et 11% pour la voussure et l'archivolt jusqu'à 9,3% et 9,4% au pilier nord et au piédroit sud.

Situation thermique dans les conditions les plus froides (17 fév. 2016 matin)	T air en °C	T paroi en °C	écart air - paroi	écart paroi façade - paroi int.
Capteur météo au dessus de la structure sud	-0.6			
Capteur de confinement toiture Nord	-1.37			
Capteur de confinement intérieur	-0.81			
Façade Sud de la structure T1	-1.67	-0.91	-0.76	
Pilier gauche (niveau 1) T2	0.54	0.93	-0.39	1.84
Piédroit sud (niveau 0) T3	1.13	1.79	-0.66	2.7
Voussure (Niveau 2) T4	-0.35	0.46	-0.81	1.37
Archivolte (Niveau 3) T5	0.38	0.97	-0.59	1.88

Situation thermique dans les conditions les plus froides (21 janv. 2017 matin)	T air en °C	T paroi en °C	écart air - paroi	écart paroi façade - paroi int.
Capteur météo au dessus de la structure sud	-5.2			
Capteur de confinement toiture Nord	-5.67			
Capteur de confinement intérieur	-3.81			
Façade Sud de la structure T1	-6.07	-5.49	-0.58	
Pilier gauche (niveau 1) T2				
Piédroit sud (niveau 0) T3	-3.34	-2.65	-0.69	2.84
Voussure (Niveau 2) T4	-4.88	-4.26	-0.62	1.23
Archivolte (Niveau 3) T5	-4.42	-3.53	-0.89	1.96

Instrumentation climatique du portail occidental de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers position des différents capteurs de température paroi

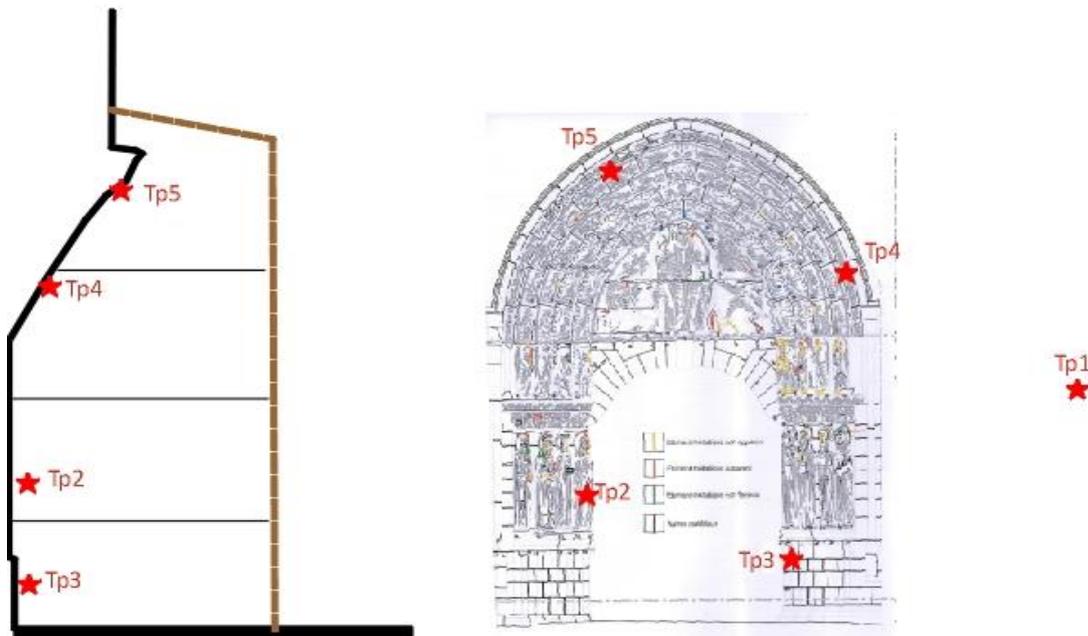


Figure n°12 : position des points de mesure internes et externes de la structure.

La différence entre les températures de l'air et celles de la maçonnerie (figure n°14) est faible à l'intérieur de la structure alors qu'à l'extérieur (courbe Ta-Tp1) les écarts sont beaucoup plus grands. En hiver (figure n°15), cette différence est inférieure au degré, tandis qu'en été les écarts dépassent 5°C (figure n°16). On constate également qu'en été les plus forts écarts se trouvent en partie haute de la structure (voussure : Ta-Tp4 et archivolte : Ta-Tp5). En été le capteur de l'archivolte réagit juste avant le capteur façade aux impacts extérieurs. Il s'agit d'un effet dû au bâtiment et à la toiture translucide, les capteurs ne recevant pas le rayonnement direct du soleil exactement au même moment.

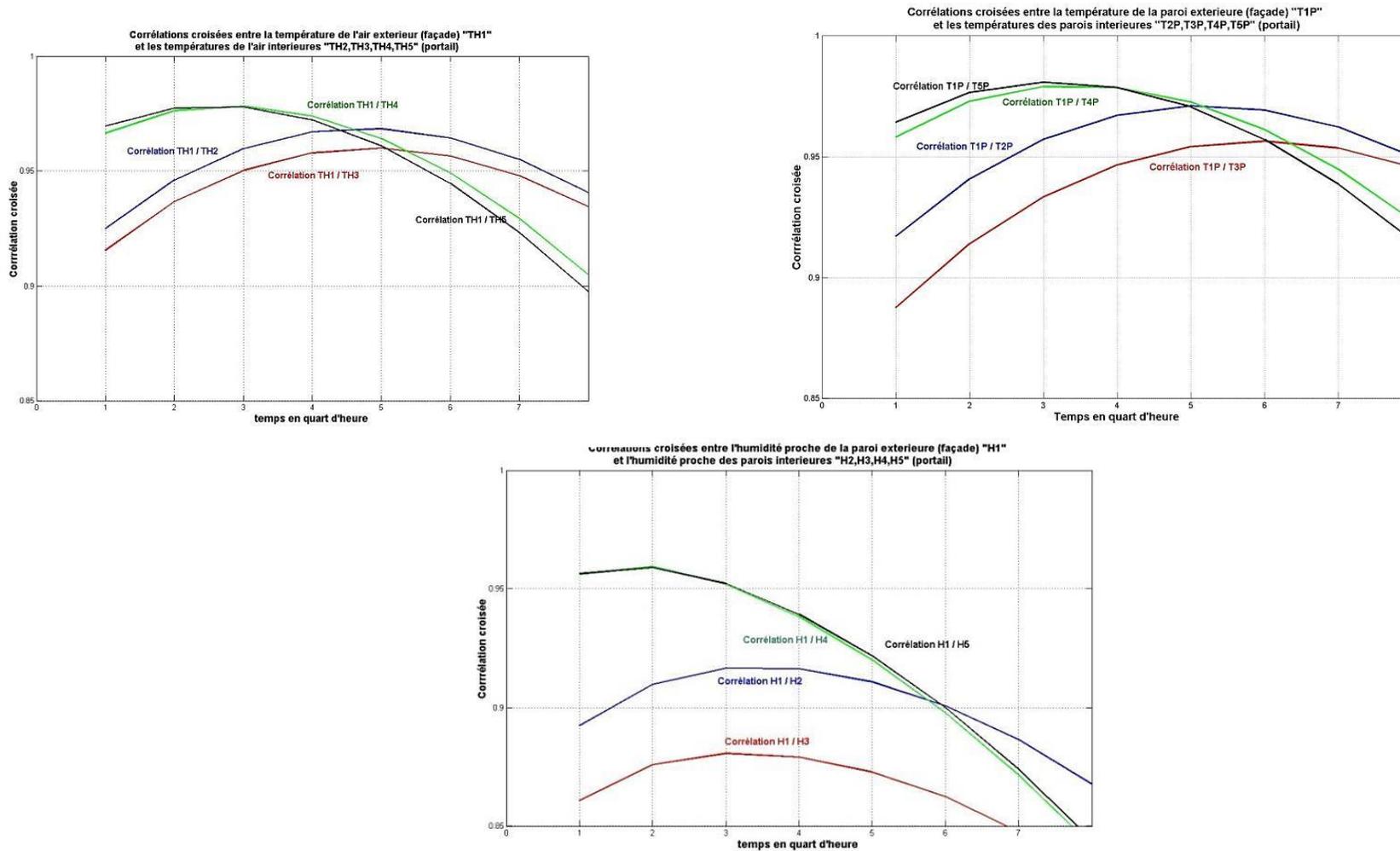


Figure n°13 : calcul des corrélations entre les mesures en façade TH1, T1P et H1 et celles dans la structure pour évaluer l'amortissement et le déphasage signant l'inertie thermique de la structure. Deux groupes de capteurs sont identifiés : les capteurs des parties hautes de la structure qui sont très corrélés et peu déphasés par rapport au capteur de référence extérieur et les capteurs des parties basses dont le déphasage est plus grand (supérieur à l'heure) et l'indice de corrélation un peu moins bon.

Fonctionnement à l'interface (T air - T paroi)
Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 5 juillet 2017

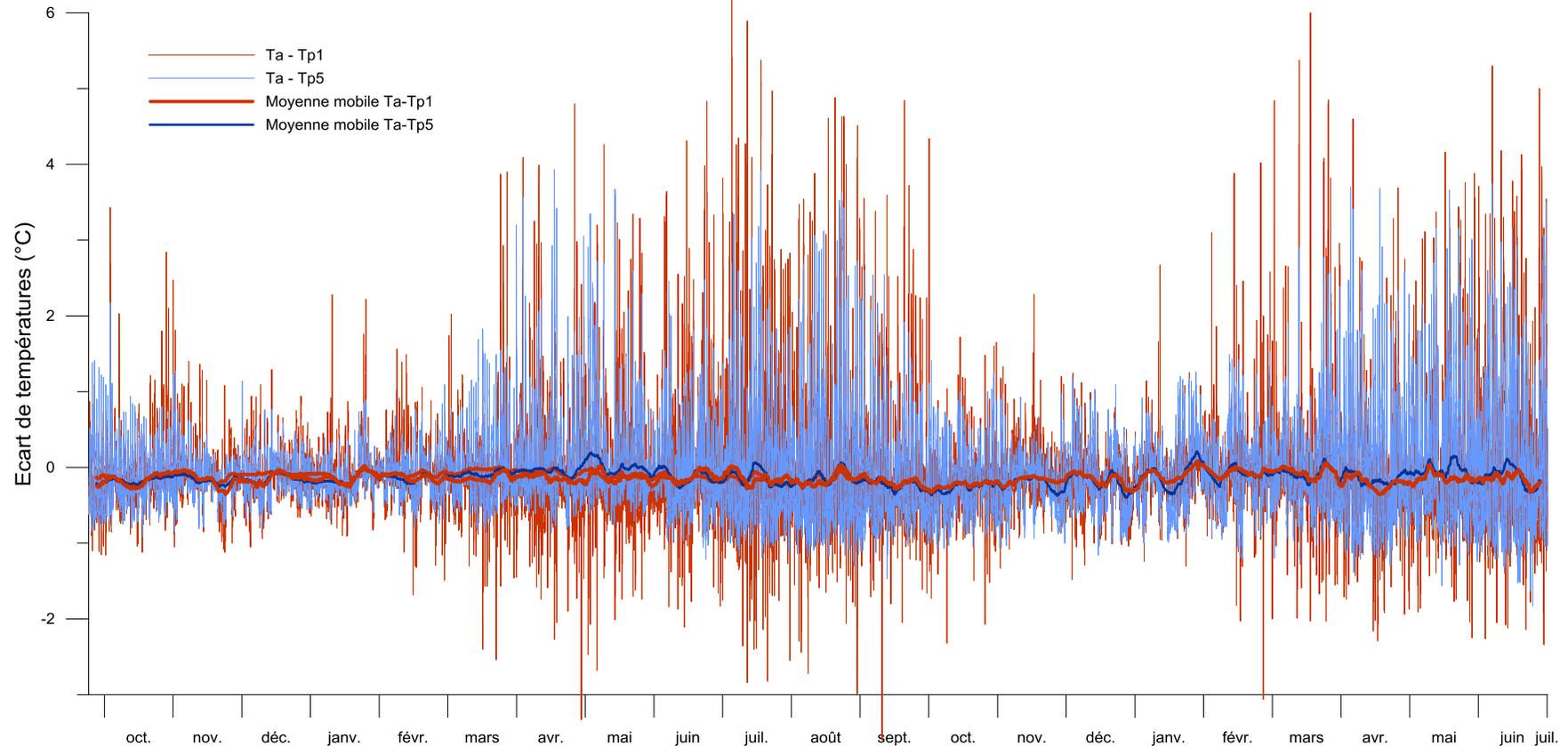


Figure n°14 : différence entre température de l'air et du bâti, pour le triplet façade et le triplet archivolte dans la structure, données brutes et moyennes mobiles à une semaine, sur 650 jours de mesures. Les écarts à l'interface sont nettement plus importants en été et sur tous les points de mesure. Les amplitudes à l'interface sont les plus élevées en façade.

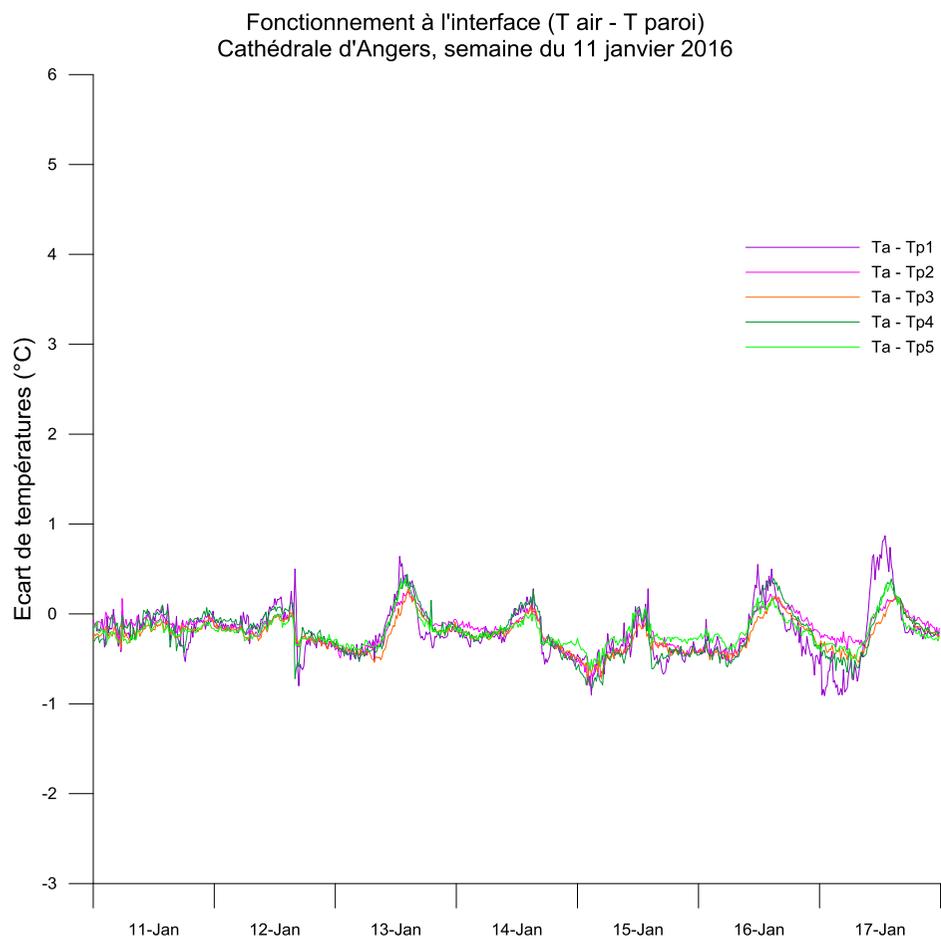


Figure n°15 : fonctionnement à l'interface écarts air paroi sur une semaine en hiver. Les amplitudes des écarts sont faibles l'interface est proche de l'équilibre thermique sur tous les points de mesure.

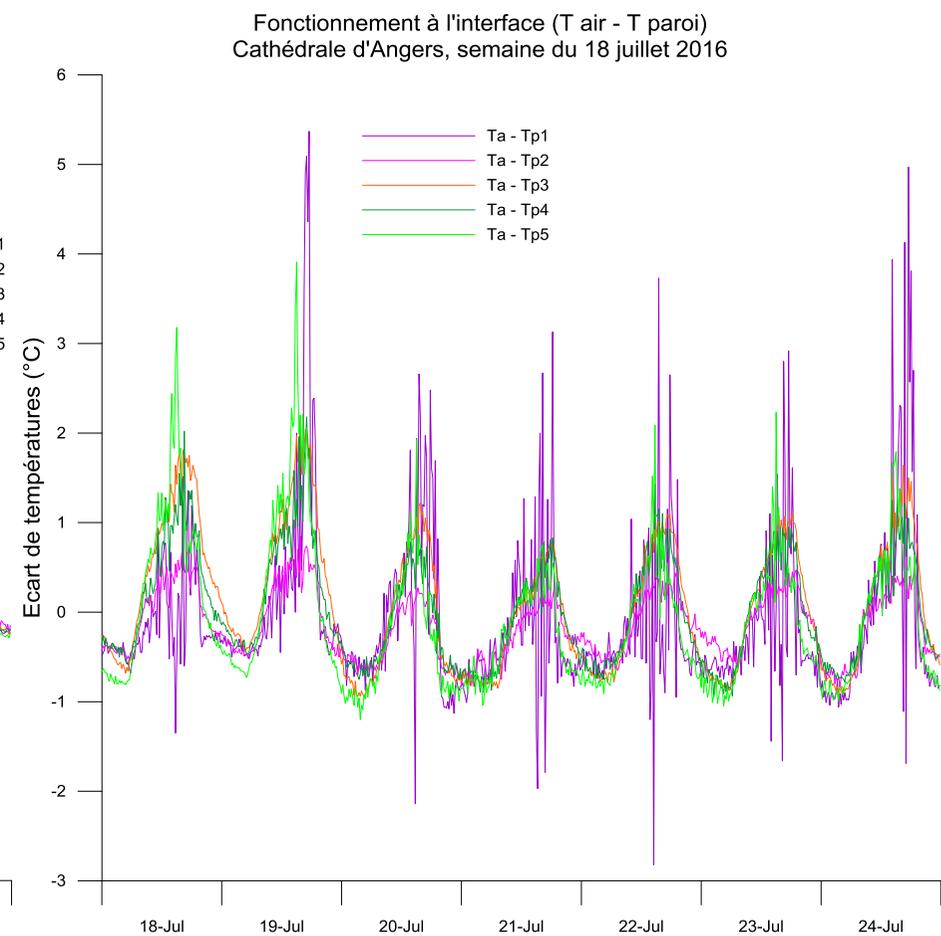


Figure n°16 : fonctionnement à l'interface écarts air paroi sur une semaine en été. Les amplitudes thermiques entre l'air et la paroi sont beaucoup plus importantes environ d'un ordre de grandeur qu'en hiver.

b. Profils verticaux aux extrêmes hiver/été

Les points de mesure dans la structure étant situés à des hauteurs différentes, il est possible d'extraire des données de profils de température en fonction de l'altitude par rapport au sol (figure n°17).

En hiver, la température de l'air est homogène en profil vertical dans toute la structure, autour de 2°C le 16 janvier 2016, et reste relativement stable durant la journée (variations d'environ 1°C), tandis que les températures extérieures (TH1) varient beaucoup plus au cours de cette même journée (autour de 7°C) manifestant ainsi l'effet protecteur de la structure.

En été, les amplitudes relevées sont bien plus importantes et le comportement des « couches d'air » dans la structure est très différent : un gradient vertical apparaît : la partie haute de la structure est nettement plus chaude que la partie basse en journée (un écart pouvant aller jusqu'à 7°C le 19 juillet) et cet écart disparaît durant la nuit. De plus, au cours de la journée, les températures varient beaucoup (de 23°C dans la nuit à 37°C en fin d'après-midi, au niveau de l'archivolte, soit un écart de 14°C). La protection par la structure pourrait sembler moins efficace en été mais les impacts thermiques sont de plus grande amplitude et sur les chroniques on constate que les pics thermiques identifiés sur la façade sont amortis dans la structure malgré l'effet de serre du toit translucide. L'effet protecteur de la structure est bien présent en été bien qu'il soit réduit dans les parties hautes de la structure.

Profils des températures de la journée du 16 janvier 2016
(altitudes empiriques) - Portique de la Cathédrale d'Angers

Profils des températures de la journée du 19 juillet 2016
(altitudes empiriques) - Portique de la Cathédrale d'Angers

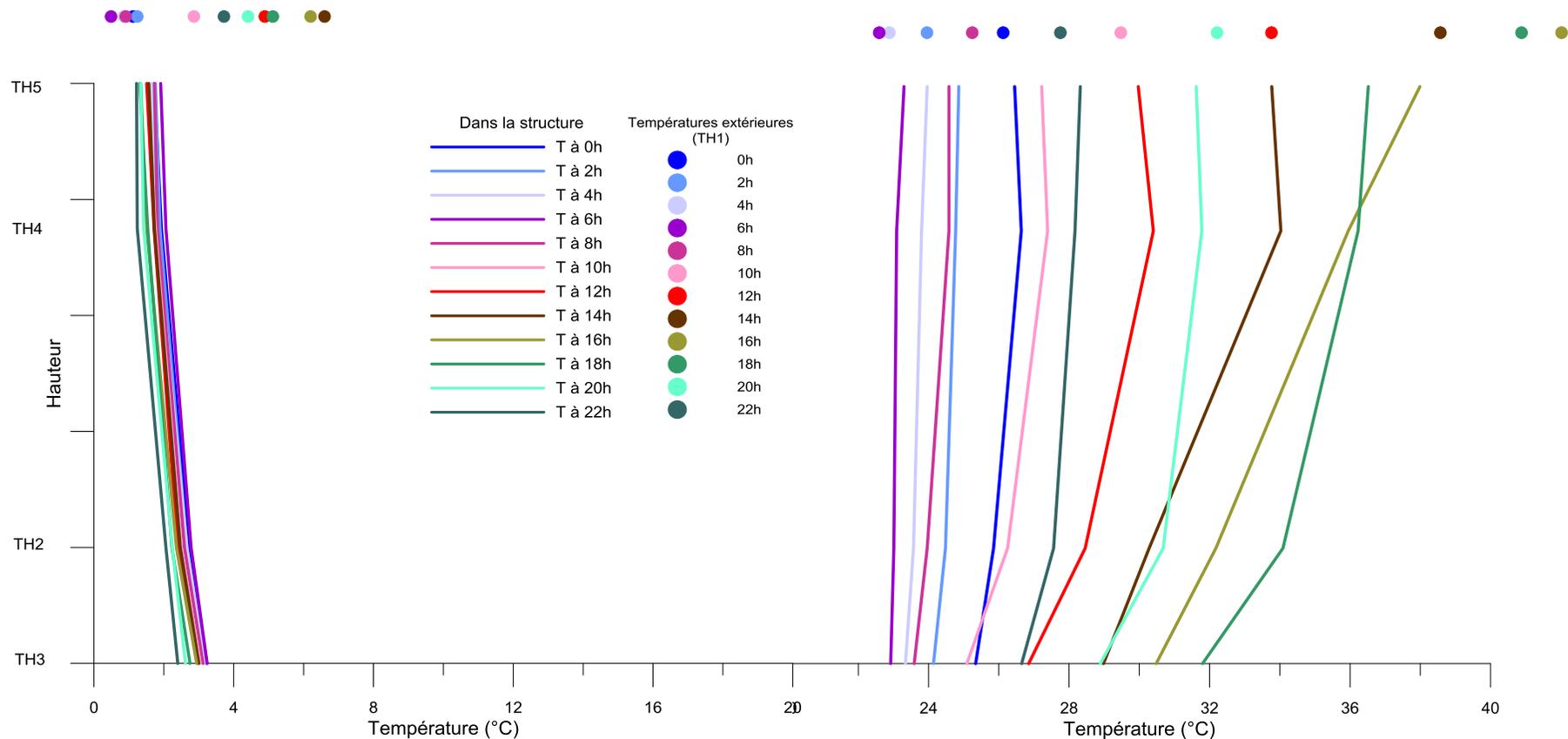


Figure n°17 : profils verticaux sur une journée froide d'hiver (à gauche) et une journée chaude d'été (à droite), pour un pas de deux heures. De bas en haut, se trouvent les points du piedroit droit (TH3), du pilier gauche (TH2), de la voussure (TH4), puis de l'archivolte (TH5). La température extérieure (TH1), séparée des autres par l'interface de la structure, est reportée ici en haut de profil avec un symbole différent. Les profils montrent la forte disparité entre les situations typiques d'hiver et d'été.

c. Effets dus à l'ensoleillement à l'échelle de la journée

L'analyse du microclimat sur l'ensemble de la chronique montre que la structure produit un effet d'amortissement des impacts de l'extérieur plus efficace en été qu'en hiver (cf. figures 10 a, b). L'objectif est d'identifier les détails de cet effet à l'échelle de temps de la journée.

Dans une journée d'hiver, la structure est peu ou pas éclairée. Les températures sont assez proches les unes des autres, et s'abaissent progressivement en cours de nuit (figure n°18) suivant un faible gradient, les fluctuations restent de faible amplitude, les interfaces air paroi sont proches de l'équilibre.

En été au contraire les températures qui sont relativement proches les unes des autres la nuit, se différencient fortement (écart intérieur/extérieur de la structure) dans la journée (figure n°19) avec l'apparition de forts gradients verticaux dans la structure du fait de l'éclairage solaire. Malgré cet effet, les interfaces air paroi sur le portail restent moins impactées à l'intérieur de la structure que sur la façade.

Remarquons aussi qu'en été, les températures intérieures du haut de la structure (voussure, archivolte) fluctuent bien plus fortement que celles de la partie basse. Le capteur de confinement extérieur réagit beaucoup plus fortement que les deux autres capteurs extérieurs aux effets d'ensoleillement. Les capteurs de température en zone sommitale de la structure (voussure, archivolte) sont très impactés dans la journée. Ils dépassent certains jours la température extérieure de la station climatologique. Il s'agit d'un échauffement dû à la toiture transparente de la structure.

A l'échelle d'une seule journée d'été (figure n°20), le lien entre le rayonnement solaire et les effets thermiques est très net : les capteurs en partie haute de la structure sont plus fortement influencés par l'ensoleillement que les capteurs extérieurs **indiquant un effet serre du toit translucide**. Les capteurs de la partie inférieure montrent au contraire **un amortissement des variations extérieures caractérisant l'effet protecteur de la structure**.

Températures relevées par les différents capteurs,
semaine du 11 janvier 2016, cathédrale d'Angers

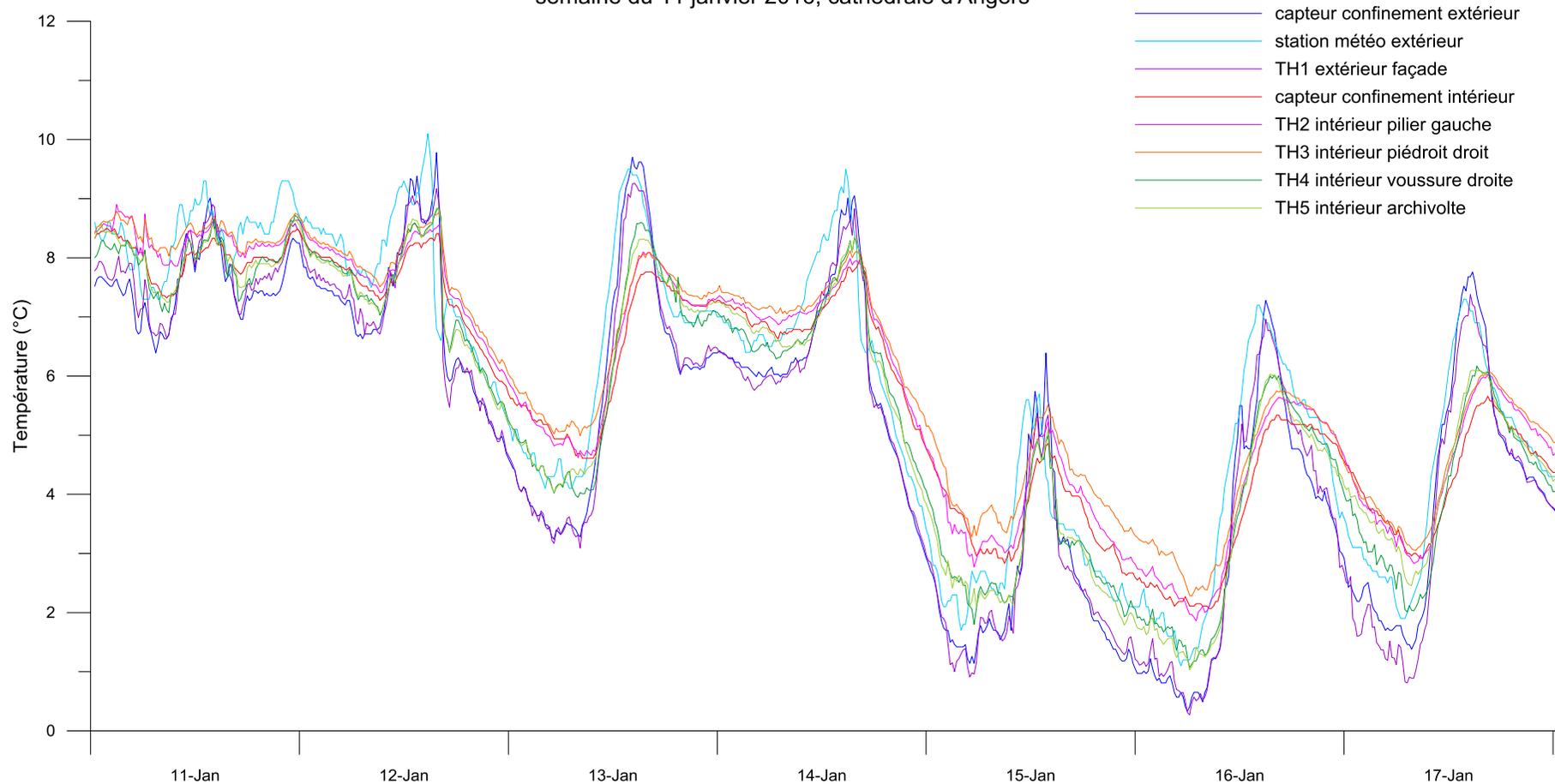


Figure n°18 : relevés des températures sur une semaine en hiver. Trois capteurs sont à l'extérieur de la structure, et cinq à l'intérieur. Les chroniques montrent des évolutions avec l'alternance d'effets journaliers qui unifient les températures intérieures et extérieures dans l'après-midi, au contraire, lors des nuits froides, les températures se différencient mais les amplitudes restent faibles.

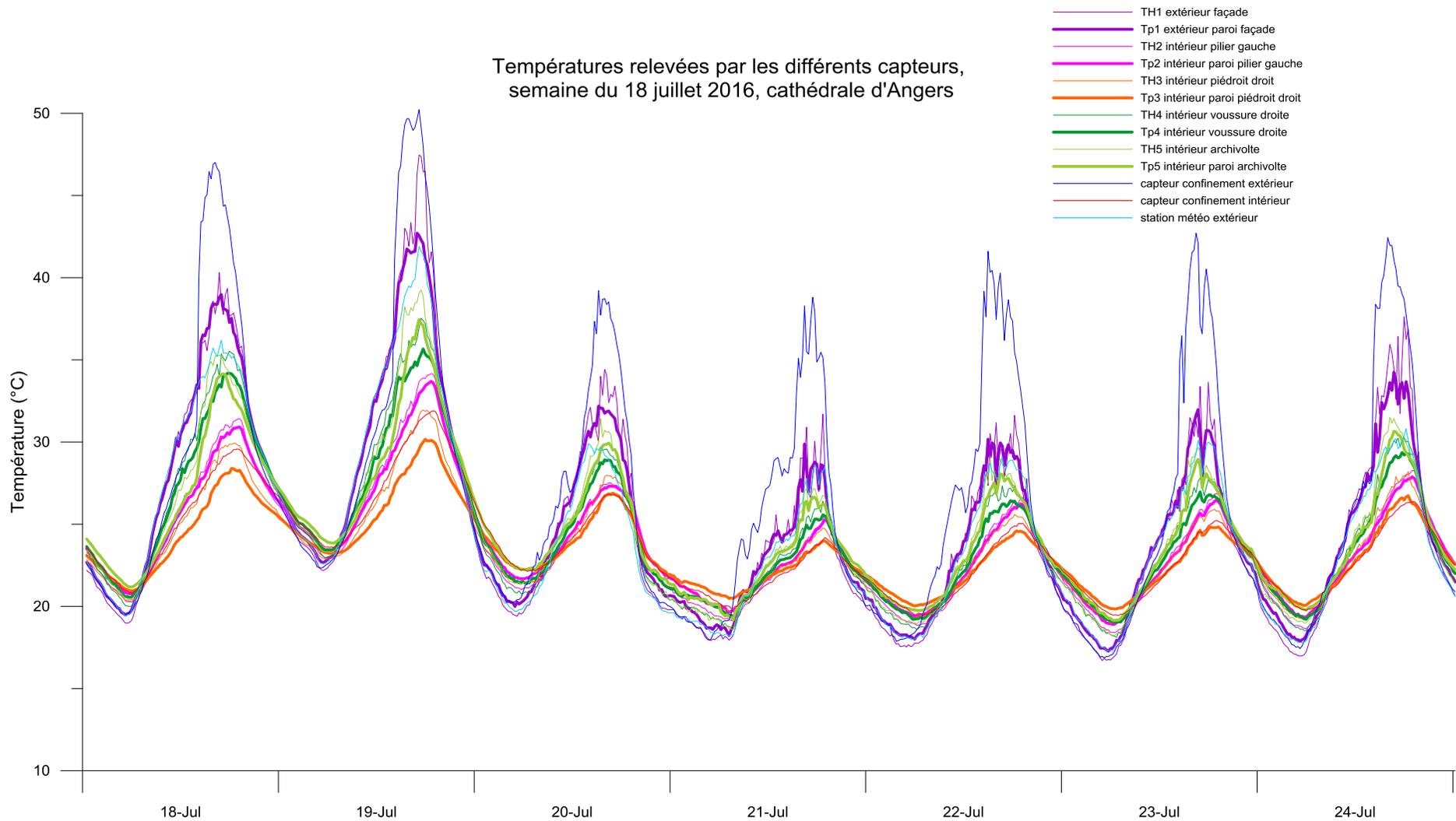


Figure n° 19 : relevé de températures sur une semaine en été. Les températures de l'air sont en trait fin, celles des « parois » sont en gras. Les effets thermiques journaliers sont de forte amplitude en façade et dans les parties hautes de la structure (effet de serre du toit translucide). La nuit les températures ont tendance à s'égaliser. Les amplitudes thermiques journalières en saison chaude sont nettement plus fortes que l'hiver.

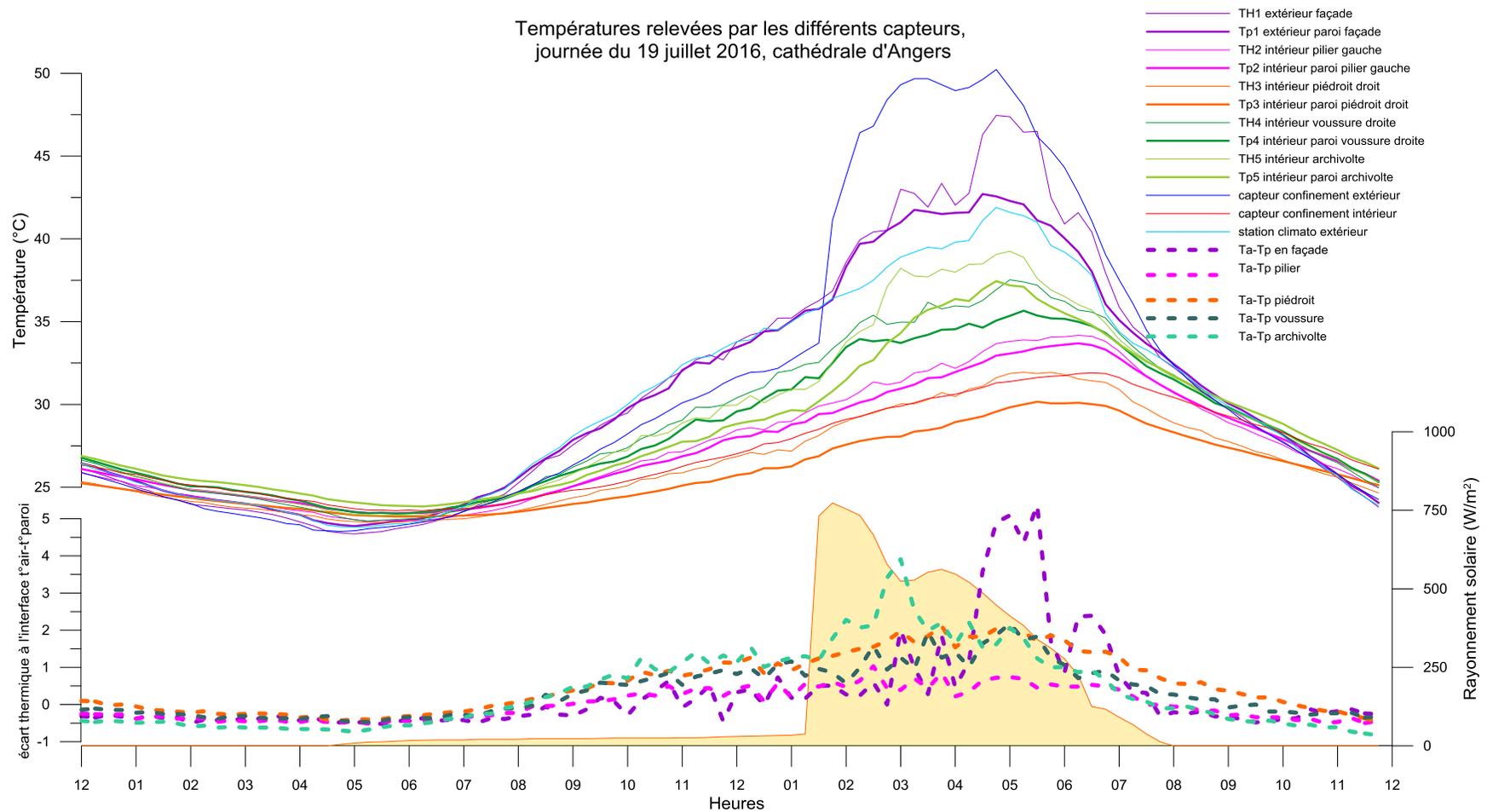


Figure n°20 : détail de la figure n°19 : températures des différents capteurs de température et rayonnement solaire pour la journée du 19 juillet 2016. Le capteur de confinement extérieur et celui de l'archivolte enregistrent des impacts thermiques plus forts que les capteurs de façade et de la station climatologique caractérisant un effet de serre induit par la toiture translucide. De même, les capteurs directement exposés (extérieur façade et confinement extérieur) réagissent fortement. Les températures de la partie inférieure sont en revanche nettement amorties indiquant un effet de protection de la structure. Les interfaces thermiques air/paroi les plus impactées sont celles de la façade et de l'archivolte.

d. Effets dus au vent

La structure de protection présente des ouvertures et des interstices dans le bardage bois par lesquels les coups de vent extérieurs sont ressentis. Une ventilation naturelle active reste présente en permanence à l'intérieur de la structure. L'analyse du microclimat à partir de l'ensemble de la chronique montrait une influence peu significative de la vitesse du vent (mesurée à la station climatique) sur les écarts thermiques air/parois.

Sur le moyen terme (semaine) le vent ne semble pas avoir d'effet significatif sur les températures (figure n°21). Cependant l'observation des détails journaliers des chroniques montre que les journées d'hiver sans vent sont propices à l'installation d'écarts thermiques caractérisés par un contraste entre les parties internes et externes du portail et à un déphasage des impacts thermiques caractéristique de l'effet protecteur de la structure. En période venteuse au contraire, les températures sont homogènes sur tous les capteurs extérieurs et intérieurs et toutes les variations sont synchrones. Le brassage et la circulation libre de l'air dans la structure sont activés par le vent et effacent la faible inertie et la protection thermique de la structure.

Les effets thermiques du vent sont très limités en amplitude (figure n°22). Ce sont bien les effets de l'ensoleillement qui produisent les effets thermiques les plus importants à l'intérieur de la structure.

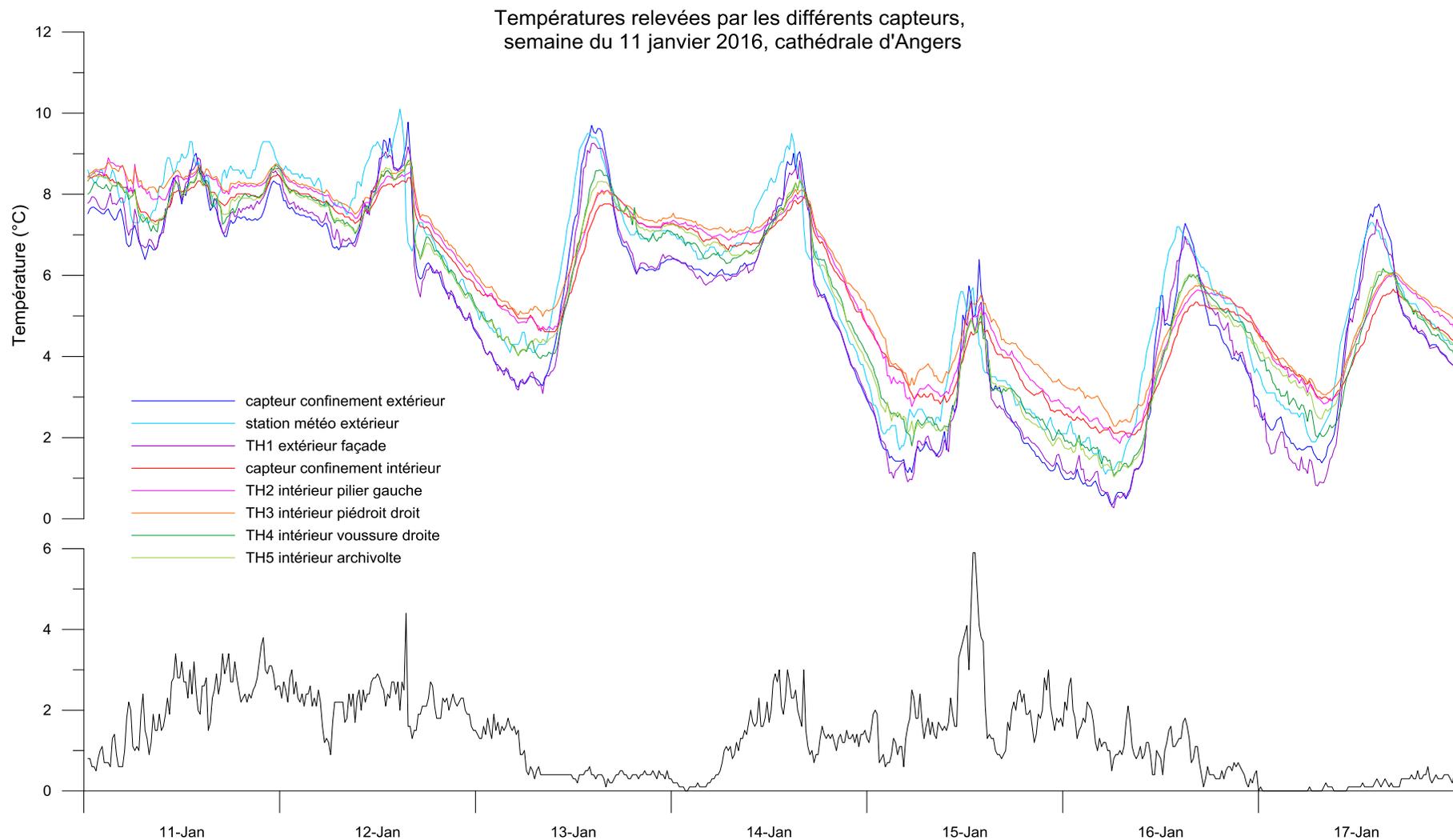


Figure n°21 : températures sur une semaine d'hiver (données de la figure n°18) ainsi que la vitesse du vent sur cette période. Les coups de vent homogénéisent les températures alors que périodes calmes sont propices à l'apparition de gradients thermiques.

Températures de l'air, vitesse du vent et rayonnement solaire

Cathédrale d'Angers, du 29 avril au 4 mai 2016

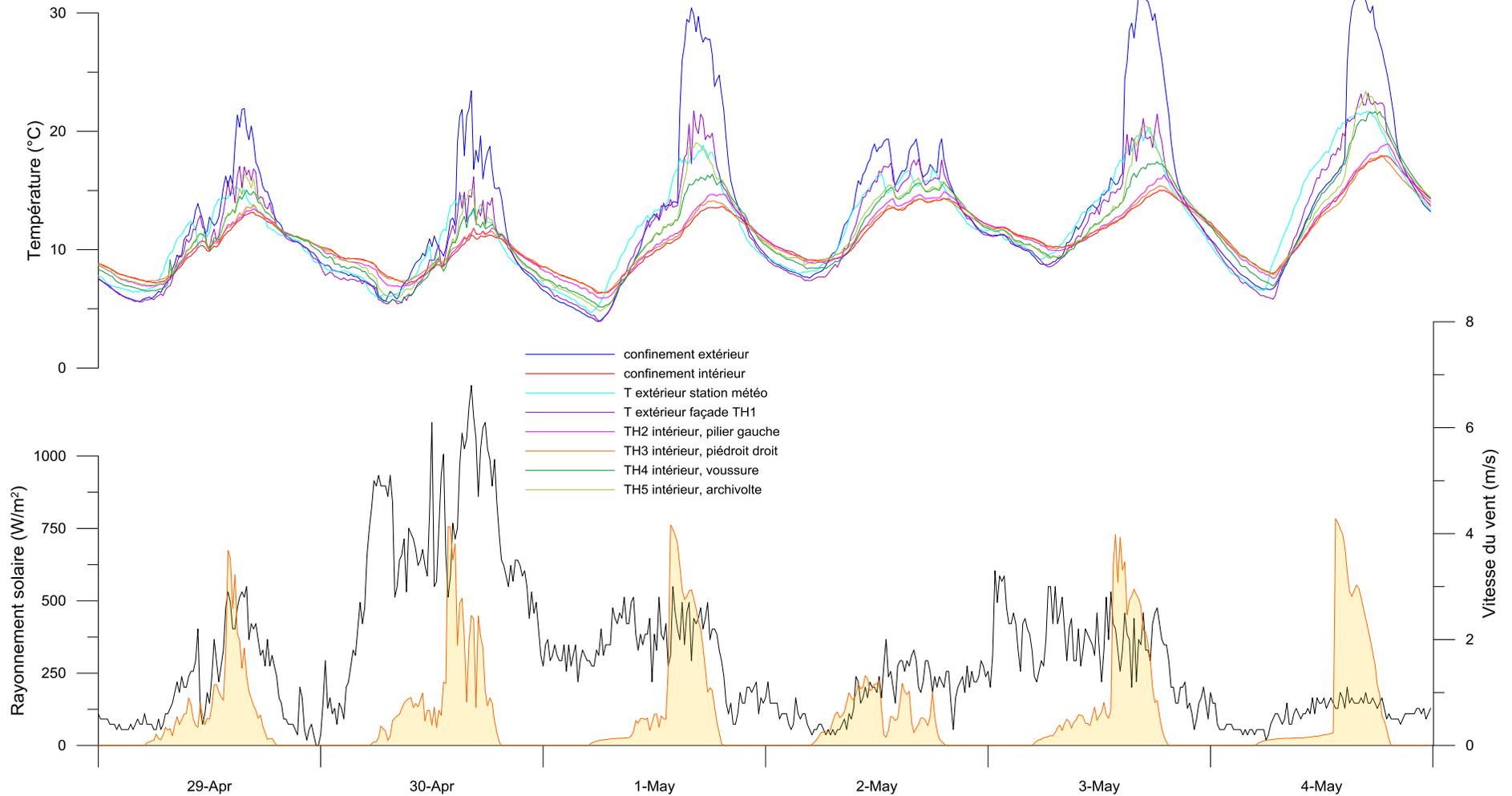


Figure n°22 : températures, vitesse du vent, et ensoleillement sur une semaine de printemps. Les effets thermiques de l'ensoleillement impactent plus fortement les températures que les effets du vent.

e. Effets dus à la pluie et l'humidité

Ces effets sont analysés sur le court terme à différentes périodes caractéristiques.

Lors d'un épisode pluvieux ponctuel du 20 novembre 2016 (figure n°23), toutes les températures sont nettement impactées. Les températures extérieures (capteur de la façade, station météo, capteur de confinement extérieur) chutent drastiquement, tandis qu'un gradient thermique s'établit à l'intérieur de la structure de protection : les capteurs proches du toit de la structure sont plus fortement impactés par la baisse que ceux des parties basses et internes (piédroit et pilier). Bien que la pluie ait un effet net sur les températures, elle n'y a pas d'impact direct sur le portail puisque la structure le protège efficacement des précipitations.

Les évènements pluvieux sont déclencheurs de changements brutaux de la régulation thermohydrrique aux interfaces air parois. Toutefois, la protection de la structure et l'inertie des parties internes du portail amortissent les impacts et aucun phénomène vulnérant n'apparaît.

Rappelons l'existence d'un effet protecteur de l'édifice sur les quantités d'eau récoltées sur la structure bardée : 497,2 mm/an par rapport aux 680,7 mm/an mesurés à la station météorologique d'Angers-Beaucouzé sur la même période.

En ce qui concerne l'humidité (figure n°24), il n'est pas étonnant de constater qu'elle soit elle aussi influencée par la pluie, sa valeur augmentant après l'épisode pluvieux du 11 mai, par exemple, mais d'autres paramètres la régissent également, comme l'ensoleillement qui la fait chuter ; l'effet du vent (le 12 mai) n'est pas clairement établi.

Pendant la durée de l'étude, l'ensemble du portail présentait une situation sanitaire satisfaisante vis-à-vis de l'humidité (pluie, humidité tellurique ou de condensation). Les travaux d'étanchéité et la protection physique induite par la structure bardée semblent avoir eu l'effet attendu .

Journée du 20 novembre 2016, cathédrale d'Angers

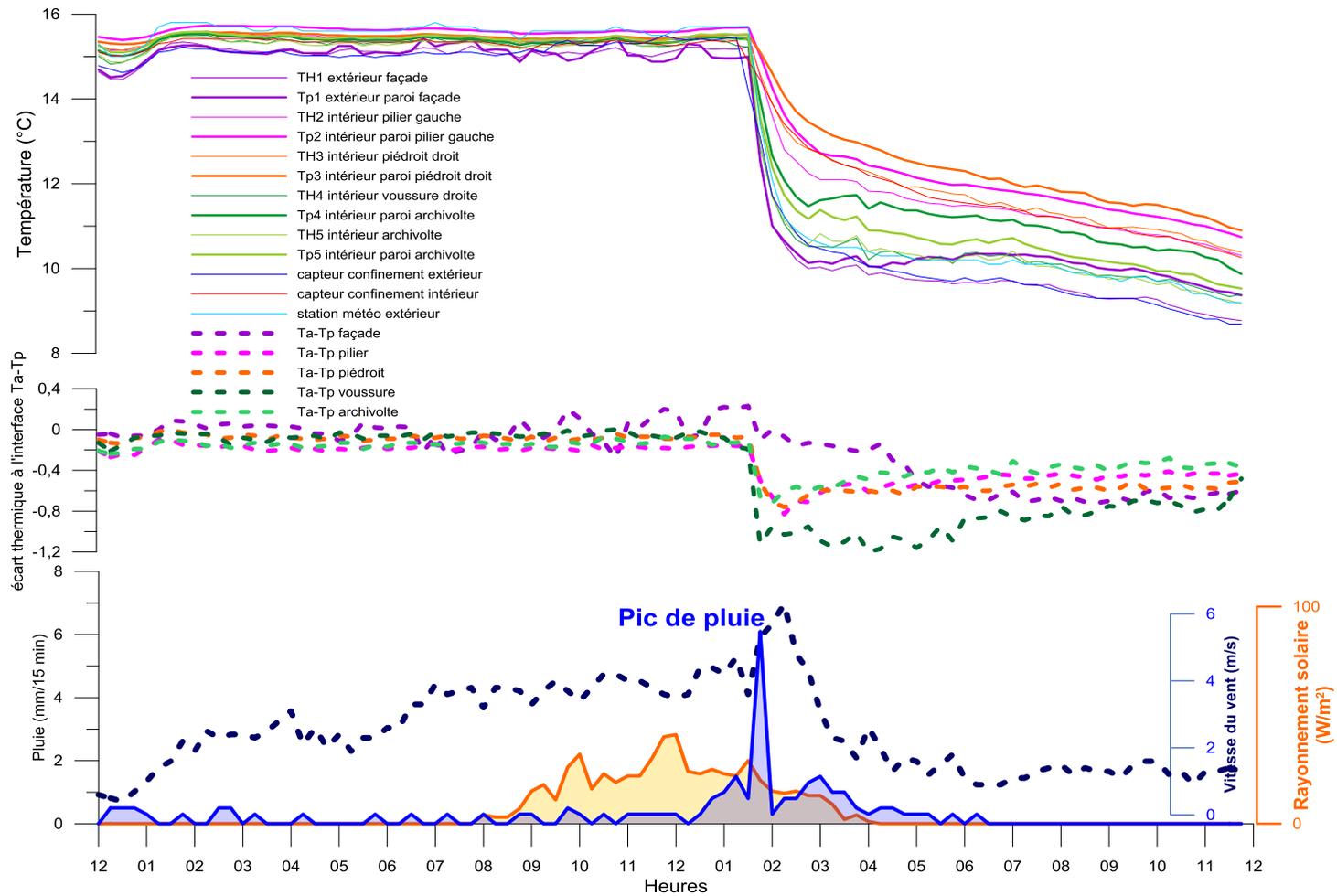


Figure n°23 : effet de la pluie sur les températures, sur une journée d'hiver. Températures des différents capteurs, vitesse du vent, pluie et rayonnement solaire (station météo).

**Humidité (capteurs Rotronic H1, H3, H5)
Cathédrale d'Angers, 11 et 12 mai 2016**

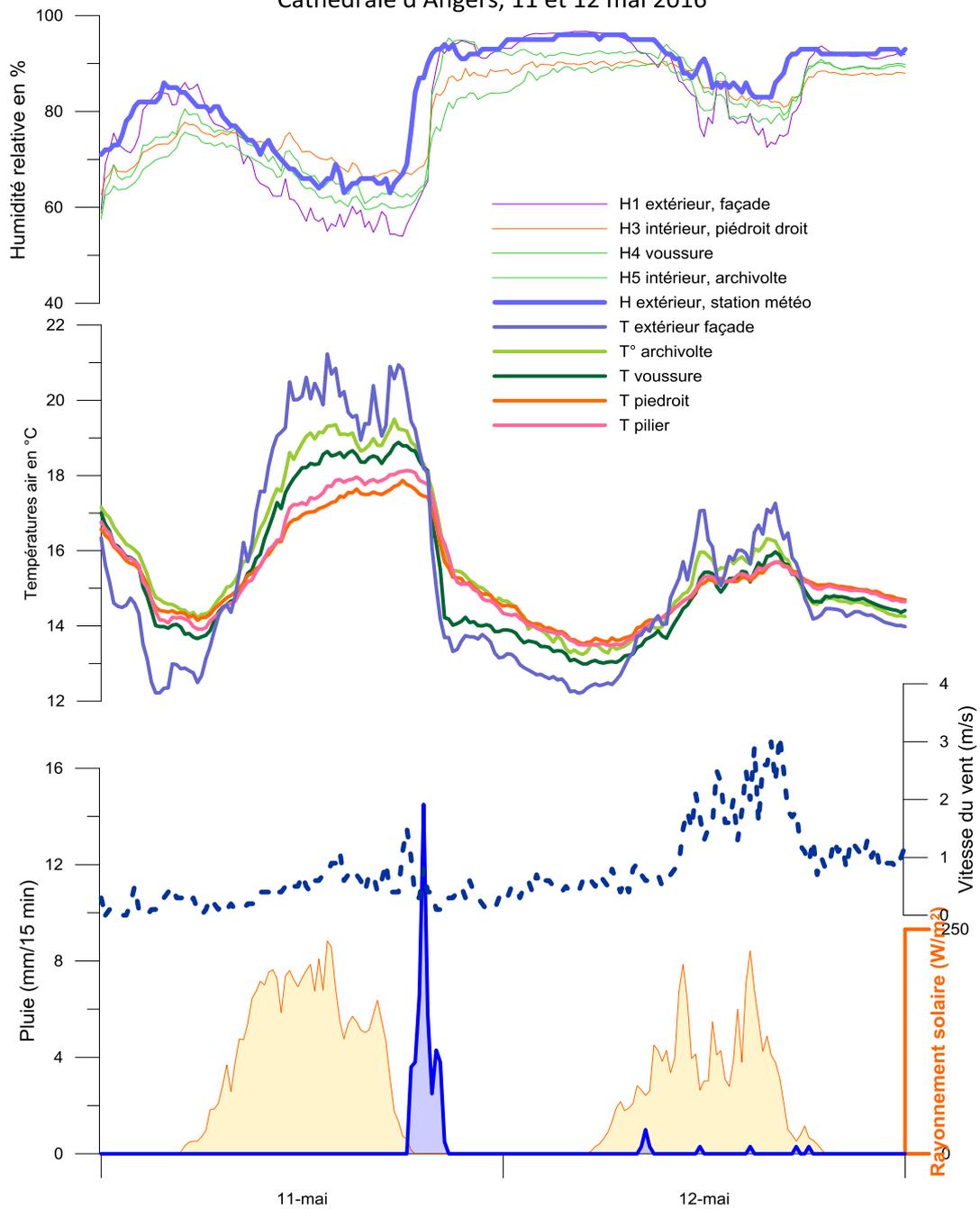


Figure n°24 : humidité, vitesse du vent, pluie et rayonnement solaire autour d'un épisode de pluie de printemps le 11 mai 2016. Les capteurs inférieurs montrent un amortissement un peu meilleur en température et en humidité.

f. Effets dus au froid.

Lors de la première année de mesure, l'hiver particulièrement clément ne pouvait pas être considéré comme représentatif d'une saison froide. La prolongation du suivi a permis d'acquérir l'hiver 2016-2017 plus rigoureux.

Les journées du 21-22 janvier (figure 25) sont parmi les plus froides. Les enregistrements montrent la réaction des différentes stations en température et humidité. Elles suivent au plus près les effets de l'air ambiant avec une réduction de l'amplitude de 1 à 2°C au maximum et un léger déphasage (2h) dans les secteurs les plus protégés. Les conditions de condensation potentielle ne sont jamais atteintes.

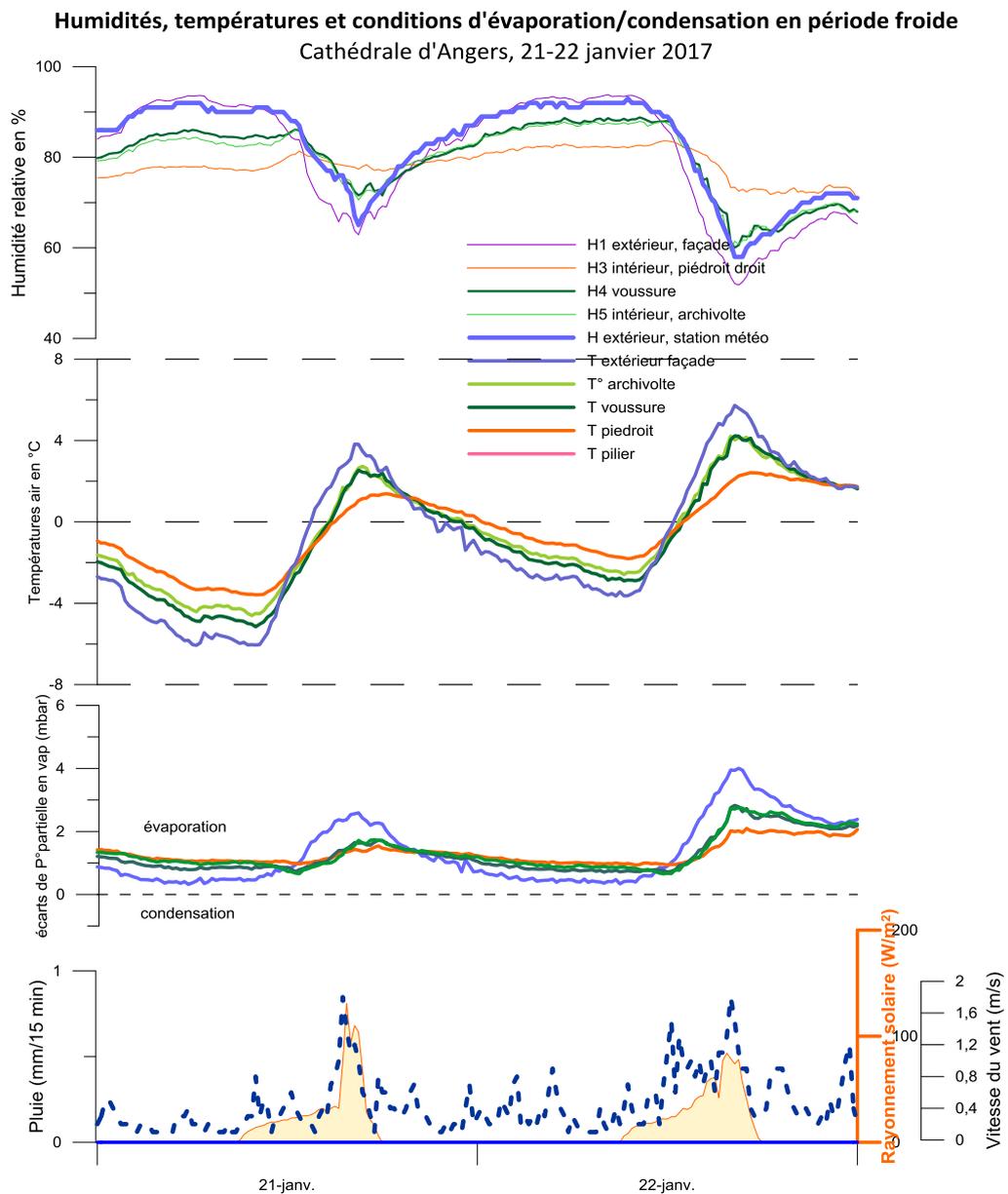


Figure n°25 : humidité, vitesse du vent, pluie et rayonnement solaire autour des journées les plus froides de l'hiver 2016-2017. Le secteur inférieur (piédroit) montre un amortissement significatif des effets journaliers.

g. Analyse du confinement par les mesures en CO₂.

Les capteurs de confinement DK mesurent les concentrations en CO₂ à l'intérieur et à l'extérieur de la structure pour rechercher un éventuel effet de confinement (figure n°26-27).

Les deux courbes présentent les mêmes tendances avec des concentrations en CO₂ globalement identiques à l'intérieur et à l'extérieur de la structure bardée bois. Cependant, à l'exception de l'hiver, le capteur extérieur montre des taux plus élevés que le capteur situé à l'intérieur de la structure. Cet écart (atteignant au maximum 100 ppm), pourrait être analysé comme un meilleur enregistrement des pics CO₂ par le capteur extérieur : à l'intérieur, les pics sont faiblement amortis et déphasés de 1 h. Il est cependant difficile de trancher sur la signature d'un réel confinement car les deux capteurs conservent les mêmes fluctuations et les mêmes relations avec les paramètres externes.

L'analyse des relations entre la température et les concentrations en CO₂ dans l'air (extérieur et intérieur) montre une corrélation inverse très nette sur le court et moyen terme (figure n°26). L'analyse en ondelettes (figure n°28) montre sur une année que la périodicité diurne du CO₂ est très claire sauf en hiver ou elle diminue d'intensité jusqu'à quasiment disparaître. Cet effet correspond probablement à l'interruption de l'activité de la végétation pendant la période de novembre à février et pas à une modification du fonctionnement local.

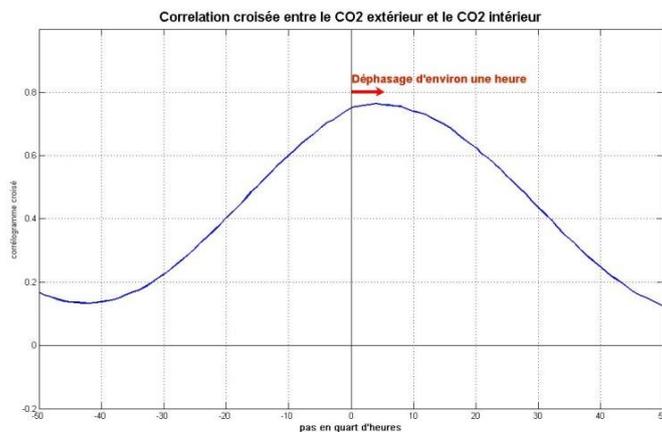
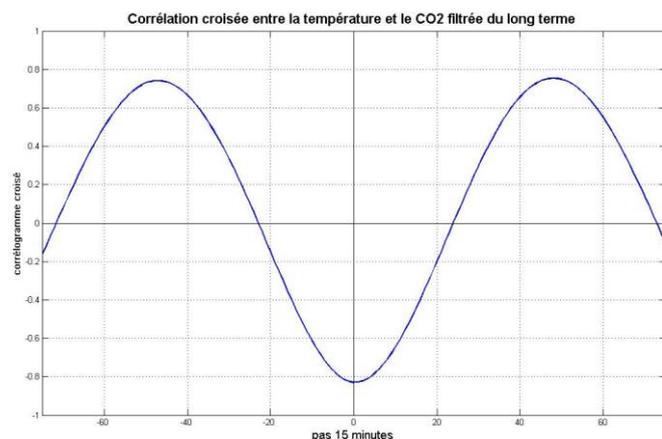


Figure n°26 : corrélations croisées entre le CO₂ extérieur et le CO₂ intérieur montrant un léger amortissement et un déphasage d'une heure.



Corrélation entre la température et le CO₂, filtrée du long terme. La corrélation sur le court et moyen terme est très nette.

CO₂ mesuré par les capteurs de confinement DK (valeurs brutes et moyennes mobiles à 7 jours)

Cathédrale d'Angers, du 24 septembre 2015 au 21 septembre 2016

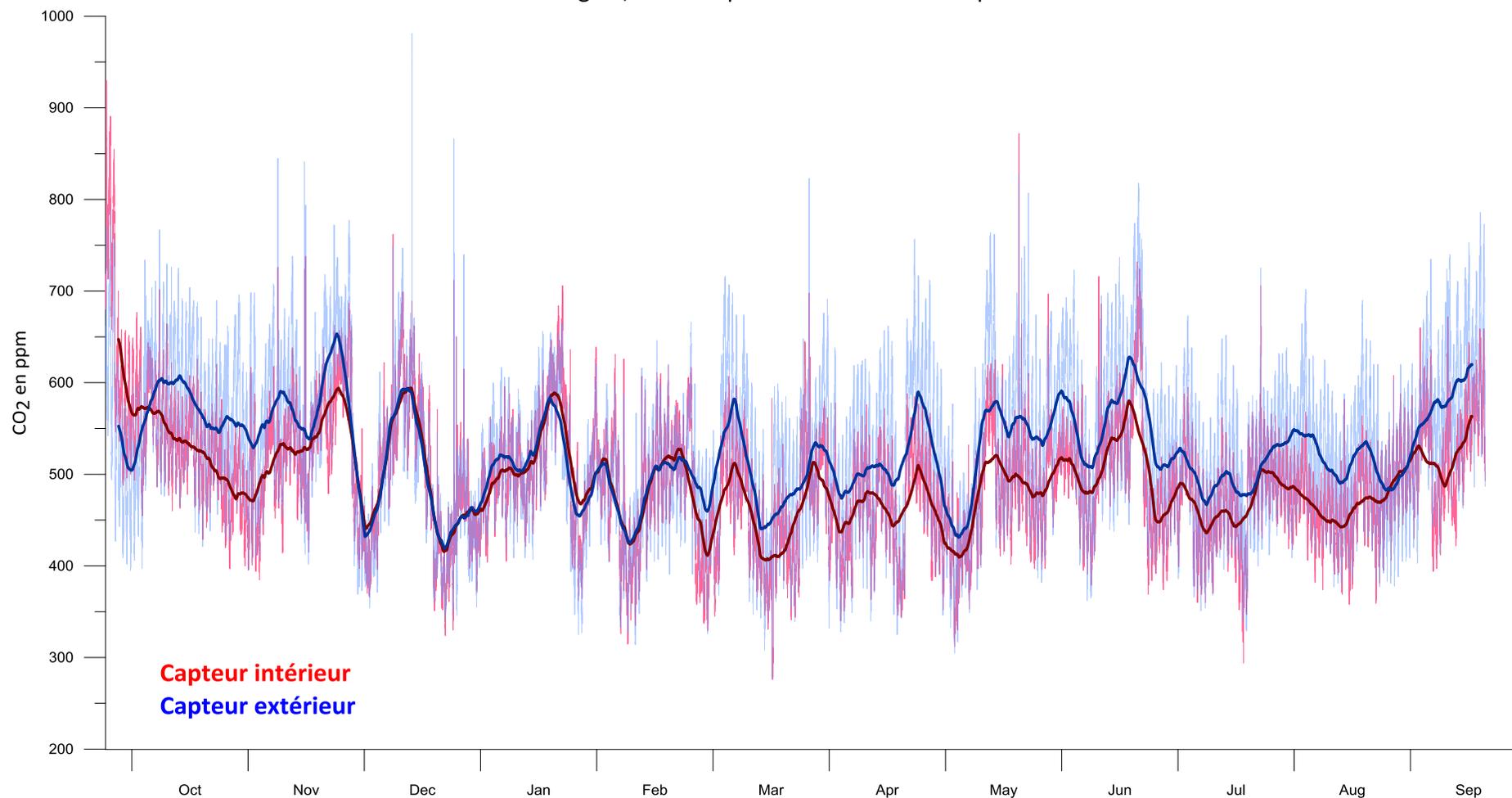


Figure n°27 : chroniques du CO₂ des capteurs de confinement. En rouge les données du capteur situé à l'intérieur de la structure, en bleu celles du capteur situé à l'extérieur de la structure de protection.

Analyse en ondelettes continues du CO2

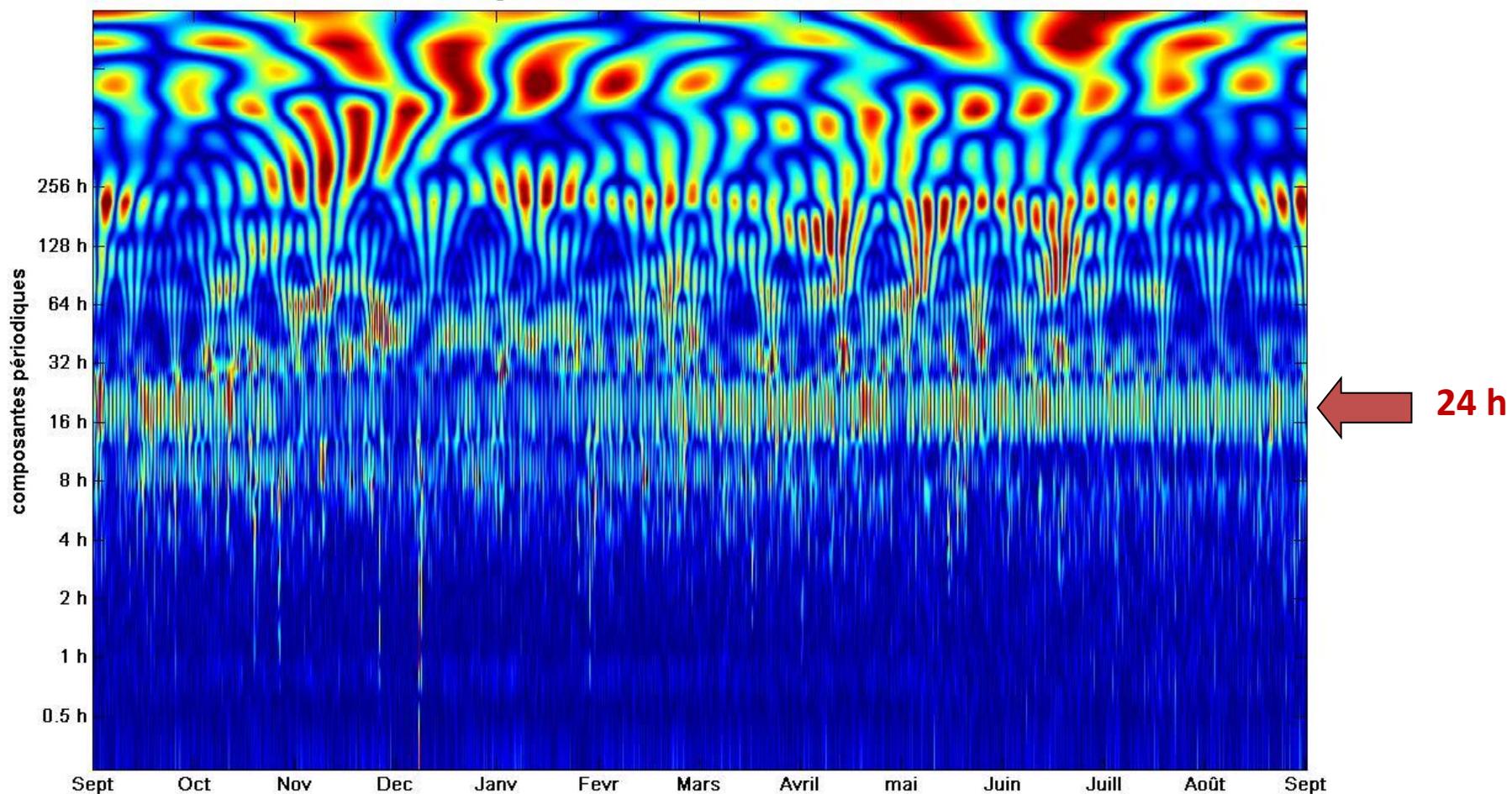


Figure n°28 : analyse en ondelettes sur une année. La périodicité diurne du CO2 est très claire sauf en hiver ou elle disparaît quasiment.

h. Effets de condensations

Le calcul de l'écart de pression partielle en vapeur (en mbar) entre l'air ambiant et l'air au contact de la paroi (figures n°29, n°30 a, b, c, d) permet d'identifier le sens et l'ampleur des échanges à l'interface air/paroi.

Les valeurs de l'écart de pression partielle, pour l'essentiel supérieures à zéro, indiquent que la pression de vapeur dans l'air ambiant est plus faible que la pression de vapeur saturante au voisinage de la paroi (figures n°30 a, b, c, d). Les conditions d'échanges entre la paroi et l'air ont été maintenues en évaporation pendant toute la période de mesure avec quelques exceptions. Sur le capteur extérieur en façade, les conditions propices à la condensation n'ont été atteintes que pendant 153 quarts d'heure c'est-à-dire moins de deux journées en temps cumulé sur 650 jours avec un potentiel de condensation très faible. Dans les parties basses de la structure (piédroit et pilier) les périodes critiques sont très courtes : seulement 15 quarts d'heure au pilier et 46 quart d'heures au piédroit sur toute la période. La voussure se comporte de manière quasiment identique à la paroi (181 quarts d'heure hors période d'évaporation). Seule l'archivolte est exposée à des durées significatives (506 quarts d'heure soit un peu plus de 5 jours) où les conditions d'évaporation ne sont pas présentes.

Cependant les périodes où les conditions de condensation sont possibles correspondent en général à des épisodes de froid humide avec formation de brouillard. Par exemple le 22 janvier 2016 où les conditions de condensation sont quasiment générales fut une journée sans pluie, avec un très faible rayonnement solaire et un taux d'humidité relative très élevé (valeurs atteignant les 98% HR pendant 15 heures ; brumes et brouillards sont indiqués par la station météorologique d'Angers-Beaucouzé) (figure n°32). Ainsi, les conditions propices à la condensation apparaissent dans ces cas déterminés par le climat extérieur et non par un effet induit par la structure. Il s'agit d'une situation proche de l'équilibre excluant la possibilité d'une condensation significative en paroi.

La journée du 8 janvier (figure 31) est celle où les conditions propices à la condensation ont persisté le plus longtemps. Les températures initiales sont basses puis en augmentation avec l'installation en mi-journée d'une humidité ambiante proche de la saturation et ensuite accompagnée de bruines. Le vent est faible puis nul, le rayonnement solaire réduit est caractéristique d'un ciel très couvert. L'effet de paroi froide se manifeste, particulièrement dans les parties les plus exposées de l'édifice (façade, voussure, archivolte) mais est absent des secteurs les plus protégés de la structure (piédroit). Les condensations potentielles restent très limitées car les faibles gradients de vapeur ne permettent pas un transfert significatif d'eau.

La structure actuelle paraît limiter les risques de condensation sur l'ouvrage. En effet les situations de possible condensation (limitée) ont été exceptionnelles à l'intérieur de la structure et déterminées plutôt par une situation climatique de condensation de brouillard dans l'air extérieur. Seule la zone de l'archivolte présente un potentiel de condensation significativement plus élevé que la façade. Le caractère avancé du point de mesure par rapport au plan principal de l'édifice peut expliquer cette sensibilité due à une plus faible inertie thermique.

Pressions partielles et leurs moyennes mobiles, calculées pour trois triplets (façade extérieure, pilier gauche, voussure)
du 24 septembre 2015 au 21 septembre 2016, cathédrale d'Angers

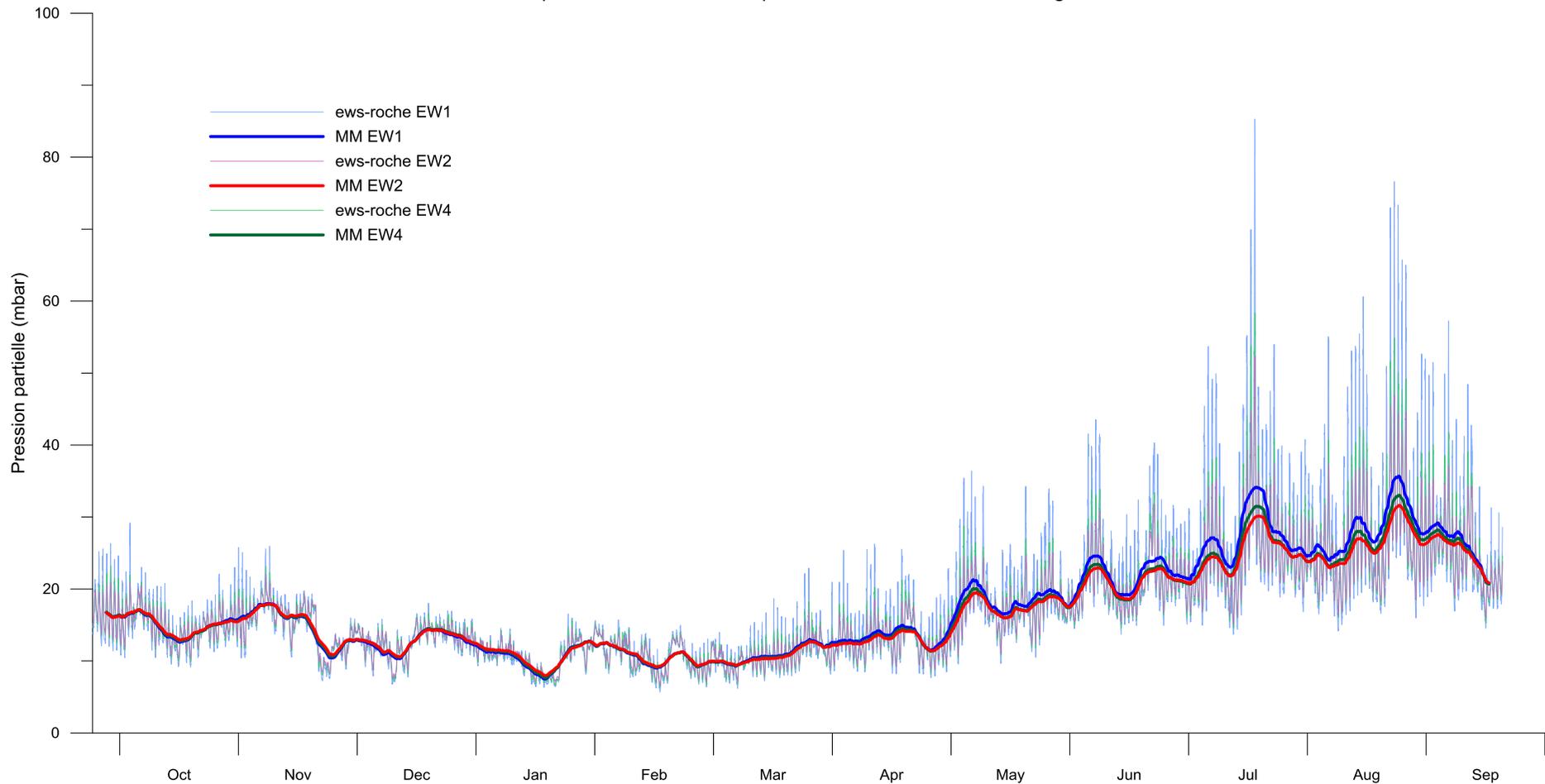


Figure n°29 : pressions partielles saturantes proches de la paroi et leurs moyennes mobiles (sur 1 semaine), pour les points de mesures 1 (façade EW1 en bleu), 2 (pilier gauche EW2 en rouge), et 4 (voussure EW4 en vert). Les pressions partielles sont équivalentes dans les différents points en hiver et se différencient en période d'été avec une amplification en façade par rapport à l'intérieur de la structure

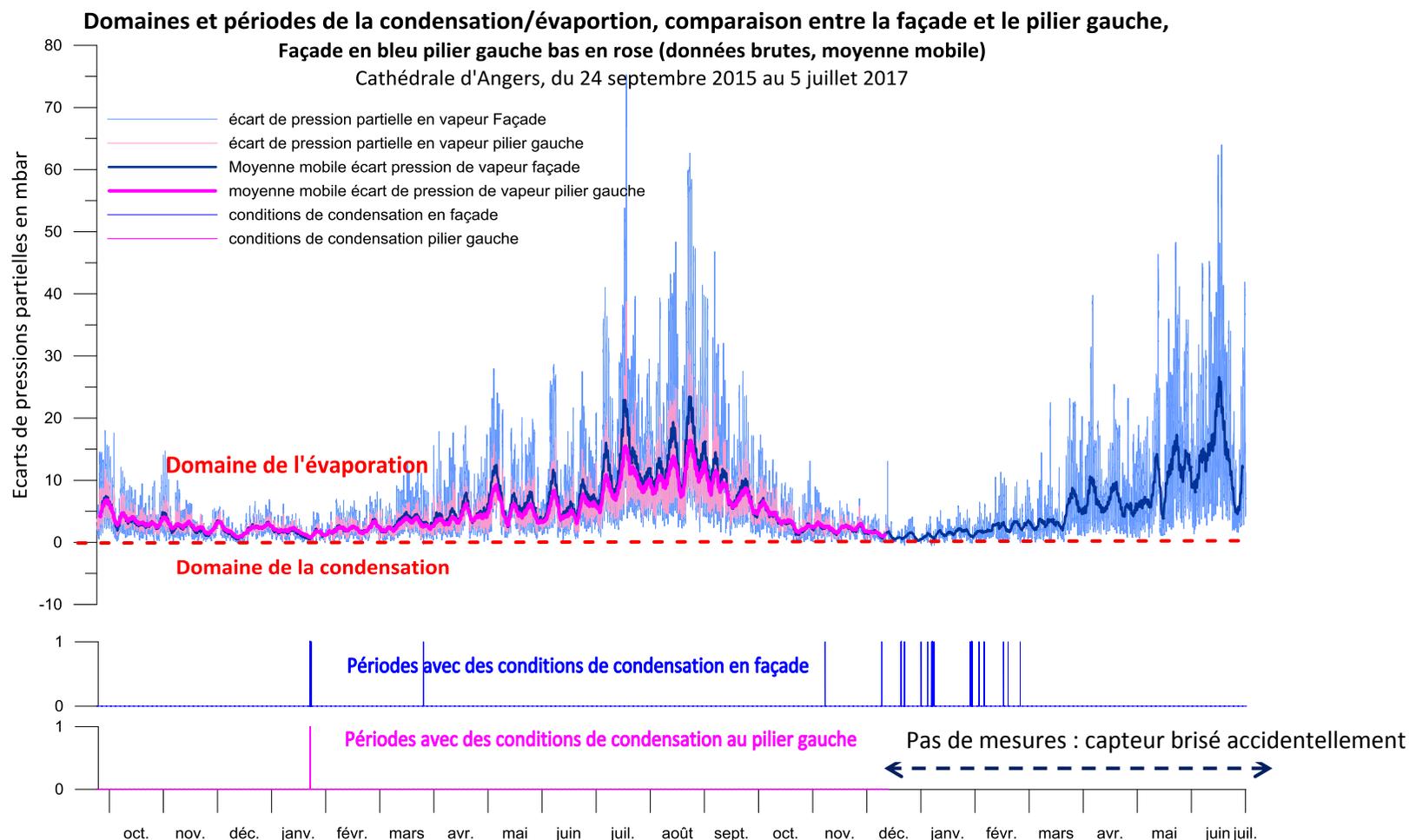


Figure n°30a : calcul des écarts de pressions partielles en vapeur au niveau de la paroi. Comparaison de la station du pilier gauche (triplet n°2) et en façade (triplet n°1). Au pilier gauche, le potentiel de transfert de vapeur d'eau depuis la paroi vers l'air est permanent à l'exception d'une période de 15 quarts d'heure où l'équilibre est atteint ou légèrement dépassé le 22 janvier 2016. En façade plusieurs autres périodes (au total 153 quarts d'heure) essentiellement l'hiver 2016-2017 montrent des situations d'équilibre ou pouvant mener à des condensations. Toutefois ces événements sont rares et l'amplitude très réduite des valeurs de l'écart de pression partielle indique un potentiel de condensation faible.

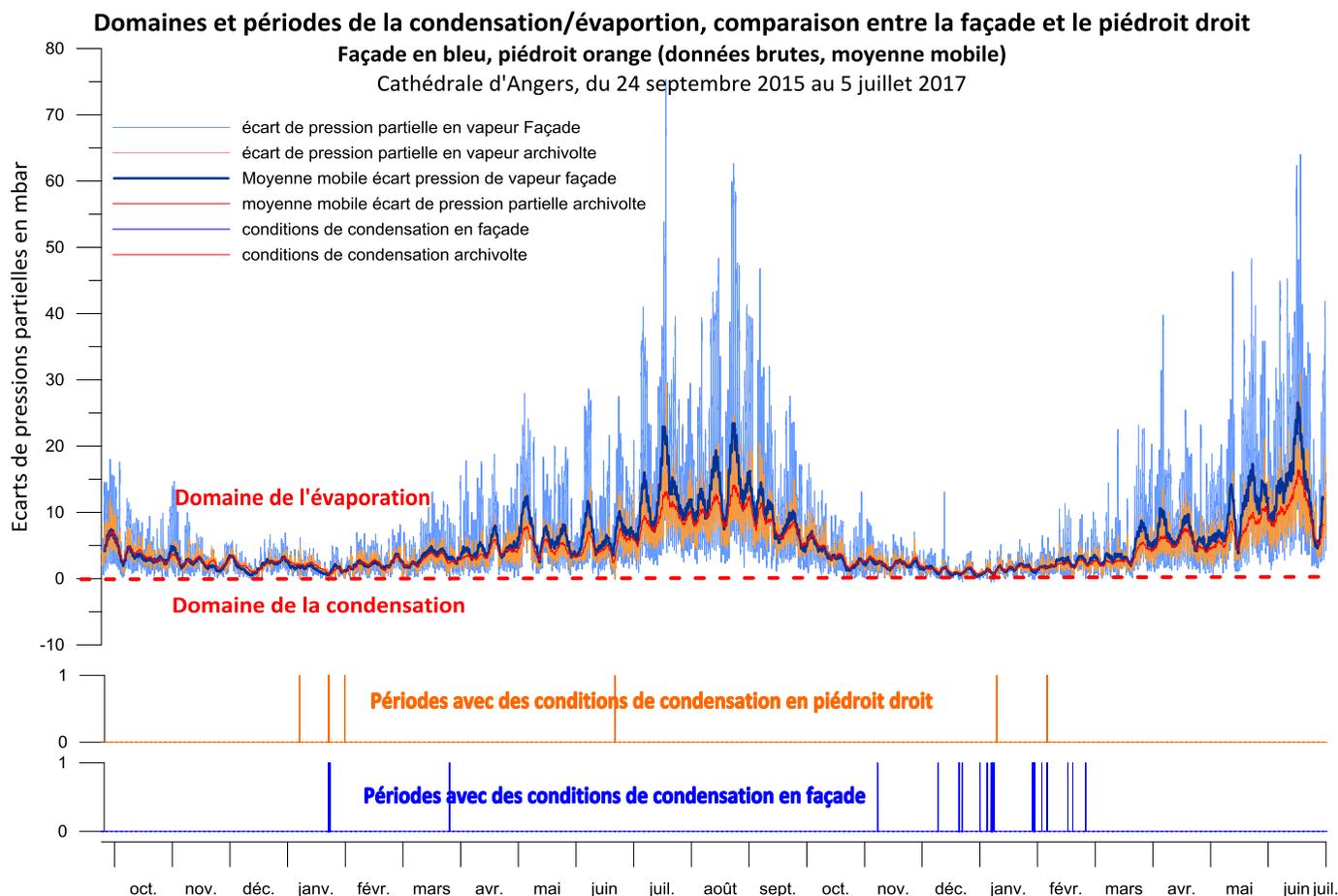


Figure n°30b : calcul des écarts de pressions partielles en vapeur au niveau de la paroi. Comparaison de la station du piédroit droit (triplet n°3) et en façade (triplet n°1). Sur le piédroit, le potentiel de transfert de vapeur d'eau depuis la paroi vers l'air est permanent à l'exception d'une période de 46 quart d'heures où l'équilibre est atteint ou légèrement dépassé dont 40 quart d'heures le 22 janvier 2016. En façade plusieurs autres périodes (au total 153 quart d'heures) essentiellement l'hiver 2016-2017 montrent des situations d'équilibre ou pouvant mener à des condensations. Toutefois ces événements sont rares et l'amplitude très réduite des valeurs de l'écart de pression partielle indique un potentiel de condensation faible.

Rapp

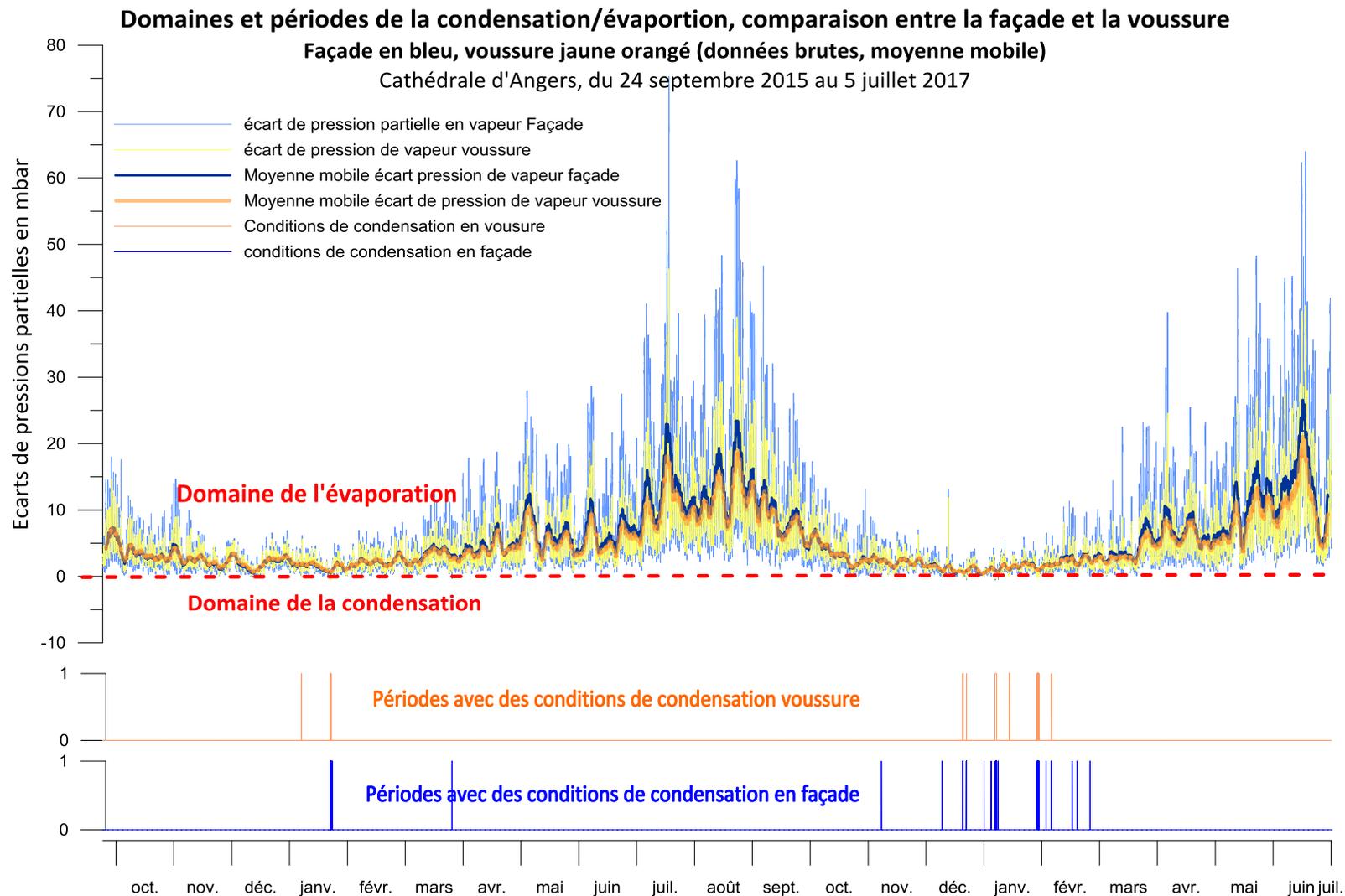


Figure n°30c : calcul des écarts de pressions partielles en vapeur au niveau de la paroi. Comparaison de la station de la voussure (triplet n°4) et en façade (triplet n°1). Sur la voussure, le potentiel de transfert de vapeur d'eau depuis la paroi vers l'air est permanent à l'exception d'une période de 181 quart d'heures où l'équilibre est atteint ou dépassé. Les périodes de condensation potentielles sont légèrement plus nombreuses longues qu'en façade, ce sont essentiellement les mêmes journées d'hiver qui sont concernées.

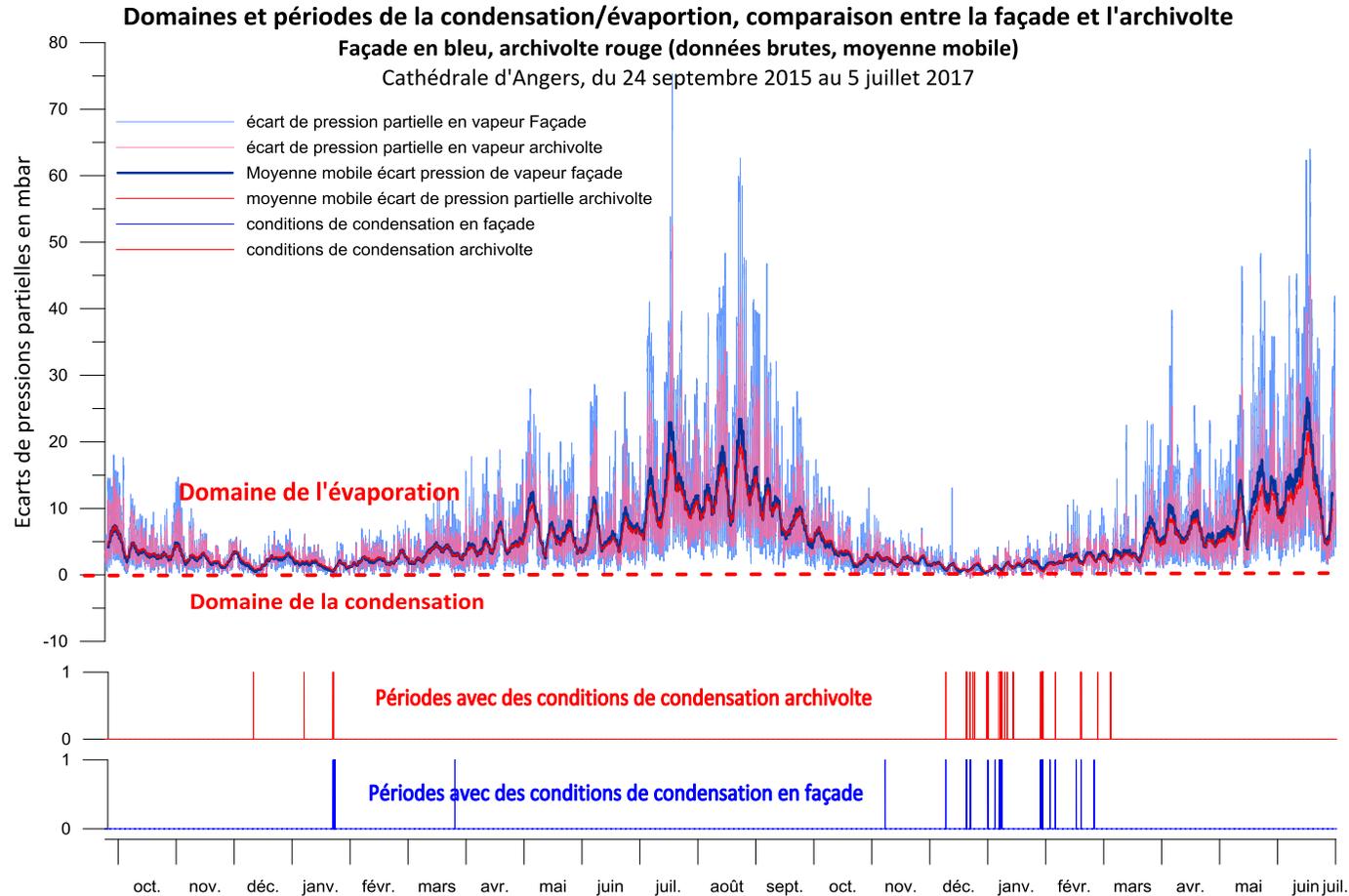


Figure n°30d : calcul des écarts de pressions partielles en vapeur au niveau de la paroi. Comparaison de la station de l'archivolte (triplet n°5) et en façade (triplet n°1). Sur l'archivolte, le potentiel de transfert de vapeur d'eau depuis la paroi vers l'air est permanent à l'exception d'une période de 506 quart d'heures où l'équilibre est atteint ou dépassé. Les périodes de condensation potentielles sont nettement plus nombreuses longues qu'en façade, ce sont essentiellement les mêmes journées d'hiver qui sont concernées mais sur des durées plus importantes.

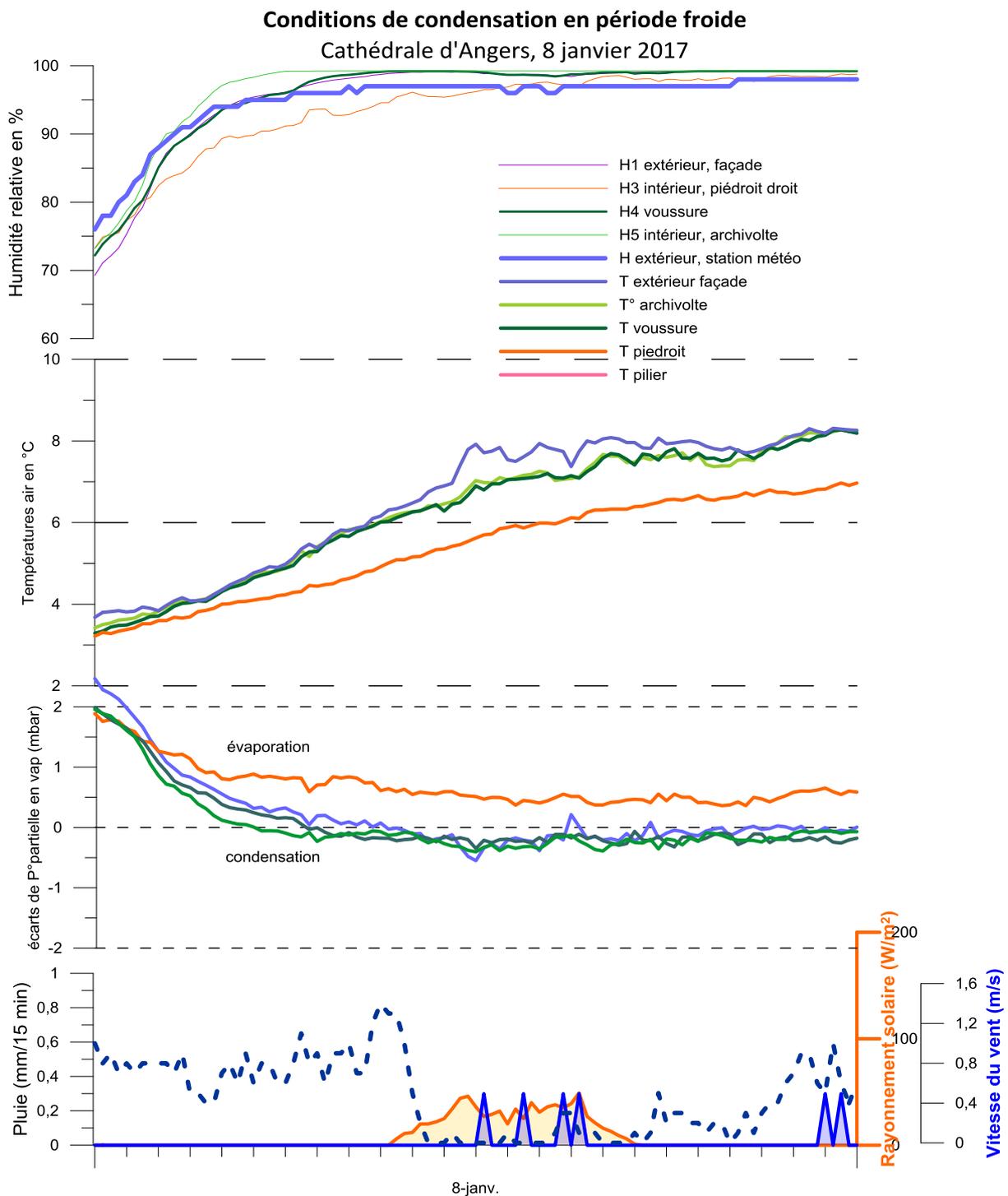


Figure n°31 : La journée du 8 janvier 2017 pendant laquelle le potentiel de condensation est persistant plusieurs heures sur plusieurs triplets de mesure. Températures, humidités, vitesse du vent, pluie, rayonnement solaire et écarts de pression partielle en vapeur, d'abord positifs, deviennent légèrement négatifs (domaine de la condensation) dans les secteurs les plus exposés au refroidissement.

Humidité mesurée par les capteurs de confinement DK
Cathédrale d'Angers, du 20 au 24 janvier 2016

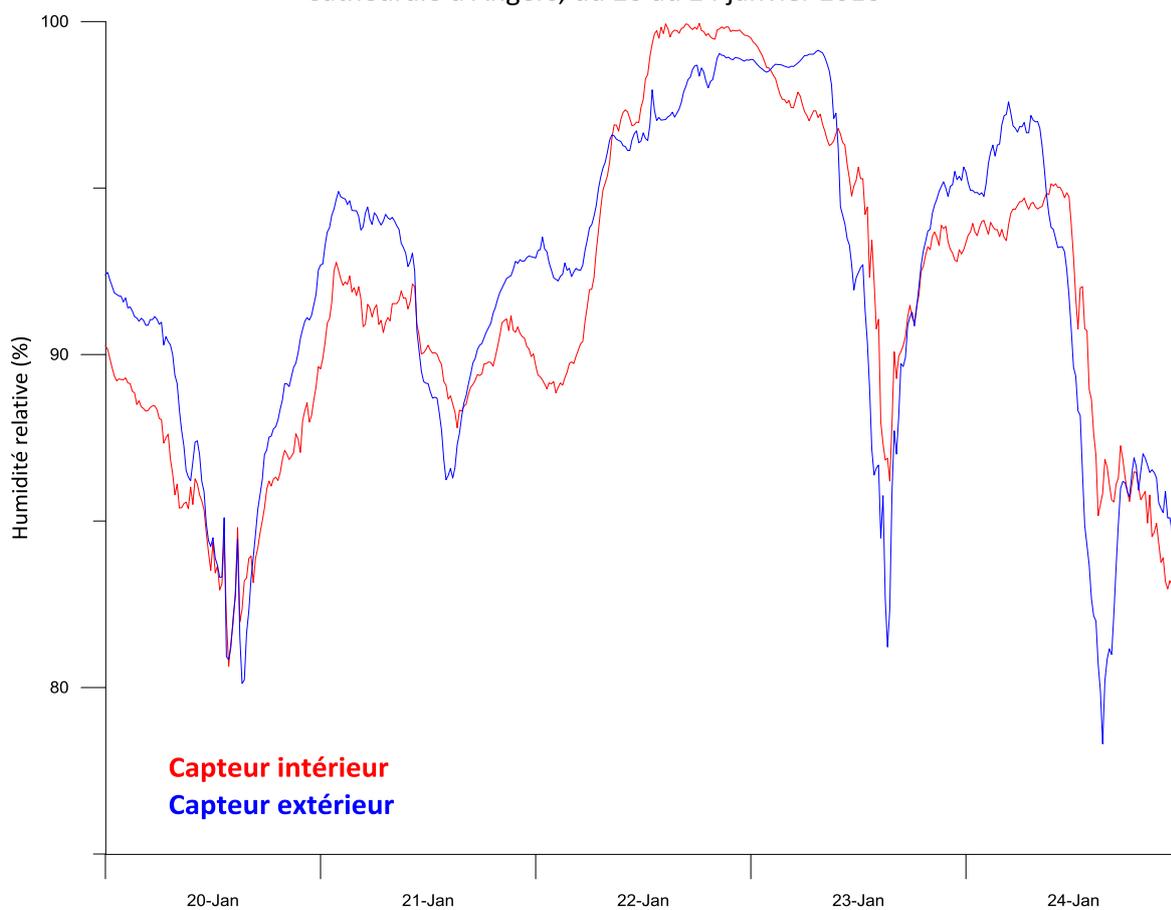
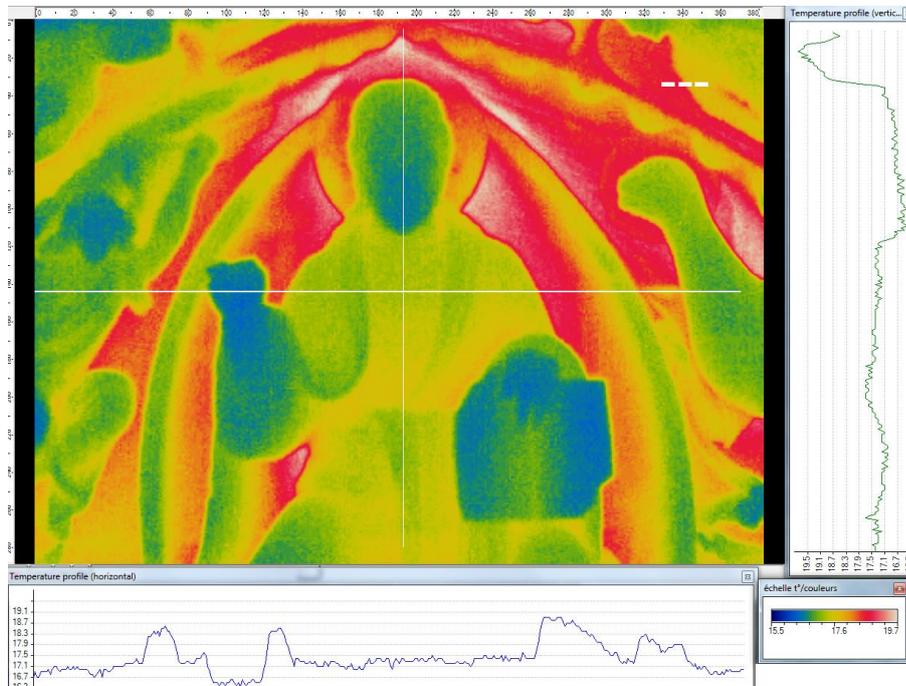


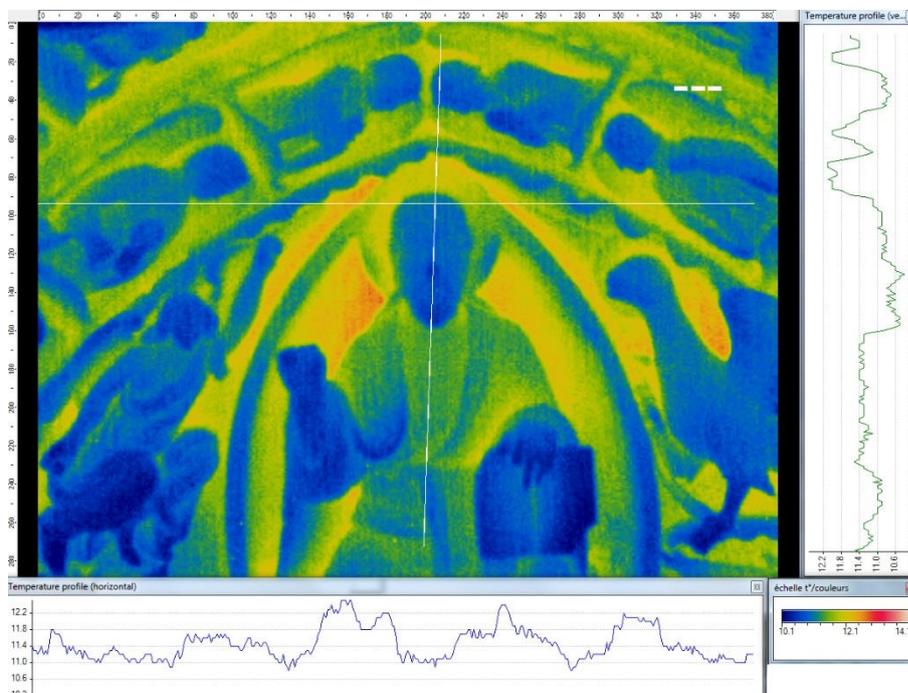
Figure n°32 : humidité mesurée par les capteurs de confinement, détail autour des journées du 22 et 23 janvier, qui furent propices à des effets de condensation. La valeur maximale atteinte, le 22 janvier, est de 98% sur une durée de 15 heures.

V) Analyse des thermographies

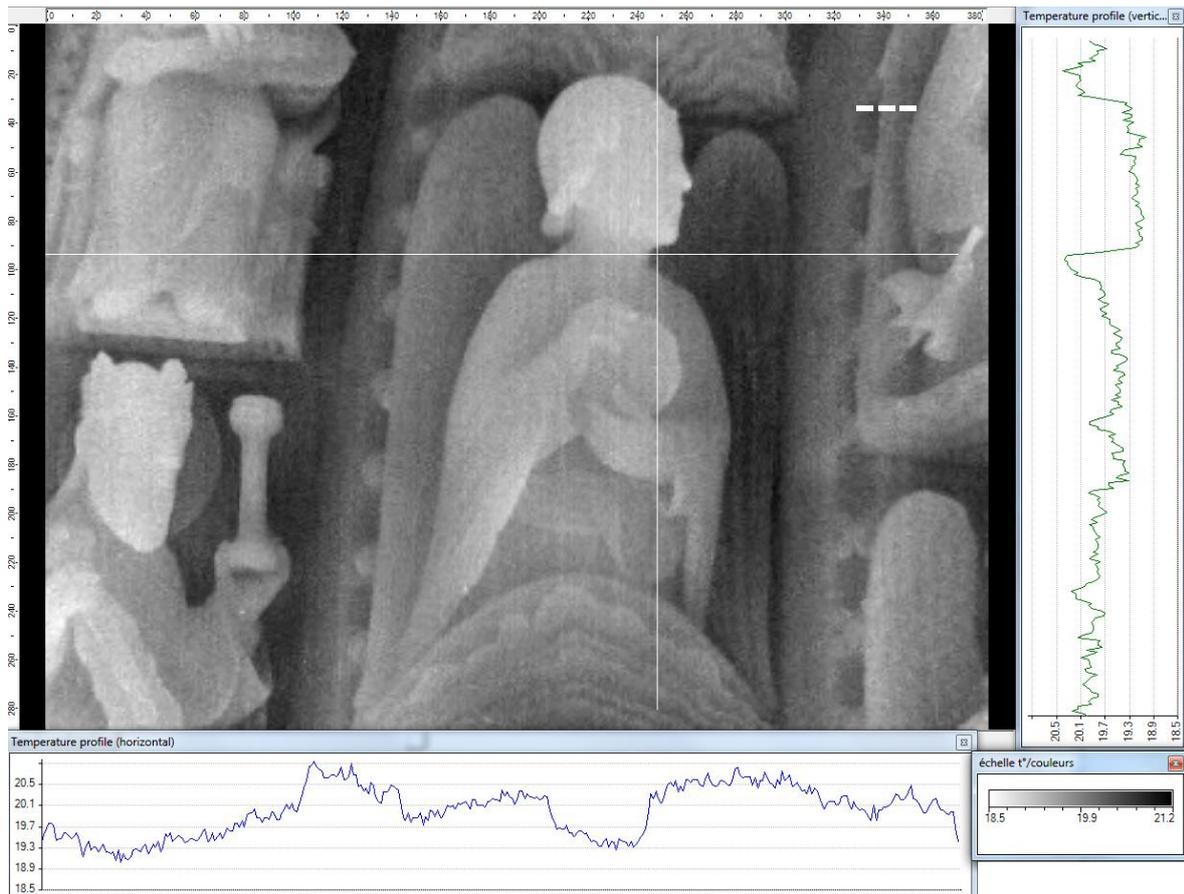
Il s'agit d'acquérir des images thermiques des sculptures du portail ou de l'ensemble de la structure en façade avec une caméra thermique de résolution 0,04°C pour caractériser les gradients thermiques à différentes périodes complétant ainsi, par une analyse spatiale, l'analyse temporelle à partir des chroniques de températures.



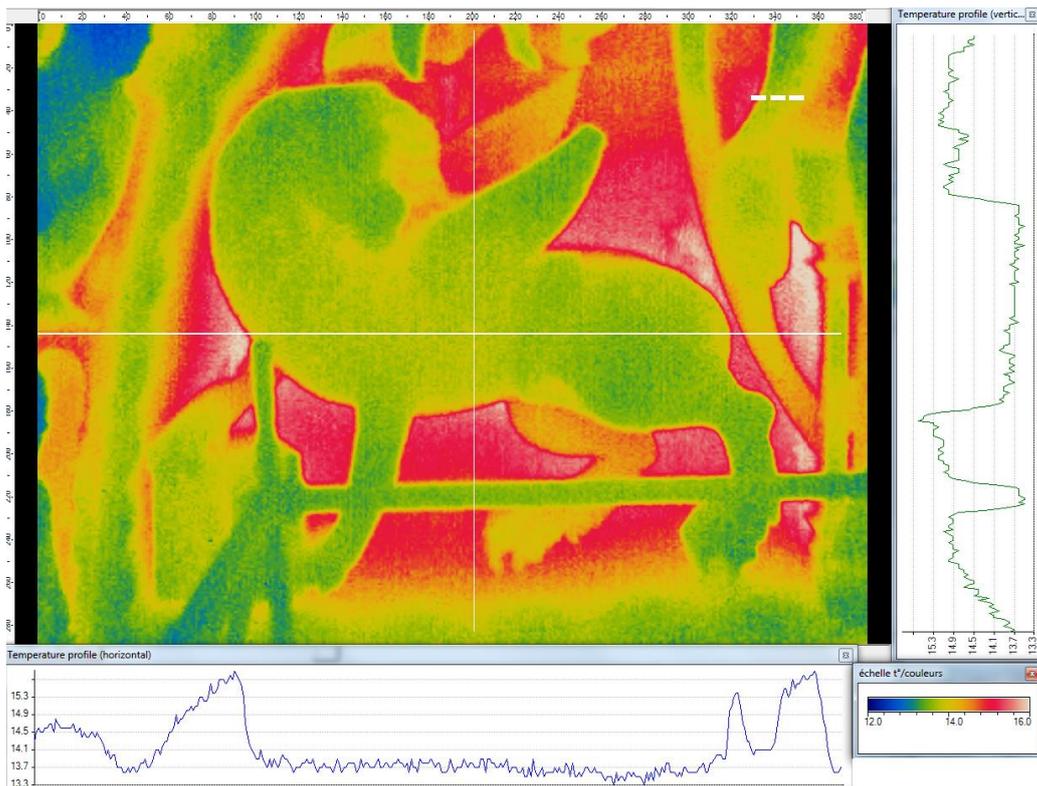
Thermographie du 23 septembre 2015. En bas le profil horizontal, à droite le profil vertical. Cette image prise en matinée montre les parties en relief refroidies lors de la nuit. L'amplitude maximale reste inférieure à 2°C dans tous les cas.



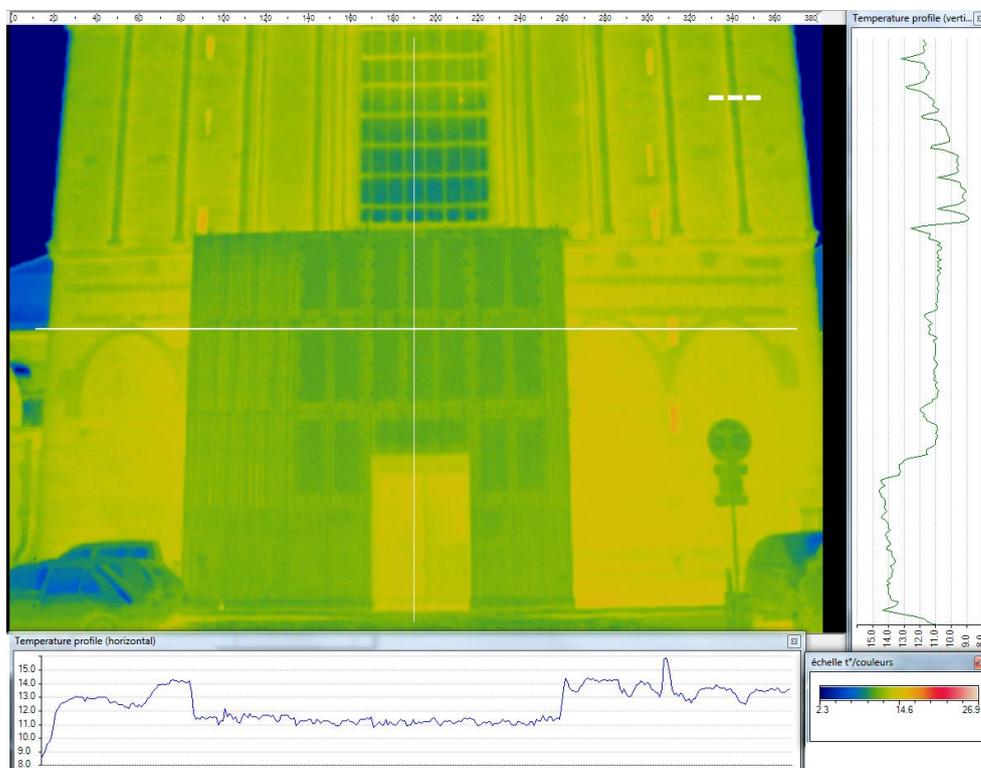
Thermographie du 17 mars 2016. En bas le profil horizontal, à droite le vertical. Cette image prise également en matinée montre les parties en relief refroidies lors de la nuit. Les détails du relief (main, nez du christ, livre) sont bien marqués dans l'image thermique. Les températures moyennes sont autour de 11°C mais les amplitudes dans l'image restent inférieures à 2°C.



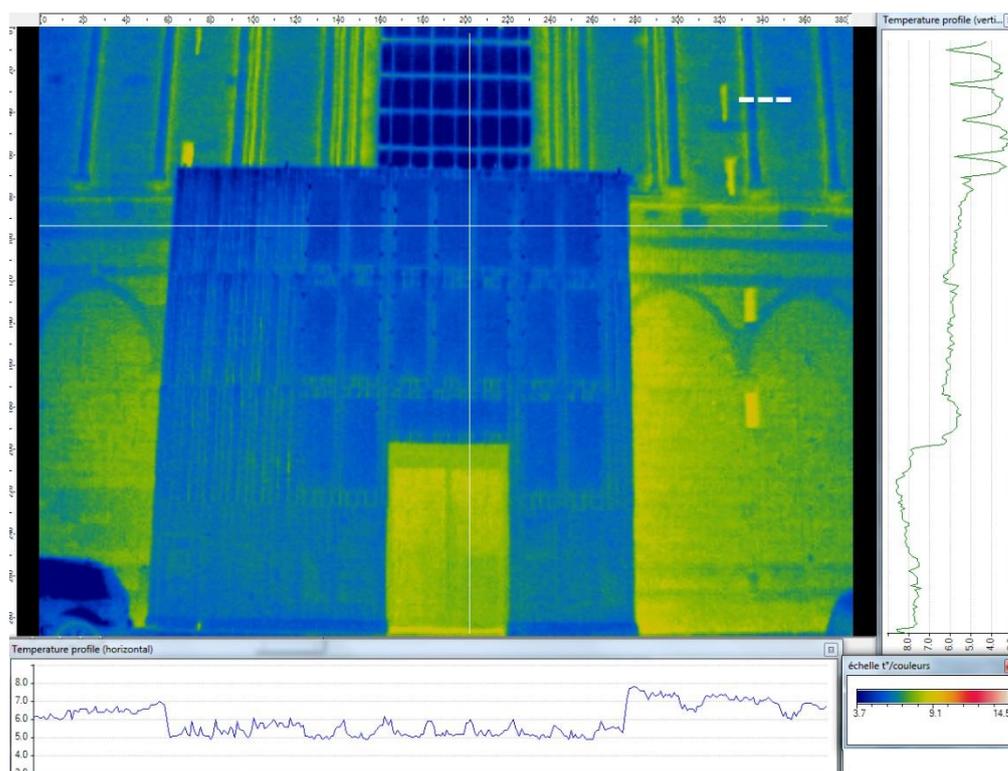
Thermographie d'un ange de la voussure Nord le 22 septembre 2016 au matin. Les zones les plus claires sont les plus froides. Les contrastes thermiques sont indépendants des matières utilisés pour les restaurations indiquant la comptabilité thermique de ces matériaux avec la roche.



Thermographie du 23 septembre 2015. En bas le profil horizontal, à droite le profil vertical. Le corps du lion sculpté en relief est plus froid que l'arrière du portail.



Thermographie de la structure bardée le 23 septembre 2015 au matin. En bas le profil horizontal, à droite le profil vertical. La structure apparaît légèrement plus froide que la façade mais est relativement homogène, aucun effet thermique n'est déterminé par la structure.



Thermographie du 17 mars 2016 en période froide. En bas, le profil horizontal, à droite le profil vertical. Comme en période chaude, la structure apparaît légèrement plus froide que la façade. Elle est relativement homogène bien qu'un faible gradient thermique puisse être identifié entre le haut (plus froid) et le bas (légèrement plus chaud)

Les thermographies des sculptures du portail de la cathédrale montrent en général des écarts thermiques entre les parties en relief et les parties constituant des parties massives ou le fond du bâti. Des écarts thermiques de 1,8°C maximum apparaissent entre les têtes, bordure des drapés, membres et les parties en creux. Aucun contraste n'apparaît entre la pierre et les ciments de restauration, montrant une compatibilité thermique des matériaux utilisés. Aucune autre singularité thermique n'apparaît sur le portail.

Les thermographies de l'ensemble de la structure appliquée en façade de la cathédrale n'indiquent pas d'effets thermiques particuliers. Le volume bardé a très peu d'inertie propre. Il est en général plus froid que la façade au matin et un gradient thermique apparaît entre le haut et le bas de la structure corroborant les résultats des profils thermiques.

Conclusions et perspectives

L'instrumentation mise en place pour le suivi climatique du portail occidental de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers a fonctionné sur la période du 24 septembre 2015 (lancement après installation et tests) au 5 juillet 2017 (dernier relevé, dépose des capteurs accessibles). Les 30 paramètres mesurés en continu et tous enregistrés au pas du quart d'heure ont fourni un peu plus de 1 589 395 données climatiques regroupées dans un fichier au format compatible Excel. La première année est centrée sur l'hiver 2015-2016 qui a été particulièrement doux avec un seul matin de gel sur l'édifice, un printemps pluvieux et un été 2016 chaud et sec. Le suivi a été prolongé permettant d'inclure l'hiver 2016-2017 plus représentatif de la saison froide.

Les observations réalisées lors de chaque mission n'ont pas identifié de phénomène de dégradation en cours ou de menace sur les œuvres dans le volume de protection. Aucune anomalie d'humidité n'est signalée de visu ou sur les enregistrements. Dans les zones sensibles ayant par le passé souffert de dommages il n'y a pas d'arrivée d'eau tellurique par capillarité (les piédroits sont secs, même au niveau du sol) ni d'arrivée directe d'eau de pluie par ruissellement ou réinfiltration depuis la façade (les zones proches de l'archivolte sont restées sèches).

Les éléments principaux issus de l'interprétation des données climatiques et microclimatiques du portail sont les suivantes :

- **La structure bardée bois largement ouverte aux circulations d'air et aux polluants associés et dépourvue d'inertie thermique, n'induit pas un vrai confinement du portail.** La structure ne modifie que faiblement les paramètres climatiques externes.
- **L'effet protecteur de la structure bardée se manifeste par un effet parapluie et parasol. Il s'agit d'une atténuation des impacts climatiques les plus forts** (ensoleillement direct, arrivées directes d'eau de pluie, fortes rafales de vent, atténuation des maxima et minima thermiques).
- **Les impacts climatiques les plus importants sur le portail sont mesurés en été** avec les gradients thermiques les plus élevés aux interfaces air/paroi. Le toit transparent est de plus responsable d'un effet de serre qui réchauffe l'air, créant un gradient thermique dans la structure bardée.
- **L'interface air/roche ne subit pas d'effet de condensation** sur les points mesurés: des conditions d'évaporation ou de stabilité sont maintenues toute l'année, et seules des conditions climatiques externes particulières (brouillard froid) sont responsables des 2 jours où le calcul indique une condensation possible mais sans gradient significatif.
- **L'inertie un peu plus importante des parties internes et basses du portail constitue un modeste microenvironnement interne** suffisant pour réduire significativement les périodes où le transfert de vapeur est en direction de la paroi et amortir les pics thermiques.
- **Les thermographies n'ont pas identifié de singularité ou d'effets particuliers, ni à l'échelle de la structure ni à l'échelle du portail et de sa décoration.** On peut observer que les parties en relief sont logiquement les plus sensibles aux effets thermiques. Les matériaux utilisés pour les restaurations montrent une parfaite compatibilité thermique avec la pierre.

Réflexions sur les propriétés d'une future structure architecturée à partir des informations issues de l'étude climatique.

- Les propriétés de barrière physique (effet parapluie et parasol) du bardage sont associées à des conditions satisfaisantes du point de vue de la conservation des œuvres et doivent être garanties par la future structure architecturée. Le problème de l'effet de serre induit par la toiture translucide doit être corrigé par l'utilisation d'une couverture différente ou de matériau adapté.
- La bonne stabilité des œuvres observée dans les conditions de l'étude ne nous paraît pas justifier un objectif fortement contraignant de stabilité des paramètres climatiques à l'intérieur de la structure architecturée. Une structure passive dont il serait possible de moduler les ouvertures améliorerait la protection climatique sans nécessiter une assistance climatique.
- Les fluctuations lentes (saisonniers et pluri-journalières) ne pourront pas être lissées par une structure passive, en revanche les pics journaliers de grande amplitude et de fréquence élevée peuvent être réduits par une inertie thermique de la structure. Les amortissements et les déphasages observés entre les parties les plus exposées (façade, archivolte) et les parties les plus stables (piédroit, pilier) améliorent la situation climatique aux interfaces et constituent des indicateurs pour l'inertie de la future structure.

Rédaction Eurgeol François Bourges,

Avec les collaborations de William Hedin, Camille Fabre, Estelle Fourment

Saint-Girons le 29 septembre 2017



30, rue de la République
F-09200 SAINT-GIRONS

Tél : 05 61 04 64 11
Fax : 05 61 04 64 45
mel@geconseil.com
<http://www.geconseil.com>