

Quels systèmes pour réguler l'hygrométrie de vitrines dans les Monuments Historiques ? Une étude comparative au sein du LRMH.

Mémoire présenté par :
Antonin Peyre

Pour l'obtention du
Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets archéologiques et ethnographiques

Année académique 2022-2023

Remise du travail : 17.07.2023

Jury : 29.08.2023

Nombre de pages : 127

Engagement

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Le 12 juillet 2023.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Peyre', with a long horizontal stroke extending to the right.

Je remercie le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques et en particulier le domaine Microbiologie pour leur accueil et l'accompagnement de ce travail.

Je remercie le Dr Faisl Boust, responsable du pôle Microbiologie au LRMH pour ses encouragements et sa supervision tout au long de ce travail.

Je remercie M. Nicolas Buis, gérant et concepteur au sein de l'entreprise MaFabrique®, pour sa disponibilité, ses conseils et la transmission de son expertise en ce qui concerne les membranes électrolytiques pour la régulation climatique de vitrines.

Je remercie également Mme. Véronique Tonnel, attachée de conservation du patrimoine auprès du pôle Crypte, Musée et Château Comtal de Boulogne-sur-Mer, pour l'accueil, la qualité de nos échanges ainsi que l'intérêt porté à ce travail.

Avant toutes choses, voici un glossaire présentant les termes les moins accessibles afin de faciliter la compréhension de ce travail :

Vitrine d'exposition : Une vitrine d'exposition est une structure de « mise à distance » entre le visiteur et les objets exposés, elle est caractérisée par différents indices. Ce travail ne se concentrant pas sur la sûreté ni l'esthétique, nous nous attarderons sur l'étanchéité et le volume intérieur uniquement.

Contrôler l'humidité : Action combinée de la mesure et de la régulation de l'humidité.

Mesurer l'humidité : Suivre l'évolution du taux d'humidité relative d'un espace en fonction du temps, analyser les comportements et chercher à comprendre les causes.

Réguler l'humidité : maintenir une valeur d'humidité relative différente de la valeur moyenne d'humidité relative de l'environnement.¹

Humidité : caractère de ce qui est humide.²

Température : constitue une mesure de la manifestation de l'agitation moléculaire. Elle est exprimée en °C.²

Humidité relative : Rapport de la pression de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante, exprimée en %.¹ Elle est indiquée : H.R.

Rapport de Mélange : Il s'agit du rapport entre la masse d'eau (g) contenue dans une certaine quantité d'air humide à la masse d'air sec (kg) à laquelle elle se mélange.²

Variation journalière de l'humidité relative : Il s'agit de la soustraction du maximum par le minimum des valeurs mesurées de l'humidité relative d'un espace sur une plage de 24 heures.

Point de rosée : Indique la limite de température au-dessous de laquelle la condensation se produit pour un mélange donné (masse de vapeur d'eau, air sec et température).²

Taux de renouvellement d'air : Dans ce travail il est un indice d'étanchéité. Il s'agit du pourcentage du volume de l'espace confiné qui est renouvelé par l'air environnant, et ce sur une journée.

Hystérésis : Retard de l'effet sur la cause dans le comportement des corps soumis à une action physique.³ Il s'agit de l'écart de réaction du système lorsque la consigne est atteinte, autrement dit, le dépassement de la consigne qui sera réalisé par l'appareil avant d'arrêter son effort de régulation.

Sorbant d'humidité : Matériau qui capte l'humidité pour réduire sa concentration dans l'environnement.¹

¹ **EN 15999**

² Définition fournie par M. Jacot Thierry lors du cours donnée sur l'Humidité Relative et de la Température dans le cadre de la 1ère année de Bachelor.

³ Dictionnaire Le Robert.

Table des matières

Résumé :	5
Introduction :	10
Chapitre 1 : Présentation des différents systèmes étudiés	12
Membranes échangeuses de protons (PEM) :	12
Climatisation intégrée EBC 10™ :	15
Régulation par Gel de Silice, Prosorb™ :	17
Présentation des vitrines étudiées :	19
La vitrine du « Voile de la Vierge » dans la cathédrale de Chartres :	19
La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :	20
La vitrine du reliquaire de Saint Caprais à Saint Vrain :	22
Chapitre 2 : Méthode de comparaison	26
La collecte des données :	26
Les données de conservation :	26
Les données générales :	26
Le traitement de données :	27
Les critères de comparaison :	28
Chapitre 3 : Analyse des vitrines étudiées.	31
La vitrine de du voile de la Vierge à Chartres :	31
La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :	33
La vitrine du reliquaire de St Caprais à St Vrain :	35
Les vitrines des Boulogne-sur-Mer :	37
Les vitrines régulées via EBC 10™ :	37
Les vitrines régulées par cassettes de Prosorb™ :	39
Synthèses des analyses :	40
Chapitre 4 : Comparaison des résultats des analyses.	42
Le critère de consigne :	42
Le critère de stabilisation :	42
Le coût de fonctionnement en consommation énergétique :	43
Le coût de fonctionnement lié à l'entretien :	44
Le critère de coût d'achat du dispositif :	44
Le temps nécessaire avant retour à un environnement stabilisé :	45
Le niveau de bruit émis :	46
La plage de température pour un bon fonctionnement :	46
Le volume maximal d'air traité par une unité :	47
La question de la pérennité du système :	47
La capacité de modulation :	48

Mesures de contrôle de l'évolution climatique exploitables :	48
Chapitre 5 : Présentation des résultats de la comparaison.	49
Chapitre 6 : Quelques exemples fictifs d'exploitation de ces empreintes graphiques.	52
Scénario 1 :	52
Scénario 2 :	54
Scénario 3 :	56
Scénario 4 :	58
Chapitre 7 : Perspectives et axes d'amélioration de cette étude.	60
Conclusion :	62
Références :	64
Sources bibliographiques :	64
Sources techniques :	66
Liste des illustrations :	67
Liste des graphiques présents dans le corp de texte :	68
Liste des tableaux :	69
Liste des graphiques présent en annexes :	70
Annexes.....	72
1 Présentation des vitrines : A.1	72
2 Graphiques :	74
Chapitre 3 : A.2.	74
Chapitre 5 : A.3.	94
Chapitre 6 : A.4.	96
3 Analyse détaillée du comportement des vitrines :.....	101
La vitrine du voile de la Vierge à Chartres :	101
La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :	104
La vitrine du reliquaire de St Caprais à St Vrain :	111
Les vitrines des Boulogne-sur-Mer :	115

Résumé :

Français :

Quels sont les systèmes les plus appropriés pour réguler l'humidité de ma vitrine ?

Cette étude tente de répondre à cette question tout en laissant la possibilité au lecteur d'adapter le raisonnement à sa propre situation, et ainsi de trouver la solution par lui-même en suivant les pistes proposées.

Pour ce faire, trois systèmes de régulation différents sont étudiés sur une période de deux mois allant du 31.03.2023 au 31.05.2023.

Il s'agit d'un système dit passif représenté par la solution Prosorb™ et de deux systèmes actifs que sont l'EBC 10™ fonctionnant par condensation et le FluXor™ équipé de membranes électrolytiques Rosahl™.

Ces systèmes sont comparés à travers une liste de 12 critères allant de performances liées à la conservation aux questions de prix tout en passant par le confort et l'adaptabilité des systèmes. Cette comparaison permet de tirer des graphiques types radars qui donnent une forme géométrique que nous avons appelé « empreinte graphique ».

Ces dernières sont très pratiques, car elles permettent à chacun de s'orienter vers tel ou tel système. Pour ce faire il faut étudier sa propre situation et attribuer les notes souhaitées pour chaque critère, il est ensuite possible de tracer une courbe à l'aide de ces notes et de la superposer aux dites empreintes graphiques.

Cela permet d'avoir une réponse adaptable aux besoins de chacun sans donner de recommandations arbitraires.

Plusieurs scénarios fictifs ont été proposés comme exemple afin de guider les lecteurs.

Ce travail n'est pas idéal car des écueils ont été rencontrés, ce qui nous a poussé à faire des approximations. Cependant il propose à son échelle d'être une première tentative de comparaison dynamique de ces différents systèmes.

Il pourrait être amélioré par différentes expériences complémentaires et l'ajout d'autres solutions de régulations afin d'être plus général et complet.

English :

What are the best systems for regulating humidity in my museum showcase?

This study attempts to answer this question, while leaving it up to the reader to adapt the reasoning to his own situation and find the solution themselves by following the suggested paths.

For this purpose, three different regulation systems are studied over a two-month period from 31.03.2023 to 31.05.2023.

These are a so-called passive system represented by the ProSORB™ solution and two active systems that are the EBC 10™ operating by condensation and the FluXor™ equipped with Rosahl™ electrolytic membranes.

These systems are compared using a list of 12 criteria ranging from conservation-related performance to price issues while also taking into account the comfort and adaptability of the systems.

This comparison allows us to draw radar-type graphs that give a geometric shape that we have called a "graphical footprint".

These are very practical, because they enable everyone to choose a particular system.

To do this, you need to study your own situation and assign the expected scores for each criterion. You can then draw a curve using these scores and superimpose them on the graphical impressions. This provides a response that can be adapted to each individual's needs, without giving arbitrary recommendations.

Several fictitious scenarios have been proposed as examples to guide readers.

This work is not ideal, as many pitfalls have been encountered, which has led us to make some approximations. However, on its own scale, it is a first attempt to dynamic comparison of these different systems.

It could be improved by specific experiments and the addition of other control solutions in order to be more general and complete.

Deutsch:

Welche Systeme sind am besten geeignet, um die Feuchtigkeit in meinem Schaufenster zu regulieren?

Diese Studie versucht, diese Frage zu beantworten, lässt dem Leser jedoch die Möglichkeit, die Argumentation an seine eigene Situation anzupassen und so die Lösung selbst zu finden, indem er den vorgeschlagenen Wegen folgt.

Zu diesem Zweck werden drei verschiedene Regulierungssysteme über einen Zeitraum von zwei Monaten vom 31.03.2023 bis zum 31.05.2023 untersucht.

Es handelt sich um ein sogenanntes passives System, das durch die Prosorb™-Lösung repräsentiert wird, und um zwei aktive Systeme, bei denen es sich um den EBC 10™, der durch Kondensation funktioniert, und den FluXor™ handelt, der mit Rosahl™-Elektrolytmembranen ausgestattet ist.

Diese Systeme werden anhand einer Liste von 12 Kriterien verglichen, die von Leistungen im Zusammenhang mit der Konservierung über Preisfragen bis hin zum Komfort und der Anpassungsfähigkeit der Systeme reichen.

Aus diesem Vergleich lassen sich radartypische Grafiken ableiten, die eine geometrische Form ergeben, die wir als "grafischen Fingerabdruck" bezeichnet haben.

Diese sind sehr praktisch, da sie es jedem ermöglichen, sich an diesem oder jenem System zu orientieren.

Dazu muss man seine eigene Situation untersuchen und die erwarteten Noten für jedes Kriterium vergeben. Anschließend kann man mithilfe dieser Noten eine Kurve zeichnen und sie über die sogenannten grafischen Fingerabdrücke legen.

Auf diese Weise kann man eine Antwort finden, die an die Bedürfnisse jedes Einzelnen angepasst werden kann, ohne willkürliche Empfehlungen zu geben.

Mehrere fiktive Szenarien wurden als Beispiel vorgeschlagen, um den Lesern eine Orientierungshilfe zu geben.

Diese Arbeit ist nicht ideal, da wir auf viele Hindernisse gestoßen sind, die uns dazu veranlasst haben, Annäherungen vorzunehmen. Dennoch bietet sie einen ersten Versuch, diese verschiedenen Systeme dynamisch zu vergleichen.

Sie könnte durch verschiedene zusätzliche Experimente und die Hinzufügung anderer Regelungslösungen verbessert werden, um allgemeiner und vollständiger zu sein.

Español :

¿Cuáles son los sistemas más adecuados para regular la humedad de mi escaparate?

Este estudio trata de responder a esta pregunta dejando la posibilidad al lector de adaptar el razonamiento a su propia situación, y así encontrar la solución por sí mismo siguiendo las pistas propuestas.

Para ello, se estudian tres sistemas de regulación diferentes durante un periodo de dos meses desde el 31.03.2023 hasta el 31.05.2023.

Se trata de un denominado sistema pasivo representado por la solución Prosorb™ y dos sistemas activos, el EBC 10™ que funciona por condensación y el FluXor™ equipado con membranas electrolíticas Rosahl™.

Estos sistemas se comparan a través de una lista de 12 criterios que van desde el rendimiento relacionado con la conservación hasta cuestiones de precio pasando por la comodidad y adaptabilidad de los sistemas.

Esta comparación permite dibujar gráficos de tipo radar que dan una forma geométrica que hemos denominado "huella gráfica".

Estas son muy prácticas, porque permiten que todos cualquiera se oriente hacia tal o cual sistema. Para ello, debe estudiar su propia situación y asignar los puntajes esperados para cada criterio, luego es posible dibujar una curva con estos puntajes y superponerla en dichas huellas gráficas. Esto permite tener una respuesta que se puede adaptar a las necesidades de cada uno sin dar recomendaciones arbitrarias.

Varios escenarios ficticios se han ofrecido como ejemplos para guiar a los lectores.

Este trabajo no es ideal porque se encontraron muchos escollos que nos llevaron a hacer aproximaciones. Sin embargo, propone a su propia escala ser un primer intento de comparación dinámica de estos diferentes sistemas.

Podría mejorarse mediante varios experimentos complementarios y la adición de otras soluciones regulatorias para que sea más general y completo.

Italiano :

Quali sono i sistemi più adatti per regolare l'umidità nella mia vetrina ?

Questo studio cerca di rispondere a questa domanda, lasciando al lettore il compito di adattare il ragionamento alla propria situazione e di trovare da solo la soluzione seguendo i percorsi suggeriti.

A tal fine, vengono studiati tre diversi sistemi di regolazione per un periodo di due mesi, dal 31.03.2023 al 31.05.2023.

Si tratta di un sistema cosiddetto passivo, rappresentato dalla soluzione Prosorb™, e di due sistemi attivi, ovvero l'EBC 10™ che opera per condensazione e il FluXor™ dotato di membrane elettrolitiche Rosahl™.

Questi sistemi sono stati confrontati sulla base di un elenco di 12 criteri che vanno dalle prestazioni legate alla conservazione alle questioni di prezzo, tenendo conto anche del comfort e dell'adattabilità dei sistemi.

Questo confronto viene utilizzato per tracciare grafici di tipo radar che danno una forma geometrica che abbiamo chiamato "impronta grafica".

Questi sono molto pratici, perché permettono a tutti di scegliere un particolare sistema.

Per fare ciò, è necessario studiare la propria situazione e assegnare i punteggi previsti per ogni criterio. È quindi possibile disegnare una curva utilizzando questi punteggi e sovrapporli alle impronte grafiche.

In questo modo si ottiene una risposta che può essere adattata alle esigenze di ciascuno, senza fornire raccomandazioni arbitrarie.

Sono stati proposti diversi scenari fittizi come esempi per guidare i lettori.

Questo lavoro non è ideale, poiché sono state incontrate molte insidie che ci hanno portato a fare alcune approssimazioni. Tuttavia, sulla sua stessa scala, è un primo tentativo di confronto dinamico tra questi diversi sistemi.

Potrebbe essere migliorato con vari esperimenti complementari e con l'aggiunta di altre soluzioni di controllo, per essere più generale e completo.

Introduction :

La genèse de ce projet remonte à une présentation que j'ai pu suivre au sujet des membranes microporeuses échangeuses de protons (PEM) comme moyen efficace de lutter contre le développement de moisissures.

Cette présentation m'a fortement intrigué car les performances affichées⁴ en termes de conservation semblaient très satisfaisantes pour une consommation moindre et aucun ajout ni retrait d'eau pour limiter le taux d'humidité relative d'un espace confiné.

J'ai alors cherché à en savoir plus afin de savoir s'il y avait des éléments déterminants faisant que ce système serait plus ou moins efficace en fonction des avantages recherchés. Je n'ai alors trouvé que peu de publications permettant de comparer différents systèmes de régulation de vitrines⁵ et ce même pour des systèmes plus connus et dits « traditionnels ». Je me suis alors mis en tête de réaliser ce travail afin de proposer un moyen de comparer ces différentes solutions.

Avant cela intervient la question de l'« espace confiné » que sont les vitrines : quels sont leurs fonctions et en quoi est-ce nécessaire ?

Jean Tétreault⁶ répond que « L'exposition ou la mise en réserve d'objets dans des contenants de protection à humidité contrôlée mérite d'être envisagée s'il est impossible de contrôler l'HR dans la pièce ou que l'exigence en termes de HR de certains objets est différente de ce qui est exigé pour le reste de la collection dans la pièce. ».

Quel plus bel exemple que la mise en exposition de biens culturels dans le cadre de monuments historiques pour présenter un environnement d'exposition non contrôlé et soumis aux aléas du climat extérieur.

Lorsque nous avons la responsabilité de conserver du patrimoine mobilier, la conservation préventive s'impose désormais comme indispensable. Dans le cadre de trésors et de patrimoine régional, la question de la mise en place d'un espace muséographique à environnement régulé n'est pas toujours la plus pertinente par rapport aux besoins et aux moyens de l'institution. Le moyen le plus direct et le plus cohérent est d'adapter un espace de présentation « in situ » dans les monuments auxquels sont liés les objets et les institutions.

D'autant plus que la fonction même des vitrines a évolué tout au long de notre histoire, étant un objet de lutte contre le vol et les dégradations dans les cabinets du XVIII^e siècle, leur rôle s'est complexifié en intégrant au maximum les facteurs de dégradation environnementaux reconnus aujourd'hui⁷.

C'est dans ce contexte que le développement de vitrines intervient, avec la question des micro-environnements internes de ces dernières. Les vitrines apportent aujourd'hui une réelle solution de conservation préventive en matière de lutte contre les facteurs de dégradations environnementaux. La question qui va nous occuper dans ce travail a été volontairement limitée à la régulation de l'humidité relative dans un premier temps ainsi que la température à laquelle elle est intimement liée⁸.

⁴ **Bousta 2011**, cette indication faisant référence à la liste bibliographique.

⁵ **Melin 2007 et Shiner 2007**.

⁶ **Tétreault 2018**.

⁷ **Jacot 2003**.

⁸ En effet, une augmentation de 1°C de la température peut abaisser l'humidité relative de 2 à 3 %⁸.

Qu'est-ce que l'humidité relative (H.R.) ? C'est un indicateur du taux d'humidité dans l'air ambiant, elle s'exprime en (%) et n'a pas d'unité.

C'est un des principaux facteurs environnementaux de dégradation d'une grande majorité de matériaux constituant le patrimoine, en particulier les matériaux organiques hygroscopiques et les métaux, mais également les objets dit « archéologiques » de tous types.

Il semble donc essentiel de réguler ce taux d'humidité, bien qu'il soit aujourd'hui difficile de savoir vers quel système se pencher pour les responsables de collections. La principale distinction étant faite entre les systèmes de régulation « passifs » et « actifs ».

C'est dans cet esprit que j'ai pu contacter le Dr Faisl Bousta⁹ du LRMH, qui a rapidement été séduit par le projet et a accepté de m'accompagner et de me superviser tout au long de la réalisation de ce dernier.

Ce travail a donc été réalisé sur une période de deux mois, du 9 mai au 9 juillet 2023 en relation avec le LRMH, Nicolas Buis de MaFabrique™ et Véronique Tonnel attachée de conservation à Boulogne-sur-Mer.

Il a été réalisé à travers plusieurs axes dont la récolte des données et la compréhension du fonctionnement de chaque système de régulation. Vient ensuite la mise en place d'une méthodologie de comparaison permettant d'avoir une vision plus précise des objectifs et de ne pas s'égarer. Par la suite sont présentés les résultats d'analyses des données climatiques recueillies après traitement. Puis est proposée la comparaison des données obtenues et enfin quelques exemples d'application des résultats fournis par cet exercice de comparaison. Cela afin que chaque responsable souhaitant s'essayer à la transcription de sa situation particulière via une empreinte graphique puisse la comparer avec celles fournies ici.

L'intérêt de cette étude étant de fournir un outil qui pourra être utilisé par d'autres personnes, la transparence et l'objectivité¹⁰ ont été les maîtres mots de ce travail afin que tous, lecteurs et lectrices, puissent s'approprier les raisonnements qui ont mené à l'aboutissement de ce document.

⁹ Le Dr. Faisl Bousta est la personne ayant réalisé la présentation sur les membranes échangeuses de protons évoquée plus tôt.

¹⁰ Si tant est qu'il soit possible d'être réellement objectif.

Chapitre 1 : Présentation des différents systèmes étudiés

Dans le cadre de cette étude, trois systèmes de régulation de l'humidité relative sont proposés : deux systèmes dits actifs et un système dit passif.

Pour rappel, Jean Tétreault¹¹ définit la différence entre ces deux familles par le fait qu'un système actif fonctionne « à distance de façon mécanique et à l'aide de conduite d'air », nous ajouterons que désormais tous les systèmes ne nécessitent pas une conduite d'air et que c'est bien le caractère de régulation de « façon mécanique » qui est essentielle pour différencier ces deux familles.

A l'inverse, un système à régulation passive fonctionne à travers l'utilisation de sorbants d'humidité afin de modifier l'équilibre thermodynamique de l'espace.

Ainsi, les différents systèmes étudiés seront développés ci-dessous : il s'agit de membranes échangeuses de protons contrôlées via boîtier FluXor™ et de climatisation intégrée EBC 10™ pour les régulations actives ; Puis des cassettes de gel de silice Prosorb™ de 950g pour ce qui est du système de régulation passif.

Membranes échangeuses de protons (PEM) :

Les membranes échangeuses de protons (PEM) sont des membranes dont le fonctionnement repose sur le principe de l'électrolyse de la vapeur d'eau.

Cette réaction a pour équation bilan : $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Ainsi de part et d'autre de la membrane, nous avons un espace d'assèchement et un espace d'humidification en fonction de l'ajout ou du retrait de dihydrogène. C'est donc le positionnement de la membrane qui va définir l'action du système : si l'anode est du côté « vitrine », un assèchement aura lieu, à l'inverse si c'est la cathode qui est du côté vitrine, nous aurons une humidification de l'espace.

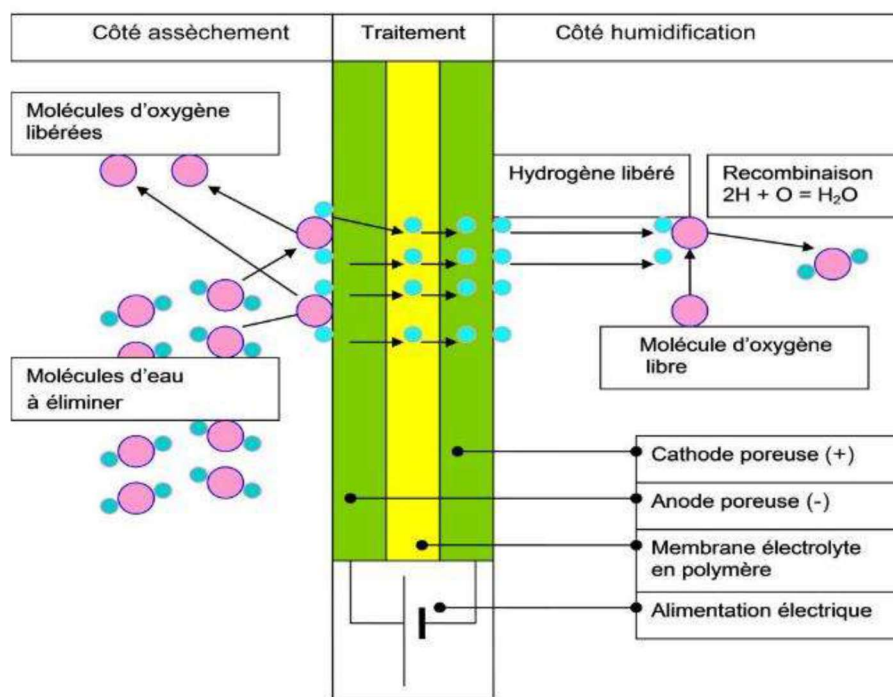


Illustration 1 : Schéma présentant le fonctionnement d'une PEM. ©LRMH-Bousta

¹¹ **Tétreault 2018**

Dans l'idéal, il est préférable d'utiliser deux membranes au minimum, l'une dans un sens opposé à l'autre, ce qui permet de pouvoir à la fois d'humidifier et déshumidifier l'espace. Ces membranes sont positionnées en « cloisons » c'est-à-dire intégrées directement à l'enveloppe que constitue la vitrine, afin d'avoir un effet direct sur l'environnement intérieur. Cela permet d'éviter d'avoir des conduites d'air, donc une ventilation forcée bruyante et des risques de fuites supplémentaires.



Illustration 2 : Prise de vue d'une membrane en position. ©LRMH

Ces dispositifs existent en deux formats 5x5 cm et 7x7cm et sont produites par Ryosai Technica CO¹². au Japon, sous la dénomination « ROSAHL »¹³.

Pour fonctionner, un tel système nécessite plusieurs éléments : des membranes et éventuellement leur support, une sonde HR/T, un boîtier de contrôle, connectiques et alimentations électrique.

En France, ce système est commercialisé par MaFabrique® qui produit de son côté les boîtiers de contrôle FluXor™ ainsi que les supports de membranes.

Une installation standard aurait donc cet aspect ci :

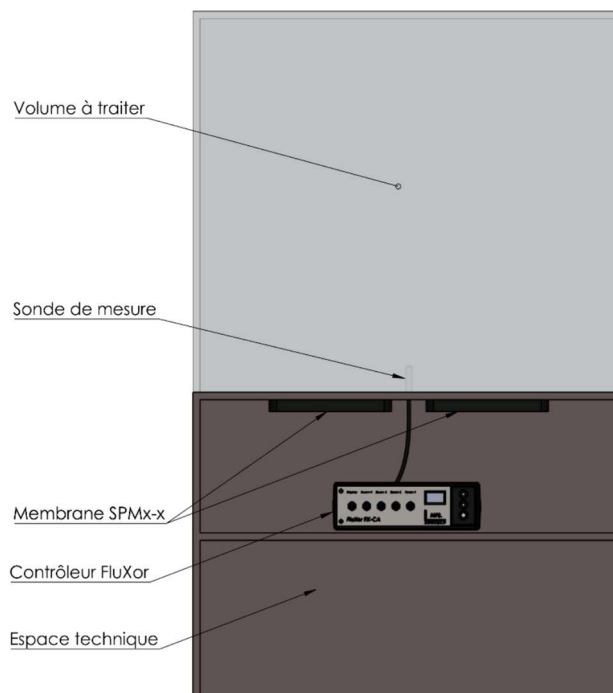


Illustration 3 : Schéma de proposition d'installation d'un système FluXor. ©MaFabrique

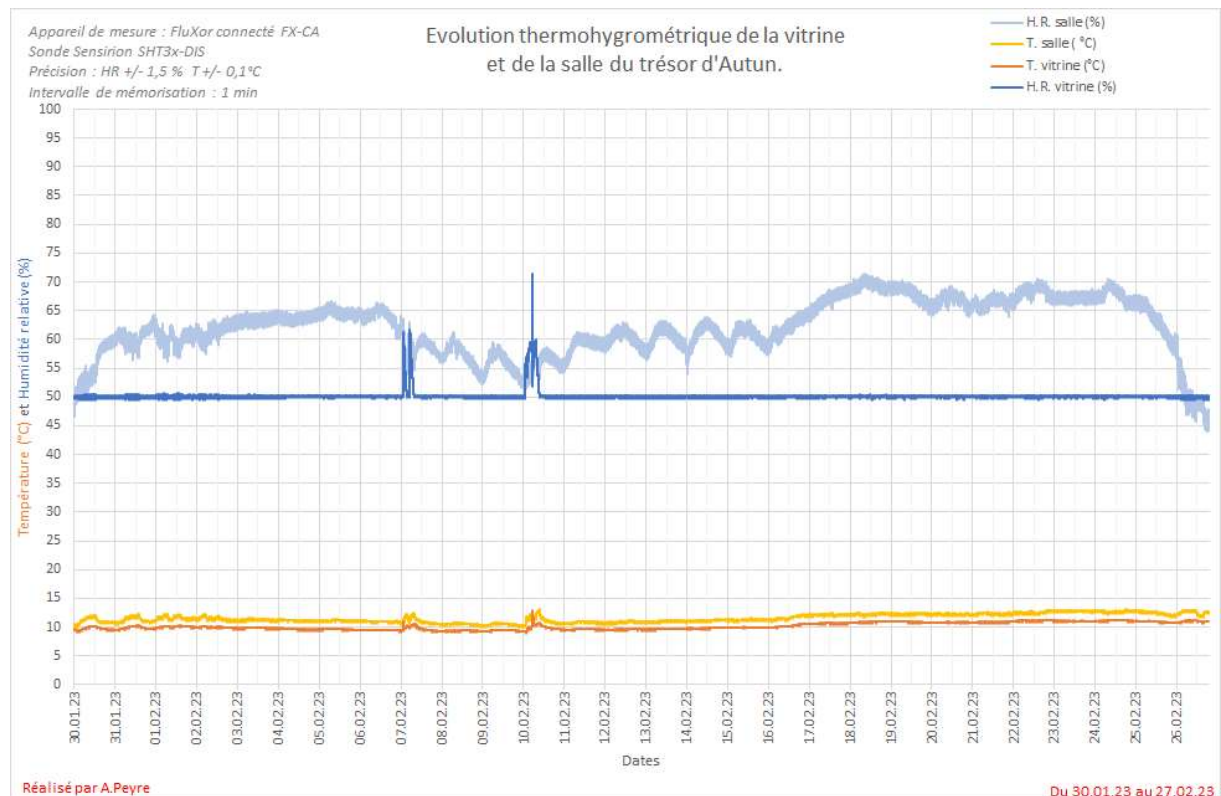
¹² Filiale du groupe Mitsubishi™.

¹³ Ils sont présentés par **Bousta 2011, Dallel 2020, Qi 2017 et Yamauchi 1999**.

Il est également possible d'ajouter un second jeu de membranes si le volume à traiter est supérieur, ainsi qu'une sonde de contrôle de l'environnement extérieur pour pouvoir enregistrer les données de ces deux espaces. Une version connectée permet également de rendre les données accessibles en ligne directement via la plateforme « Preservarium » fournie par MaFabrique®.

Il est intéressant de noter que ce système est tout de même récent¹⁴ et ne nécessite ni apport ni retrait d'eau.

Les résultats attendus d'un tel système sont les suivants :



Graph. 1 : Cas d'Autun, exemple d'un comportement idéal du FluXor.

Ici nous observons un comportement typique de régulation d'une vitrine expérimentale à Autun. Nous retrouvons en bleu foncé l'humidité relative de la vitrine et en bleu pâle l'humidité relative de l'environnement proche. En orange et jaune, nous retrouvons les températures.

Outre les deux pics du 07.02 et du 10.02 correspondant à des ouvertures de la vitrine, nous pouvons observer un comportement de régulation très stable à la consigne de 50 % et présentant très peu de variations.

¹⁴ Première mise en place en 2008, en France, voir **Bousta 2011**.

Climatisation intégrée EBC 10TM :



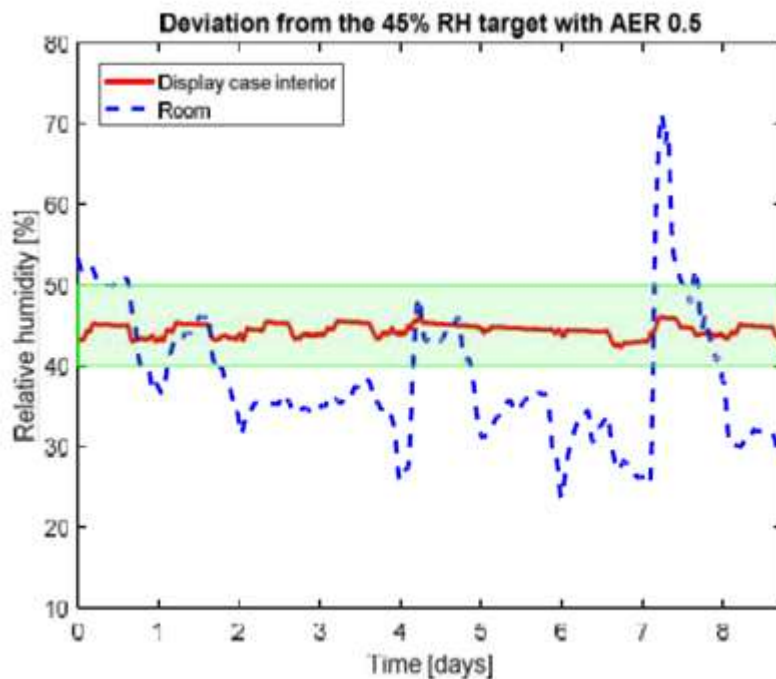
Illustration 4 : Présentation d'un système EBC 10. ©Long Life for Art.

L'EBC 10TM est un système de régulation produit par miniClima® Schönbauer GmbH (Autriche). Il s'agit d'un système de régulation actif qui va condenser ou vaporiser l'eau dans l'environnement. Le boîtier va réguler l'environnement climatique de façon déportée à l'aide de tuyaux flexibles reliant ce boîtier et l'espace d'exposition. Il fonctionne à l'aide d'une ventilation forcée.

Une sonde intégrée est positionnée dans l'espace d'exposition, la lecture des données va permettre à l'appareil de calculer les efforts à fournir pour atteindre et se maintenir à la valeur de consigne. Lorsque le taux d'HR est trop élevé, l'appareil va condenser la vapeur d'eau et la stocker dans le réservoir¹⁵, à l'inverse lorsque le taux est trop faible, l'appareil va puiser dans le réservoir pour vaporiser de l'eau dans le système. Des niveaux minimum et maximum de ce réservoir d'eau étant définis, il est nécessaire d'assurer un suivi afin de « vidanger » ou de remplir ce réservoir en fonction des besoins.

Pour un système de régulation par condensation/évaporation à ventilation forcée, le comportement courant est celui-ci-dessous :

¹⁵ *Ce genre de réservoirs constituent un risque de développement de germes tels que des bactéries. Ils nécessitent une désinfection régulière.*



Graph. 2 : Exemple d'une régulation mécanisée. Issu de **Goli 2017**.

Dans cette publication nous observons la régulation mécanisée¹⁶ d'une vitrine par condensation/évaporation, la consigne de 45 % est atteinte de façon durable et nous retrouvons une correction mécanique dans le comportement. Cependant les variations semblent plus nombreuses qu'avec le système de PEM, bien que seuls huit jours soient présentés ici contre un mois pour les PEM, il faut donc se méfier de l'effet « zoom ».

La courbe en pointillés bleus représentant l'humidité relative de l'environnement proche non régulé et la courbe rouge, celle de l'environnement régulé par un système actif « standard » proposé par Giacomo Goli en 2017.

¹⁶ Également présenté par **Barette 1985** et **Michalski 1985**

Régulation par Gel de Silice, Prosorb™ :

La régulation par sorbants d'humidité tel que le Gel de Silice est une régulation passive, c'est-à-dire qu'elle est faite par modification de l'équilibre thermodynamique¹⁷. Cela est réalisé à l'aide de matériaux tampons qui vont adsorber et désorber de la vapeur d'eau en fonction de leur conditionnement.

Le matériau que nous allons étudier est la solution Prosorb™, proposée par Long Life for Art. Conditionné en cassette de 950 g, il est supposé être un très bon adsorbeur d'humidité dans la plage de 30 à 60 % d'humidité relative. Notons que d'autres matériaux¹⁸ pourraient être intéressants tels que les sels saturés et autres matériaux tampons.



Illustration 5 : Présentation d'une cassette de silice. ©Long Life for Art.

Ce dernier se place dans l'espace d'exposition, il est cependant préférable d'organiser le lieu de façon à camoufler sa présence :

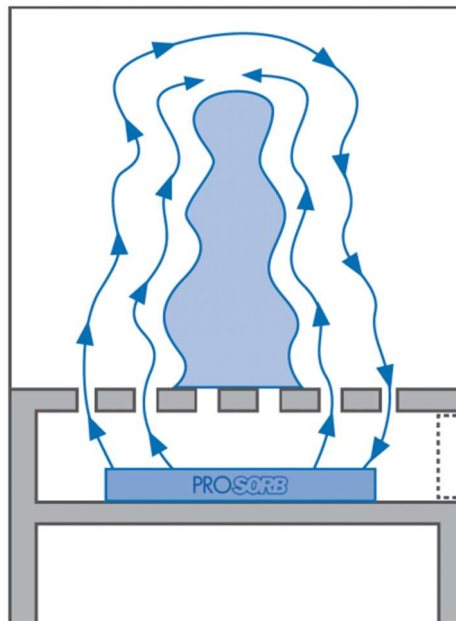


Illustration 6 : Schéma proposant l'installation d'un système de régulation via cassette Prosorb™. ©Long Life for Art.

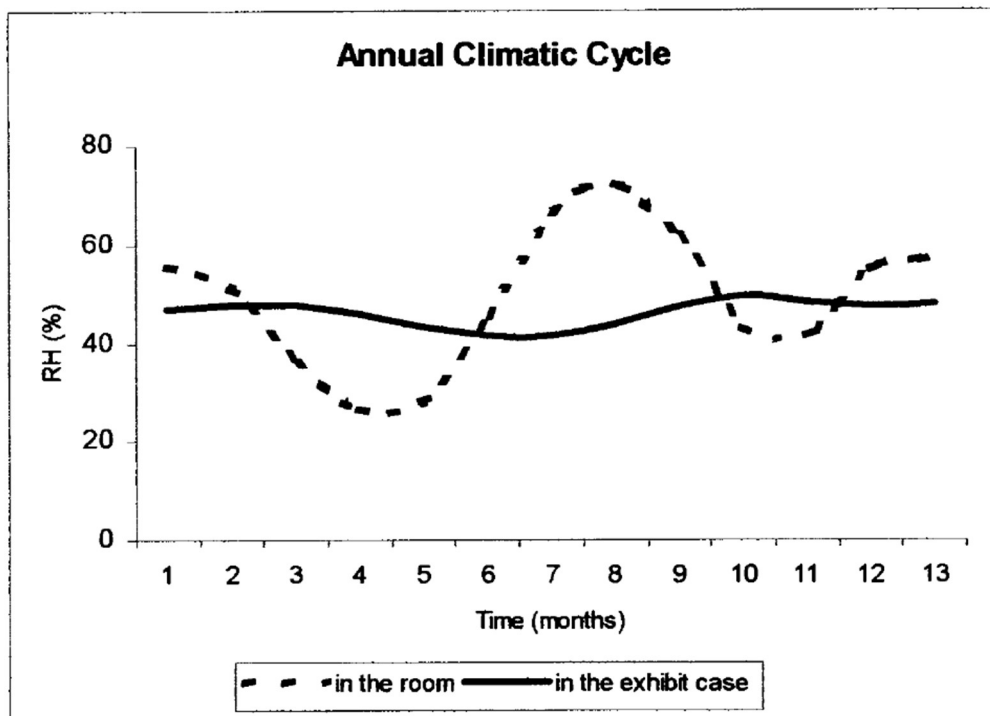
Notons que dans notre cas, une ventilation de brassage a été ajoutée afin de maximiser les échanges et accélérer la régulation.

¹⁷ **Tétreault 2018**

¹⁸ **Eggert 2020 et Melin 2007**

La régulation étant non mécanisée et reposant sur une modification de l'équilibre naturel, il est attendu que l'impact de ce système soit plus progressif, de fait la consigne sera atteinte plus lentement. De plus, les perturbations climatiques ne seraient pas corrigées instantanément mais de façon plus lente et avec un décalage temporel lié à l'inertie du système en place. Nous nous attendons plus généralement à une courbe qui va suivre les variations de l'extérieur avec un léger décalage temporel et surtout une amplitude bien plus basse, ce qui maintiendrait l'environnement dans une phase acceptable pour la conservation.

Un exemple de cela est observable à travers ce graphique¹⁹ présentant l'humidité relative dans une pièce non régulée (pointillés) et une vitrine régulée à l'aide de gel de silice (trait noir).



Graph. 3 : Exemple d'une régulation passive. Issu de **Weintraub 2002**.

¹⁹ **Weintraub 2002**

Présentation des vitrines étudiées :

Enfin pour étudier ces systèmes, nous nous reposerons donc sur un corpus de 8 vitrines différentes : Trois vitrines correspondant aux systèmes des PEM, deux vitrines pour les climatisations intégrées et enfin trois vitrines pour la régulation passive à l'aide de cassettes Prosorb™. Ces vitrines sont dispersées sur quatre sites et vont être présentées désormais.

La vitrine du « Voile de la Vierge » dans la cathédrale de Chartres :

Située dans la chapelle Saint Piat²⁰, lieu de présentation du trésor dans le chevet de la cathédrale de Chartres (28), cette vitrine présente la relique dite du « Voile de la Vierge ». Elle est réalisée en verre et en acier inoxydable plaqué de laiton. Réalisée par Goppion SA, société italienne bien connue, elle présente un volume de 2,4m³. Lors de sa fabrication, une attention toute particulière a été accordée à l'étanchéité, car un joint magnétique doublé d'un joint pincé sous pression ont été installés. Ainsi le taux de renouvellement d'air est de 0,07 fois le volume par jour²¹.



Illustration 7 : Prise de vue de la vitrine du voile de la Vierge à Chartres. ©Goppion.

Cette vitrine est équipée d'un système de PEM associant, deux membranes de 7x7 en sens alternés accompagnés de leurs supports, un boîtier de contrôle FluXor™ connecté permettant l'accès aux données via « Preservarium », une sonde HR/T interne et une externe, ainsi qu'un système de contrôle de l'activité d'éclairage et une alarme de sécurité eux aussi reliés au FluXor™, accessible via la plateforme en ligne également.

La consigne d'H.R. est de 56 % et les données sont enregistrées à la minute via le boîtier.

²⁰ Sa position est mise en évidence sur le plan **[A.1.1]**, cette notation faisant référence aux annexes.

²¹ Et ce malgré le fait qu'elle soit ouvrable des deux côtés et présente un support coulissant pour extraire le reliquaire.

Les premières données accessibles débutent au 27.02.2020 et jusqu'au 09.12.2022²².

En effet, à la suite d'une ouverture et probable mauvaise manipulation, le système a été complètement dérégulé et a dû être changé le 09.12.2022. Une problématique de qualité de connectique a également été soulevée, les broches plaquées « grains d'or » ont été remplacées par des fourches en or pour les boîtiers FluXor™ suivants afin d'éviter un vieillissement prématuré des connectiques qui perturberait le fonctionnement du système.

Les membranes sont positionnées « en cloisons » sous une grille au pied du socle de la relique.

Cette vitrine présente le voile de la Vierge et son reliquaire et les matériaux présents sont principalement organiques (textiles et bois) et métalliques.

La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :

Cette vitrine est située à Cuffy (18), dans l'église Saint Maurice et plus précisément dans la salle de présentation de son trésor.



Illustration 8 : Prise de vue de la vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy. © Promuseum

Réalisée par le fabricant Promuseum™® en verre et acier inoxydable. Elle présente un volume d'exposition de 3,5 m³ associé à un espace technique de 0,5 m³.

Cette dernière s'ouvre sur le côté gauche, l'étanchéité est assurée par un joint en polymère. Ce dernier a été coupé après pose, ce qui permet une correspondance totale des bords à la fermeture.

²² L'ensemble des informations étaient disponibles au sein du LRMH ainsi que communiquées par N. Buis.

Lors de la mise en place de cette vitrine, un taux de renouvellement de 0,2 fois le volume par jour a été mesuré.

La consigne est de 60 % d'H.R. et pour cela un système de PEM a été installé. Il s'agit de quatre membranes de 7x7 en sens alternés « en cloison », connectées à un boîtier FluXor™ connecté.²³ Ces éléments sont positionnés dans l'espace technique situé sous l'espace d'exposition, des percements ont été réalisés pour assurer la continuité climatique entre les deux éléments.

Les données sont enregistrées et accessibles via « Preservarium » depuis le 27.05.2021 pour un enregistrement à la minute.

Cette vitrine présente un support coulissant pour l'Ex-Voto, pour cela des rails ont été positionnés entre l'espace technique et celui d'exposition.



Illustration 9 : Prise de vue de la vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy et mise en évidence du système à support coulissant. ©Promuseum

Ces rails étant positionnés au niveau des interstices entre l'espace d'exposition et l'espace technique, les performances de régulation climatiques sont altérées car une mauvaise circulation a lieu entre ces deux volumes.

Une ventilation mécanique a donc été ajoutée pour améliorer ce système et retrouver les performances attendues.

Toute l'installation avait été vérifiée et remontée à ce moment-là.

Les matériaux présentés sont essentiellement organiques, constitutifs de l'Ex-Voto : bois, textiles, cordages.

²³ Information fournie par N. Buis.

La vitrine du reliquaire de Saint Caprais à Saint Vrain :

Cette vitrine est la première tentative d'installation du système PEM, installée dans le bas-côté nord de l'église de Saint Caprais à Saint Vrain (91) en 2008. La vitrine est en verre et en bois, il s'agit d'un réemploi de l'ancienne à laquelle a été ajouté un joint pressé afin d'améliorer l'étanchéité entre la vitrine et son support.



Illustration 10 : Prise de vue de la vitrine de la chasse de St Caprais. ©LRMH - Peyre

Elle est équipée de deux membranes 5x5 alternées, positionnées « en cloison », le tout contrôlé par un boîtier FluXor™ première génération associé à une sonde interne. Ces membranes sont positionnées à l'arrière de la relique sous une grille métallique assurant la protection des membranes.

La consigne est de 60 % d'H.R.

L'enregistrement des données se fait à l'aide d'une centrale d'enregistrement auxiliaire de type CimTrace® et il est à noter que l'enregistrement des données extérieures à la vitrine a cessé en juillet 2022 pour cause de perte de la sonde concernée.²⁴

La vitrine présente des matériaux organiques (bois) et métalliques constitutifs de la dorure.

²⁴ Informations disponibles au sein du LRMH.

Les cinq vitrines de la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer :

Ces cinq vitrines sont situées dans la crypte de la basilique Notre Dame²⁵ de Boulogne-sur-Mer (62), plus précisément dans la salle du trésor d'Art Sacré.

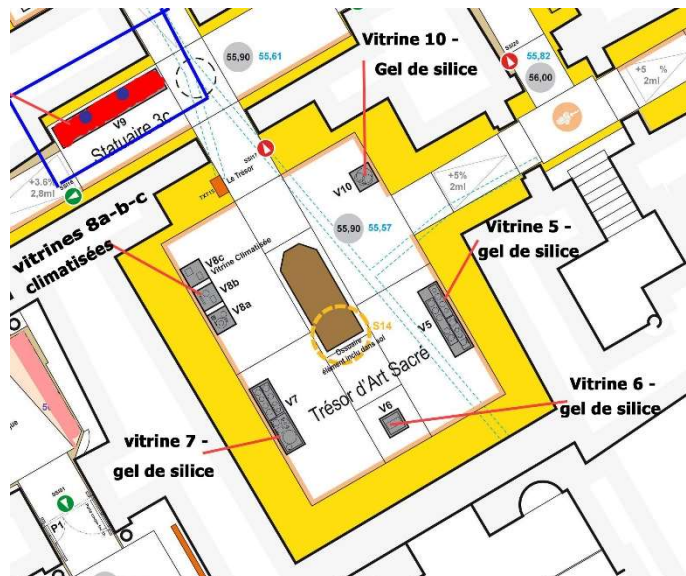


Illustration 11 : Extrait du plan de la crypte de la basilique que Boulogne-sur-Mer, mise en évidence de la salle étudiée. © LRMH.

Il s'agit en effet des vitrines 8a et 8c pour les vitrines climatisées ainsi que des vitrines 5, 6 et 10 pour les vitrines à régulation passive via gel de silice. Toutes ces vitrines ont été réalisées en même temps par l'entreprise Goppion SA lors d'une grande vague de restauration en lien avec l'ouverture à la visite du site et la présentation des biens culturels au public achevée en 2015. Ces dernières présentent des volumes variables et sont toutes supposées étanches, la norme standard étant dans la tranche des 0,3-0,5 fois le volume par jour. Elles sont réalisées en verre et acier, ouvrables sur le pan en verre avant via un système de goupilles sécurisées.

Dans le but de faire perdurer l'étanchéité, les joints de toutes les vitrines ont été remplacés en 2018 par Goppion qui recommande de les remplacer tous les 3 ans. Notons la présence dans cette salle d'un déshumidificateur se mettant en marche dès que l'environnement atteint les 60 % d'H.R.²⁶.

²⁵ Dont le plan général est présenté en [A.1.2].

²⁶ L'ensemble des informations ont été fournies par Mme Tonnel.

Les vitrines 8a et 8c sont intimement liées car faisant partie d'un même îlot, bien que leur fonctionnement soit indépendant. Chacune est équipée d'un EBC 10™ de chez miniClima®.



Illustration 12 : Prise de vue présentant les vitrines 8 a, b et c de la salle d'Art Sacré. ©LRMH – Peyre.

La vitrine 8a (à gauche) d'un volume de 0,58 m³ et d'une consigne de 50 % d'H.R., elle protège deux statues de la Vierge, l'une en bois et l'autre en ivoire.

La vitrine 8c (à droite) offre un volume de 0,58 m³ et une consigne de 45 % d'H.R. Un Christ en ivoire et deux calices métalliques y sont conservés.

Les vitrines 5, 6 et 10 sont régulées passivement via gel de silice, il s'agit de cassettes Prosorb™ de 950g.



Illustration 13 : Prise de vue présentant la vitrine 5. ©LRMH-Peyre.

La vitrine 5 présente un volume de 1,92 m³ et une consigne à 40 % d'H.R., nous y retrouvons un ensemble de 11 objets d'offices, calices et patènes en matériaux métalliques précieux.



La vitrine 6 offre un volume de 0,58 m³ et une consigne à 40 % d'H.R., il s'agit d'un imposant ostensor en métaux précieux.

Illustration 14 : Prise de vue présentant la vitrine 6. ©LRMH-Peyre

Enfin la vitrine 10 dispose d'un volume de 0,58 m³ et une consigne à 40 % d'H.R. également. Nous y retrouvons trois reliquaires dont un crucifix, un reliquaire sur pied et le « Saint-sang » : un émail cloisonné datant de la période médiévale.

Les matériaux présentés sont métalliques.



Illustration 15 : Prise de vue présentant la vitrine 10. ©LRMH-Peyre

Chapitre 2 : Méthode de comparaison.

Dans un premier temps, le principal objectif a été de récolter les données climatiques des vitrines et de leurs environnements proches, puis il a fallu traiter les données afin de pouvoir les comparer entre elles. Enfin un système de comparaison basé sur une liste de critères a été mis en place et ce afin de pouvoir attribuer des notes et tirer des comportements généraux des différents systèmes étudiés.

La collecte des données :

Les données de conservation :

Pour ce qui est des vitrines de Chartres et de Cuffy, la tâche a été des plus aisées, ces dernières étant équipées de boîtiers FluXor™ dernière génération et communiquant, il a suffi de se connecter à la plateforme « Preservarium » et d'exporter les données désirées. La vitrine de Saint Vrain étant équipée d'une installation plus ancienne, il a fallu se rendre sur place pour exporter les données de la centrale d'enregistrement auxiliaire de type Cimtrace™.

Enfin, les vitrines de Boulogne-sur-Mer, seules des mesures manuelles au nombre de deux par jour étaient disponibles, ce qui était insuffisant pour réaliser un traitement de données adéquat. Des capteurs de type Testo 175H1 ont alors été empruntés au nombre de 6 à la Haute école Arc. Ces derniers avaient été calibrés la dernière fois en septembre 2020 et l'homogénéité des mesures entre les six capteurs a été vérifiée par nous même le 28 mars 2023.

Afin d'avoir des données suffisantes, les capteurs ont été positionnés pour une période de deux mois entre le 31 mars et le 31 mai 2023. C'est cette limite qui a défini la période d'étude pour ce travail concernant toutes les vitrines.

Les données générales :

Il s'agit ici de données diverses qui peuvent aller de la modulation du système à son volume de bruit induit en passant par le coût d'achat, d'entretien et de consommation énergétique. Toutes ces informations ont été collectées à travers des discussions avec les responsables concernés, les fournisseurs et la documentation technique des appareils.

Le traitement de données :

Les données de conservation récoltées étant non comparables en l'état, le pas de mesure étant différent entre les données issues de Boulogne-sur-Mer, la plateforme Preservarium ou encore la centrale Cimtrace™, il a donc été nécessaire de normaliser toutes ces informations.

Les données ont été traitées via le logiciel Excel, en suivant la méthodologie dispensée dans le cours de M. Thierry Jacot lors des trois années d'étude, ainsi qu'en se basant sur la publication de Martin Wanielista²⁷ pour la vérification des formules de calculs.

Il a donc été possible de tirer des données statistiques comparables tels que les taux de conformités à la consigne donnée, les pourcentages de variations journalières étant considérées comme bonnes, acceptables ou excessives.

La tranche de % d'humidité relative cible a été définie à plus ou moins 3 % afin de prendre en compte l'hystérésis la plus élevée des systèmes²⁸ (± 2 %) et une acceptation de précision de plus ou moins 1 % d'H.R. pour ce qui est de la consigne.

Les variations journalières ont été classées selon qu'elles sont inférieures à 1 % d'H.R. pour être considérées comme bonnes, entre 1 et 3 % d'H.R. pour être considérées comme acceptables et supérieures à 3 % d'H.R. pour être considérées comme excessives.

Cela peut être considéré comme optimiste mais les données relevées nous ont permis de l'être, de plus à travers cette échelle, en observant les données inférieures à 3 % de variation, nous sommes certains de n'octroyer « aucun ou de légers dommages » pour les matériaux présentant les sensibilités les plus élevées.

Ce seuil a été fixé à ± 5 % d'H.R. par Stefan Michalski²⁹ de l'Institut Canadien de Conservation.

Enfin les données générales ont été calculées afin de pouvoir être mises face à face : les calculs de consommation énergétique ont été réalisés sur une année, les coûts d'entretien sur cinq années et les volumes traités et coûts d'achat ramenés à une unité de régulation.

²⁷ **Wanielista 1996**

²⁸ *Il s'agit du système EBC 10™, voir fiche technique.*

²⁹ **Michalski 2017**

Les critères de comparaison :

Une fois cela réalisé, il a fallu se pencher sur la liste de critères de comparaison, bien que dans l'idée originelle, il ait été question d'une hiérarchisation de ces critères, cela a été oublié afin de laisser libre choix au lecteur de définir lui-même les critères qu'il souhaite favoriser. Ce travail se veut être une proposition de méthodologie de comparaison.

Voici donc la liste des critères de comparaison retenus, ces derniers ont été choisis pour l'intérêt qu'ils suscitent chez les responsables et également en fonction des données qui étaient disponibles et exploitables.

Liste des critères de comparaison.	
Capacité à atteindre la consigne d'Humidité Relative.	Niveau de bruit émis.
Efficacité de la stabilisation.	Plage de température pour bon fonctionnement du système.
Consommation énergétique sur 1 an.	Volume d'air traité par unité de régulation.
Entretien (quotidien et révision du système).	Pérennité du système.
Coût du dispositif à l'achat.	Capacité de modulation.
Temps de stabilisation après ouverture de la vitrine.	Enregistrement de données climatiques intégrées exploitables.

Tableau 1 : Liste des critères de comparaison.

La capacité à atteindre la consigne d'Humidité Relative est intéressante car il s'agit de systèmes installés dans des vitrines présentées au cœur d'environnements climatiquement instables, les consignes sont difficiles à atteindre et à maintenir dans de telles conditions. Ce critère sera directement relié au taux de conformité de l'environnement climatique à la consigne donnée.

L'efficacité de stabilisation sera donnée par les pourcentages de variations journalières respectant les variations inférieures à 1 % d'H.R., entre 1 et 3 % d'H.R. et supérieur à 3 % d'H.R. Pour davantage d'objectivité, seront soustraits les pourcentages de variations journalières de l'environnement proche des vitrines aux données intérieures et l'indice de stabilité sera dissocié de cet environnement proche.

La consommation énergétique sera donnée pour chaque vitrine, calculée à partir de la consommation maximale sur une heure, l'indice sera exprimé en kW/an. Cela correspondra donc à la consommation supérieure en fonctionnement intensif sur une année.

L'entretien sera exprimé en euros déboursés sur 5 ans pour maintenir le fonctionnement de chaque système, la consommation énergétique a été retirée car prise en compte dans un autre critère. Nous retrouvons ici les questions telles que les besoins en employés, les besoins de révision de système, les changements de cassettes de silice ou encore le besoin de vidange des EBC 10™.

Le coût du dispositif à l'achat est un indice exprimé en euros et au prix public. Le choix a été fait de considérer le coût aujourd'hui. En ce qui concerne les systèmes plus anciens tels que l'installation de la vitrine de St Vrain, il a été considéré l'achat d'un matériel équivalent au 10 juin 2023.

Le temps de stabilisation après ouverture est le temps nécessaire au système pour atteindre la consigne après ouverture de la vitrine, cet indicateur est intéressant car il peut être utile pour un lieu d'exposition qui présente un remplacement soutenu. Il est néanmoins important de se souvenir qu'une stabilisation rapide va forcément engendrer une augmentation de variations journalières inadéquates.

Le niveau de bruit émis est exprimé en décibels émis par le système.

La plage de température de bon fonctionnement du système correspond à la plage dans laquelle le système doit être maintenu pour pouvoir fonctionner. Cela est important si l'on se trouve dans un climat particulier présentant des températures particulièrement basses. Ceci est à mettre en relation avec le principe de fonctionnement des systèmes, un condensateur devant atteindre la température de rosée. Si celle-ci est négative, de la glace se formerait ce qui mettrait en péril le bon fonctionnement de cet appareil.

Le volume d'air maximum traité par une unité correspond au volume maximal qui puisse être traité dans des conditions standard, sans prendre en compte les éventuelles chaînes « master/slaves ». Ce critère peut être mis en relation avec le coût d'achat des dispositifs. Au départ il était décidé d'étudier la question du renouvellement d'air des vitrines afin de pouvoir dissocier au maximum le comportement de la vitrine et celui du système de régulation. Cependant, nombre de ces taux de renouvellement étaient manquants et il n'était pas possible dans le temps imparti de réaliser des tests d'étanchéité pour toutes les vitrines dont nous n'avions pas les données.

La pérennité du système apporte quant à elle une part plus générale, il s'agit de savoir combien de temps un appareil peut-il fonctionner et à quel point cette solution est durable. Nous considérons ici la durée de vie en fonctionnement optimal. Cet indice ne peut qu'être évalué car nous n'avons pas de données précises, certains des systèmes étudiés sont installés depuis plusieurs années, nous pouvons alors estimer des durées de vie minimum.

La capacité de modulation est la capacité du système à s'intégrer dans un système déjà existant, la possibilité ou non d'adapter le système en fonction des besoins ainsi que la possibilité de le modifier après installation.

Enfin, la présence d'enregistrement de données climatiques intégrées exploitables est un critère qui se concentre sur le fait que les systèmes soient prévus ou non pour pouvoir assurer un suivi climatique. En effet, il est impossible de savoir si le système fonctionne correctement, s'il est efficace si nous n'avons pas accès aux données climatiques intérieures et extérieures.

Ces critères sont évalués pour chacune des vitrines, en seront tirés des moyennes pour chaque système. Pour évaluer ces critères, une note sera attribuée en suivant l'échelle suivante. Ceci permettra par la suite de réaliser des empreintes graphiques facilement interprétables sous la forme de graphiques radars.

0	Note punitive
1	Non satisfaisant
2	Peu satisfaisant
3	Plutôt satisfaisant
4	Très satisfaisant

Tableau 2 : Echelle de notation des critères.

Chapitre 3 : Analyse des vitrines étudiées.

Dans cette partie seront présentés les résultats de l'exploitation des données climatiques de chaque vitrine ainsi qu'une légère analyse que nous pouvons en tirer sous la forme de graphiques³⁰. Toutes les données confiées ici concernent la période du 31.03.23 au 31.05.23 sauf précision contraire.

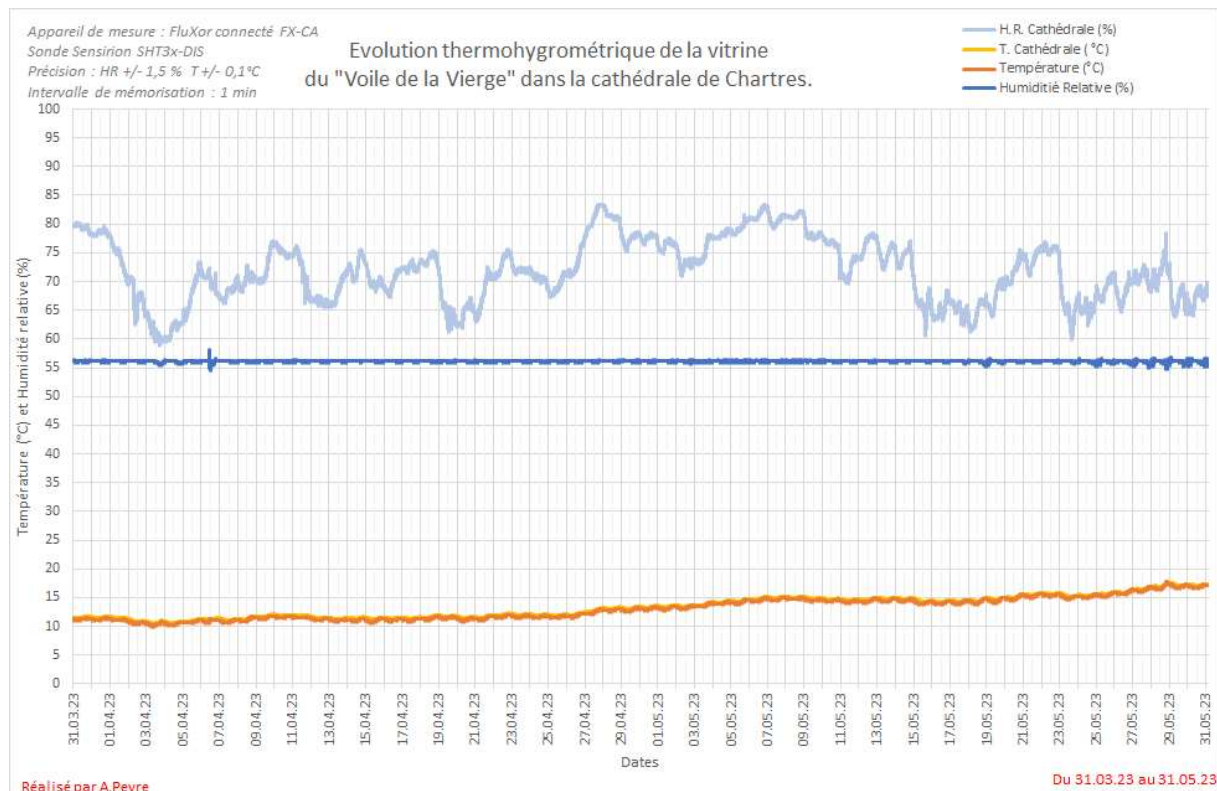
Ces présentations seront succinctes car ne sont pas le cœur du propos de cette étude mais bien un moyen d'obtenir les données qui seront utilisées par la suite : les analyses plus détaillées sont disponibles en annexes (Partie 3).

La vitrine de du voile de la Vierge à Chartres :

L'environnement proche de la vitrine est très instable, la cathédrale de Chartres étant un monument édifié tout au long du XII^{ème} siècle, il y règne un climat particulièrement préjudiciable pour des matériaux tels que les textiles ou encore les métaux. Le fait que la Chapelle de Saint-Piat où est situé le trésor ait été édifiée au XVI^{ème} siècle n'améliore pas les choses.

Alors, pour prévenir des dégradations certaines sur le voile de la Vierge, une vitrine équipée tel que décrit dans le premier chapitre a été mise en place et voici les résultats que nous pouvons en tirer.

Ainsi, sur ce graphique il est possible de voir l'impact de la vitrine sur la qualité de l'environnement climatique. En bleu foncé nous retrouvons l'humidité relative de l'enceinte de la vitrine et en bleu pâle, le tracé de l'humidité relative de la chapelle St-Piat.



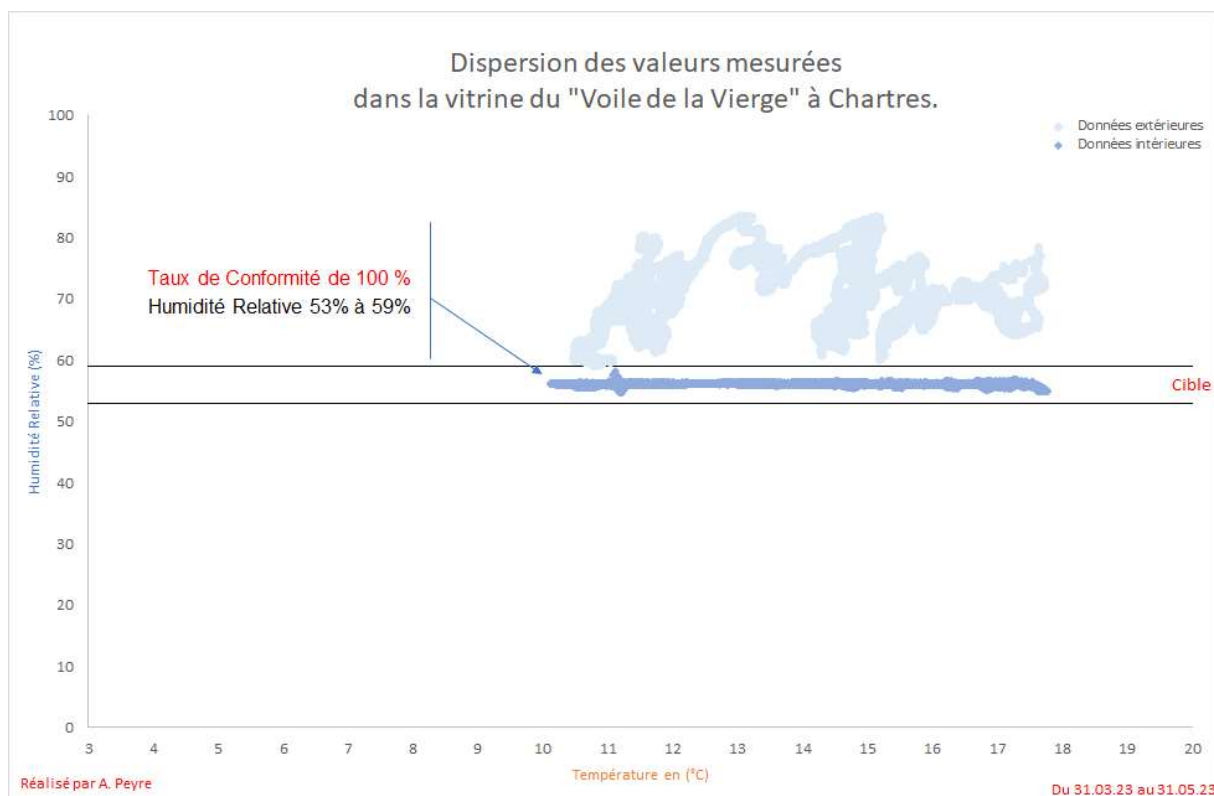
Graph. 4 : Chartres, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.

³⁰ L'ensemble des graphiques ayant été normalisé, la description de lecture faite pour Chartres est valable pour l'ensemble des graphiques de ce chapitre.

Nous pouvons donc retrouver un comportement climatique relativement proche de l'exemple donné dans le chapitre 1 pour un système régulant le climat à l'aide PEM.

La consigne de cette vitrine pour une bonne conservation de ce reliquaire est fixée à 56 % d'H.R. par l'institution responsable. Nous considérons donc une cible à 56 % \pm 3 % d'H.R.

Ainsi le taux de conformité pour la période étudiée est de 100 %, tel que visible à travers ce graphique de type « nuage de points » représentant les données intérieures (bleu foncé) et extérieures (bleu pâle) de l'humidité relative en fonction de la température.



Graph. 5 : Chartres, Dispersion des valeurs mesurées.

Pour ce qui est de la stabilisation³¹, le système permet de passer de 83 % des valeurs considérées comme excessives dans l'église à 87 % des valeurs considérées comme bonnes et seulement 1 % comme excessif.

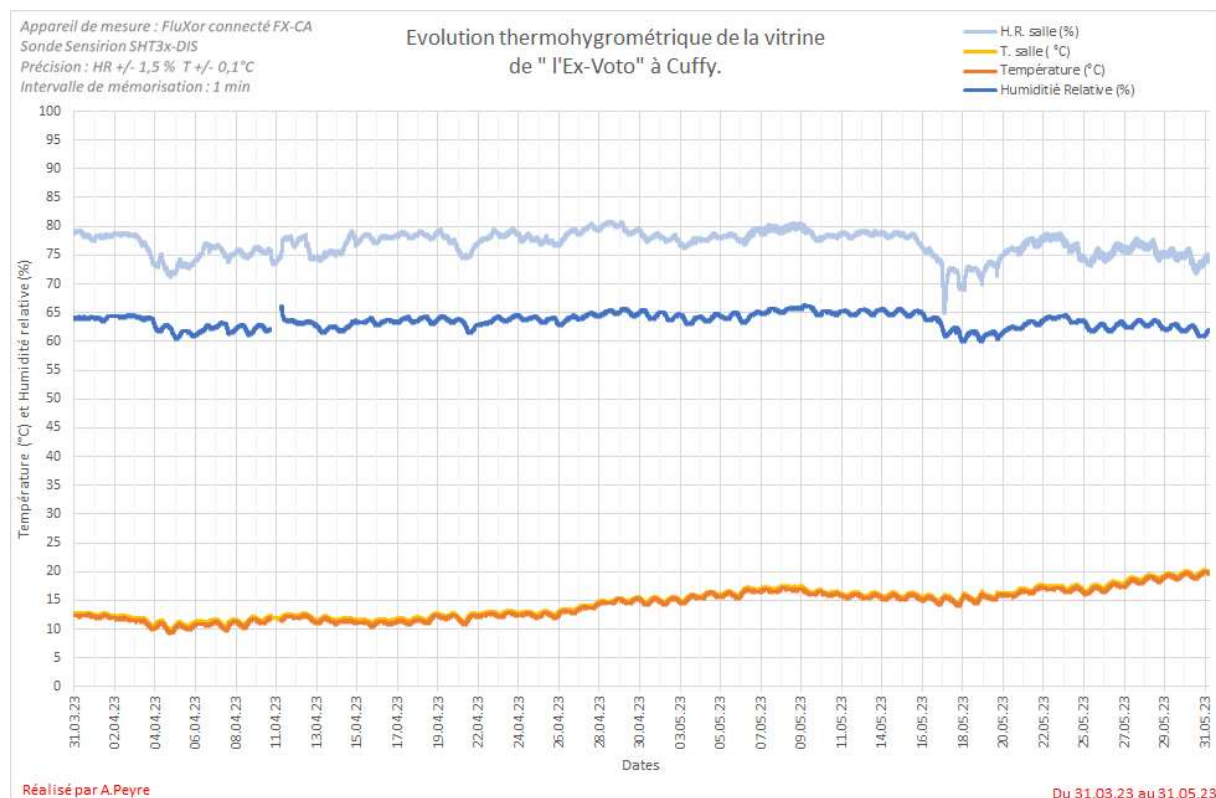
En conclusion, pour ce qui est de la vitrine du voile de la Vierge de Chartes, les résultats sont très satisfaisants³² avec un taux de conformité de 100 % et une éradication des variations journalières considérées comme excessives : passant de 83 % à 1 % du volume de données enregistrées. Cela fait de cette vitrine un bel exemple des capacités idéales du système de régulation par PEM, dans le cas d'un environnement extrêmement instable tel qu'il peut l'être dans la cathédrale de Chartres.

³¹ Voir [A.2.1.4] et [A.2.1.5]

³² Les résultats sont tout à fait similaires pour la période du 10.12.22 au 10.05.23 avec un taux de conformité de 100 % d'H.R. et 4,9 % des variations journalières considérées comme excessives pour un climat hivernal encore plus instable que lors de la période du 31.03.23 au 31.05.23.

La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :

L'environnement proche de la vitrine est également instable à Cuffy tel que nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous. Le système utilisé pour réguler le climat de la vitrine est également basé sur les PEMs tels que présenté dans le 1^{er} chapitre.



Graph. 6 : Cuffy, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.

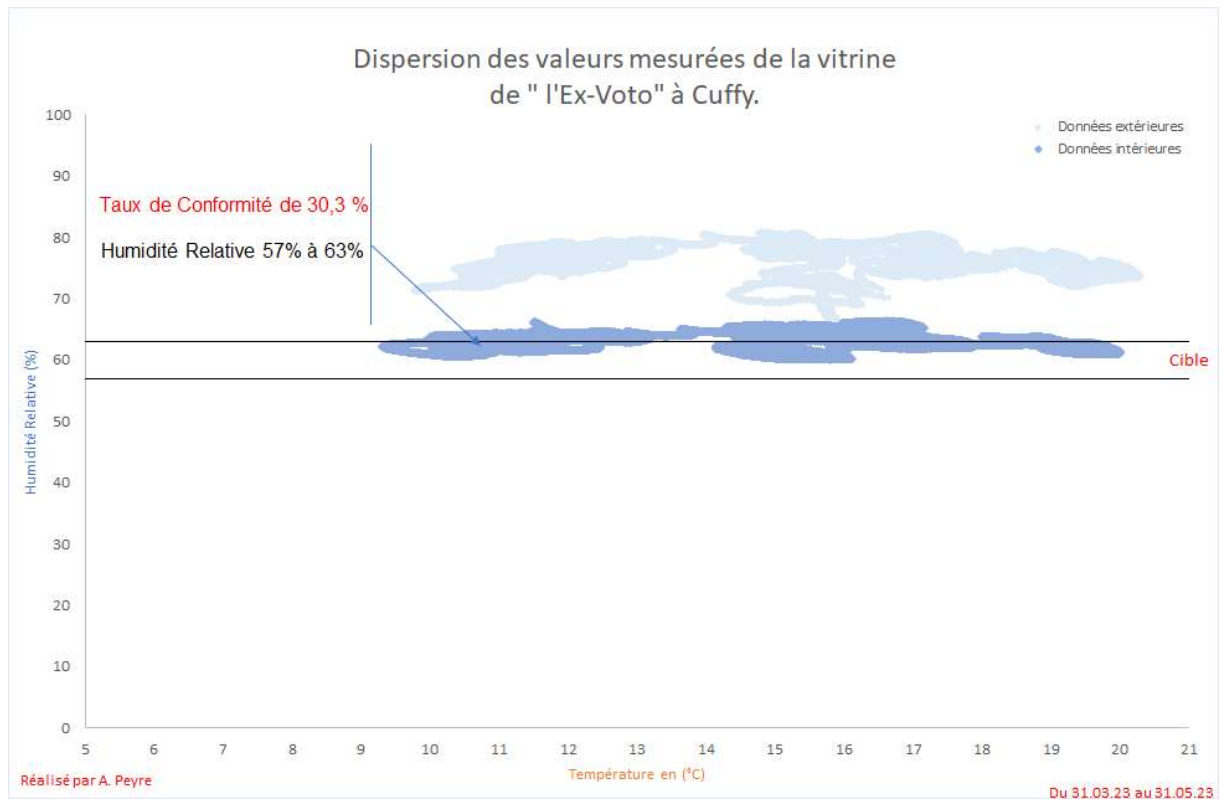
Nous observons ici un comportement qui ne semble pas correspondre à l'exemple de comportement dit « idéal » d'un tel système tels que peut l'être l'exemple de Chartes. Ici la courbe d'humidité relative de la vitrine semble suivre les variations de l'humidité relative extérieure tout en réduisant les amplitudes de variation, le tout avec un écart constant d'environ de 15 % inférieur à l'humidité relative de l'extérieur.

Le climat de la salle d'exposition est plus stable que celui que nous retrouvons à Chartres, mais le climat à l'intérieur de la vitrine est tout de même légèrement plus stable que celui de la salle d'exposition.

Nous observons ici³³ un passage de 16 à 2 % de variations journalières d'humidité relative considérées comme excessives et une augmentation de 6 à 27 % des variations journalières d'H.R. considérées comme bonnes. La majorité des variations journalières sont cependant considérées comme acceptables dans les deux cas, environ 70 % des données enregistrées.

³³ Voir [A.2.2.4] et [A.2.2.5]

Pour ce qui concerne les résultats de la période étudiée, la consigne d'H.R. recommandée pour la bonne conservation de cet Ex-Voto constitué de matériaux organiques est de 60 % d'H.R.
Sur la période du 31.03.23 au 31.05.23, le taux de conformité à 60 % \pm 3 % est de 30,3 %.



Graph. 7 : Cuffy, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine.

En conclusion, les objectifs que l'on peut attendre d'un tel système de régulation par PEM ne sont pas atteints dans cette vitrine : le taux de conformité est bien trop faible.
Cependant, nous observons que le système réussit tout de même à exercer une stabilisation suffisante pour que les objets situés dans la vitrine ne souffrent trop des variations de l'humidité relative.

La vitrine du reliquaire de St Caprais à St Vrain :

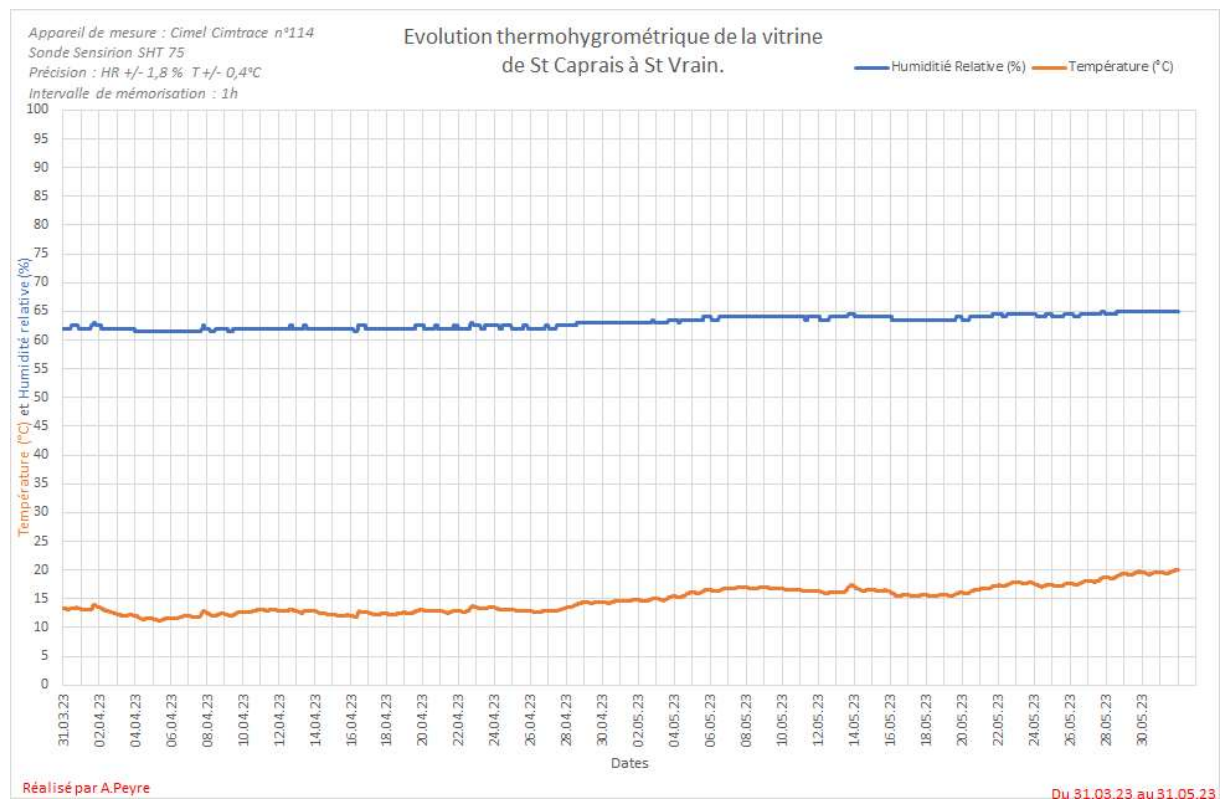
La vitrine du reliquaire de Saint Caprais est située sur le bas-côté nord de l'église située au centre de la ville de Saint Vrain. Etant dans le bas-côté nord, il est reconnu qu'il s'agit probablement d'un des espaces les plus humide et instable que l'on puisse retrouver dans ce lieu. Malheureusement, la sonde enregistrant les données climatiques de l'environnement proche de cette vitrine a cessé de fonctionner, nous n'avons donc pas ces données pour la période étudiée.

Ces dernières ont été évaluées à partir de données antérieures à notre disposition.

Il est estimé qu'il s'agit également d'un climat très instable et humide, il n'est pas adapté à la bonne conservation de cette chasse.

D'autant plus que nous savons que cette vitrine équipée de PEM a été installée en 2008 pour lutter contre des développements de microorganisme à la surface du reliquaire³⁴.

Les résultats du système de régulation de la vitrine sont les suivants :

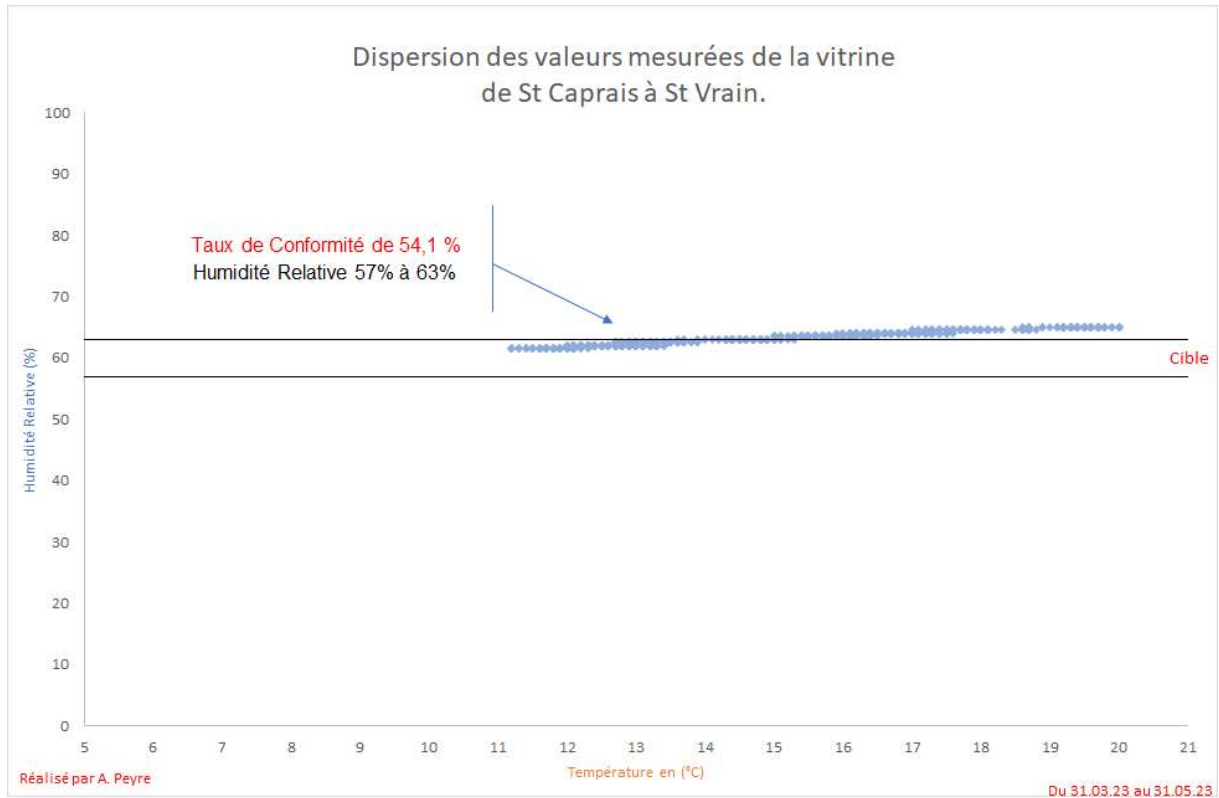


Graph. 8 : St Vrain, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.

Nous retrouvons ici un comportement proche de ce qui est attendu d'un système PEM. La courbe est relativement plane mais semble progressivement s'éloigner de la consigne de 60 % d'H.R.

³⁴ **Bousta 2011**

En effet, le taux de conformité est de 54,1 % comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous.



Graph. 9 : St Vrain, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine.

En revanche, en ce qui concerne la stabilisation, cette dernière est très satisfaisante³⁵ car en ce qui concerne la période d'étude, la variation journalière maximale atteinte est de 1 %.

En conclusion, le système installé sur cette vitrine est très satisfaisant en termes de stabilisation, sur la période étudiée, l'ensemble des variations journalières de l'humidité relative sont considérées comme bonnes. Mais le taux de conformité de 54,1 % est inférieur aux attentes.

³⁵ Voir [A.2.3.4]

Les vitrines des Boulogne-sur-Mer :

L'ensemble des cinq vitrines de la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer va être traité dans cette partie car elles sont toutes les cinq situées dans la même pièce.

La crypte est située dans les sous-sols de la basilique, elle-même située sur un éperon rocheux à environ trois kilomètres de la Manche. Le climat y est particulièrement humide et instable.

Sur la période d'étude, les données d'humidité relative enregistrées dans la salle d'Art Sacré de la crypte oscillent entre 56 et 83 % pour une moyenne à 76 % alors même qu'un déshumidificateur est mis en route dès que le seuil de 60 % d'H.R. est atteint. Le climat y est également très instable³⁶.

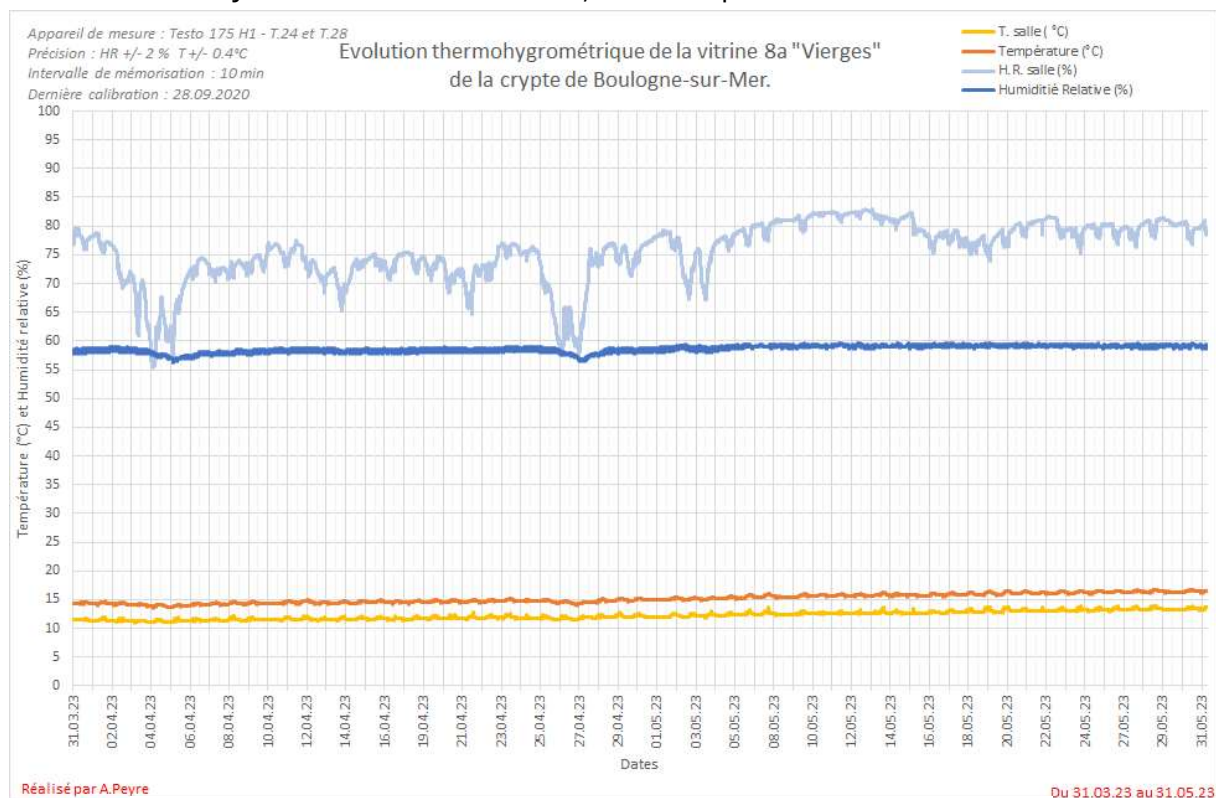
Rappelons que le seuil de 75 % d'H.R. est considéré comme le point de danger pour le départ de développement de micro-organismes de type moisissures³⁷ en moins de 30 jours³⁸..

Les vitrines régulées via EBC 10™ :

Les vitrines 8a et 8c présentent le même système de régulation, la solution EBC 10™ de miniClima® et seront présentées conjointement, les résultats étant très similaires.

Cependant les consignes sont différentes car les matériaux constitutifs des objets varient. Ainsi la vitrine 8a a une consigne de 50 ± 3 % et la vitrine 8c a une consigne de 45 ± 3 % d'H.R.

Pour ce qui est de la vitrine 8a, l'humidité relative oscille entre 57 et 60 % d'H.R. avec une moyenne à 59 %. La variation journalière maximale est de 1,6 % sur la période d'étude.



Graph. 10 : Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8a.

³⁶ Voir [A.2.4.1]

³⁷ Rappelons qu'à une H.R. strictement supérieure à 65 % le risque d'un développement de moisissure sur les objets est grand si cela a lieu sur une période prolongée de plus de 72 heures.

³⁸ Michalski 2017

La vitrine 8c offre des mesures d'H.R. oscillant entre 59 et 60 % pour une de moyenne de 59 % d'H.R. La variation journalière maximale mesurée est de 1,4 %.

Le comportement des courbes de l'humidité³⁹ relative de la vitrine correspond à ce qui est attendu d'un système de régulation actif mécanisé, nous observons une correction permanente de l'H.R. et la courbe suit les variations importantes de l'extérieur en réduisant au maximum les amplitudes tels que l'on peut le voir autour des 4 et 6 avril et des 25 et 27 avril.

Les taux de conformité⁴⁰ sont de 0 % pour les deux vitrines, le système ne parvenant pas à atteindre la consigne. Mais nous ne dépassons pas la valeur de 60 % d'H.R., ce qui permet de rester malgré tout à 5 points du premier seuil de danger situé à 65 % d'H.R.

Les performances de stabilisation⁴¹ sont satisfaisantes, la totalité des variations journalières « excessives » a été corrigée et nous avons plus de 75 % des valeurs considérées comme bonnes, cela atteint 89 % des valeurs dans le cas de la vitrine 8a.

En conclusion, le système de régulation de type EBC 10™ utilisé pour réguler le climat des vitrines 8a et 8c de la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer est décevant en ce qui concerne la capacité à atteindre la consigne. Mais il est satisfaisant en ce qui concerne la stabilisation de l'environnement climatique et la réduction des amplitudes de variations.

³⁹ Voir [A.2.4.2] et [A.2.4.3].

⁴⁰ Voir [A.2.4.4] et [A.2.4.5].

⁴¹ Voir [A.2.4.8] et [A.2.4.9].

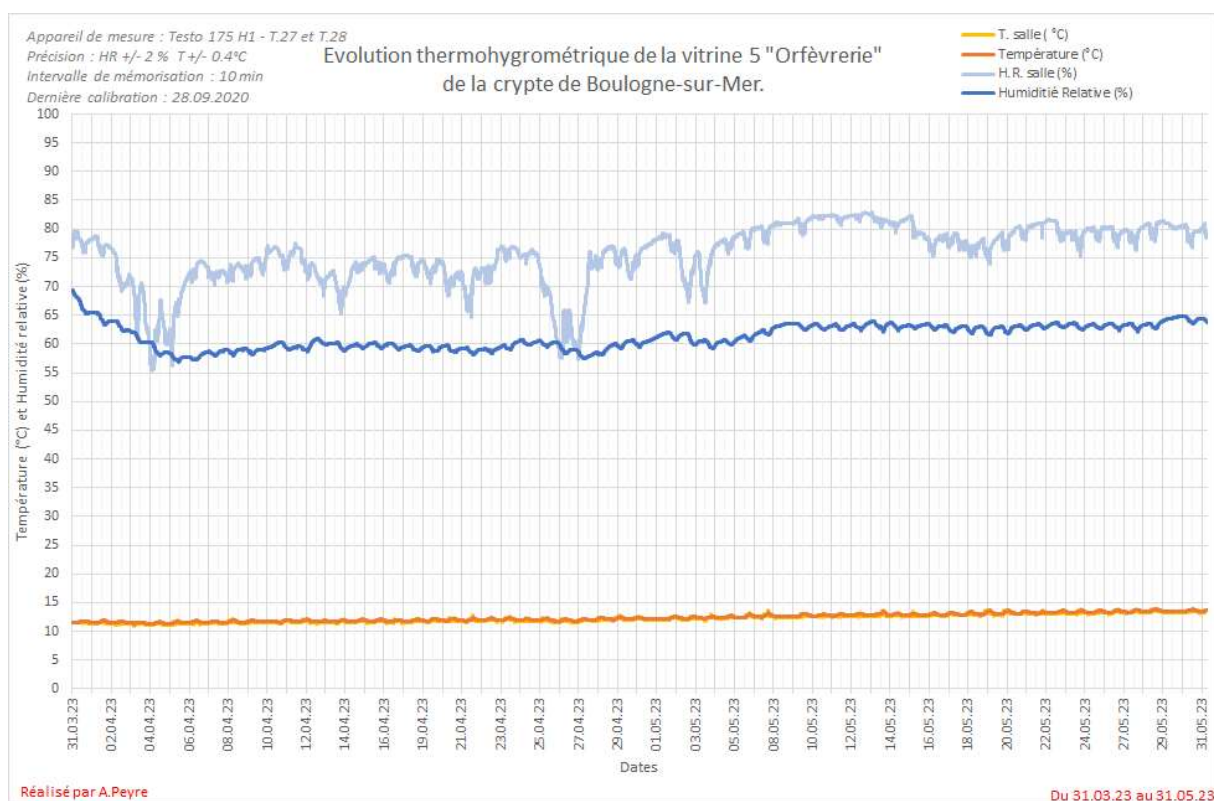
Les vitrines régulées par cassettes de Prosorb™ :

Les vitrines 5, 6 et 10 de la crypte sont régulées via cassettes de gel de silice, il s'agit de cassettes de 950g de type Prosorb™.

Ces dernières seront également présentées conjointement, une analyse plus développée pour chaque vitrine étudiée étant disponible en annexes.

La vitrine 5 est équipée de 5 cassettes avec pour consigne, le seuil de 40 % d'H.R., les vitrine 6 et 10 sont, elles, équipées de 2 cassettes chacune et ont pour consigne 45 % d'H.R.

Le comportement de la vitrine 5 est le suivant :



Graph. 11 : Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 5.

Le comportement de la courbe de l'humidité relative est telle qu'attendue, nous retrouvons toutes les variations d'humidité relative de l'environnement proche mais avec un léger décalage temporel et une forte baisse des amplitudes de variations. Remarquons la longue chute au départ, cette dernière est liée à l'ouverture de la vitrine pour positionner les capteurs ainsi que le temps nécessaire pour que l'équilibre thermodynamique soit instauré pour la stabilisation. De plus la courbe descend progressivement de 70 à 58 % pour tenter de se stabiliser à 60 % à date du 08.04.23, cependant elle se stabilisera réellement à 64 % d'H.R. dans la seconde période de l'étude à partir du 08.05.23.

L'apparence des courbes⁴² des deux autres vitrines est tout à fait comparable, à l'exception d'une remontée fulgurante de 5 points observable à la fin de la période pour la vitrine 6, vitrine qui parvient cependant à se stabiliser à un niveau inférieur, aux alentours de 55 % d'H.R.

⁴² Voir [A.2.5.2] et [A.2.5.3].

Les taux de conformité⁴³ sont à 0 % pour les trois vitrines, notons que les vitrines 5 et 10 s'approchent tout de même des 65 % d'H.R. de façon constante, ce qui nous place dans une situation risquée. Si nous dépassons ce seuil sur une période prolongée de plus de 72 h successives, le risque de développement fongique est réel⁴⁴, dépendant du support et de la température.

Pour ce qui est de la stabilisation⁴⁵, ces vitrines permettent de réduire à un maximum de 2 % les variations journalières considérées comme excessives, rappelons que 61 % des variations journalières étaient excessives dans l'environnement de la salle d'Art Sacré.

Mais, la répartition des variations, bonnes et acceptables, est irrégulière pour ces trois vitrines : la vitrine 5 présente 25 % de variations bonnes pour 75 % d'acceptables.

La vitrine 6 offre 67 % de bonnes variations pour 31 % du volume dit acceptable.

Enfin, la vitrine 10 présente une répartition équilibrée avec 48 % des variations journalières d'humidité relative dites bonnes et 52 % sont acceptables.

En conclusion, les résultats de la régulation par gel de silice sont assez variables, si les valeurs consignes ne sont jamais atteintes dans les conditions de notre étude, la stabilisation est plutôt acceptable voir satisfaisante pour la vitrine 6.

Cela est en corrélation directe avec le fait que les cassettes de cette vitrine aient été changées le 31 mars⁴⁶. La différence entre les vitrines 5, 10 et la vitrine 6 semble être une mise en évidence de l'effet de saturation du gel de silice.

Etant donné que nous n'avons pas de données concernant des périodes antérieures il est difficile de savoir si l'atteinte de la consigne est freinée par une perte d'étanchéité ou simplement si ce système ne le permet pas dans ces conditions, cela étant valable pour toutes les vitrines de Boulogne-sur-Mer⁴⁷, les consignes n'étant jamais atteintes mais la stabilisation étant effective.

Synthèses des analyses :

Nous retrouvons ci-après deux graphiques récapitulatifs des résultats obtenus par chaque vitrine, que ce soit en termes de respect de la consigne ou d'impact sur la stabilisation du climat, et ce pour chaque système de régulation.

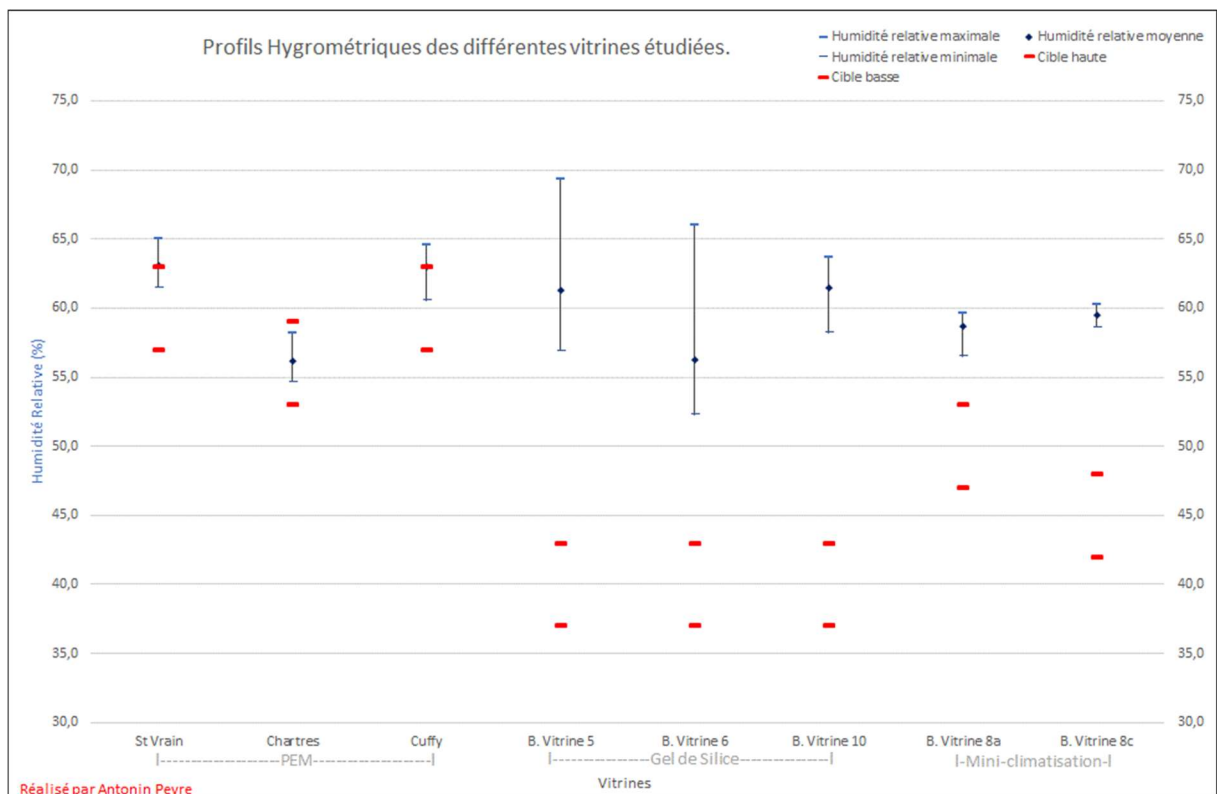
⁴³ Voir [A.2.5.4], [A.2.5.5] et [A.2.5.6].

⁴⁴ **Roquebert 2002**, appuyé par le retour sur expérience du pôle microbiologie du LRMH.

⁴⁵ Voir [A.2.5.10], [A.2.5.11] et [A.2.5.12].

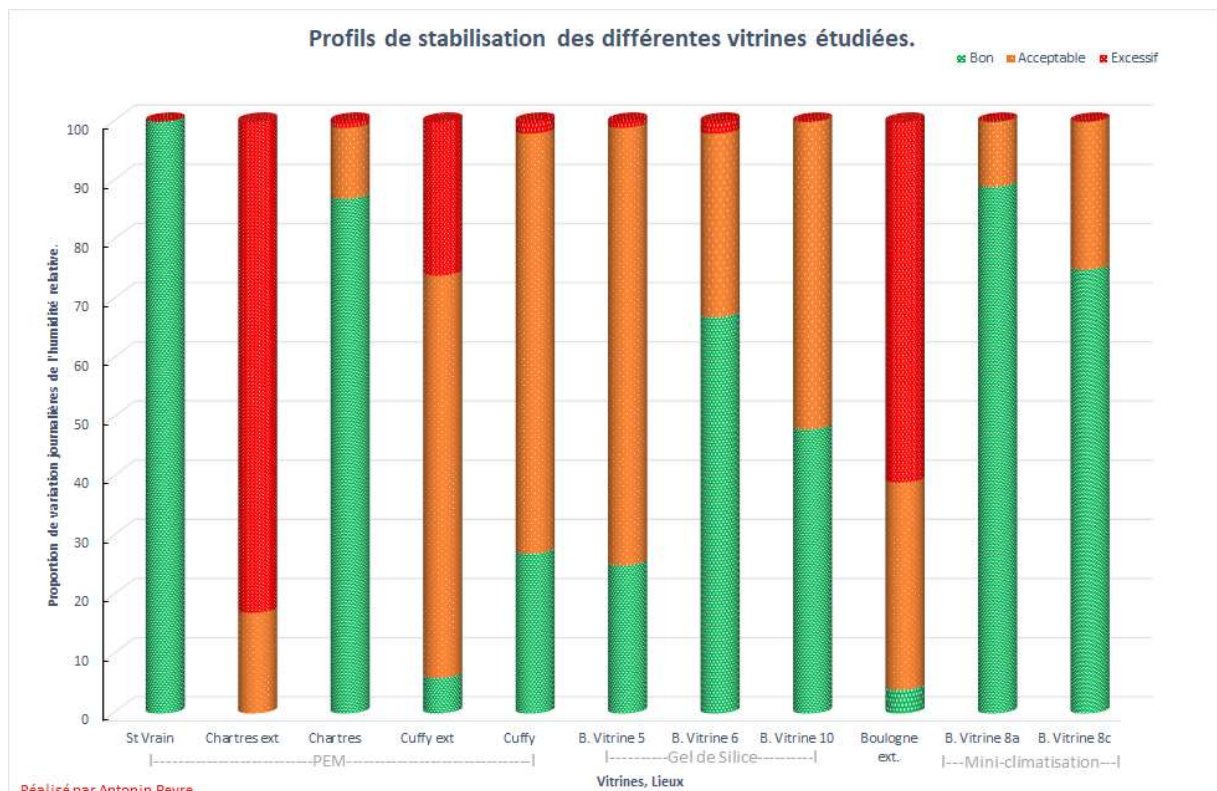
⁴⁶ Information communiquée par Mme Tonnel.

⁴⁷ EBC 10™ et cassettes Prosorb™



Graph. 12 : Profils hygrométriques des vitrines étudiées.

Sur le second apparaissent les statistiques de l'extérieur sous la dénomination « ext » de façon à bien se rendre compte de la qualité de stabilisation ou non de chaque système.



Graph. 13 : Profils de stabilisation des vitrines étudiées.

Chapitre 4 : Comparaison des résultats des analyses.

Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer sur l'étude de ces vitrines à travers les critères définis dans le chapitre 2.

Chaque indice sera précisé pour chaque critère et les notes de 1 à 4 seront ainsi attribuées, le tout présenté dans un tableau récapitulatif.

Le critère de consigne :

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Taux de conformité	54,1 %	100 %	30,3 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Notes	3	4	2	1	1	1	1	1

Tableau 3 : Evaluation de la consigne.

Les taux de conformité retranscrits ici sont les taux présentés dans le chapitre 3, nous observons donc que les systèmes de régulation par gel de silice ou mini climatisation ne sont pas du tout satisfaisant dans les conditions de l'étude. Les résultats des PEM sont plus variés, Chartres offre un taux de 100 %. Saint Vrain présente un taux de 54,1 % ce qui est plutôt satisfaisant et Cuffy est peu satisfaisant avec 30,3 %.

Le critère de stabilisation :

Il est considéré à travers la répartition des variations journalières à travers les considérations « bon », « acceptables » et « excessives ». L'indice est obtenu en soustrayant les résultats de l'extérieur de la vitrine à ceux de l'intérieur. Ainsi un signe « + » indique un gain par rapport à l'extérieur et un signe « - » une perte.

De plus un autre indice a été étudié via les rapports entre les proportions de variations bonnes et acceptables au sein de chaque vitrine, sans comparaison à l'extérieur.

	St Vrain ⁴⁸	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Indice de stabilisation par rapport à l'extérieur.	+ 99 %	+ 87 %	+21 %	+21 %	+63 %	+ 44 %	+ 85 %	+71 %
	-33 %	-5 %	+3 %	+39 %	-4 %	+17 %	-24 %	-10 %
	-66 %	-82 %	-24 %	-60 %	-59 %	-61 %	- 61 %	-61 %
Rapport des variations bonnes sur acceptables.	100	87 / 12 = 7,25	27 / 71 = 0,38	25 / 74 = 0,34	67 / 31 = 2,16	48 / 52 = 0,92	89 / 11 = 8,09	75 / 25 = 3
Notes	4	4	2	2	3	2	4	3

Tableau 4 : Evaluation de la stabilisation.

Les résultats de St Vrain et de Chartres ainsi que la vitrine 8a de Boulogne sont très satisfaisants avec plus de 80 % des variations considérées comme bonnes avec un bel écart avec l'extérieur.

⁴⁸ Les données extérieures étant indisponibles, le choix a été pris de prendre une période sèche de l'année 2022, il s'agit de la période de deux mois : 17.05.22 au 17.07.22. Il s'agit d'une approximation mais les résultats de stabilisation de cette vitrine sont très satisfaisants quoi qu'il en soit.

Viennent ensuite les vitrines 8c et 6 de Boulogne avec plus de 50 % de variations considérées comme bonnes et un écart conséquent avec l'extérieur, ces résultats sont plutôt satisfaisants.

Enfin les vitrines de Cuffy ainsi que les 5 et 10 de Boulogne sont peu satisfaisantes, nous sommes à moins de 50 % de variations considérées comme bonnes et des différences avec l'extérieur moindres + 44 % et + 17 % au maximum et seulement +21 % et +3 % pour Cuffy. Ces dernières présentent également plus de variations considérées comme acceptables que bonnes à l'inverse des autres vitrines dont l'indice est supérieur à 1.

Cependant ces résultats sont comparativement inférieurs, mais présentent tout de même des résultats acceptables car les variations dites « excessives » sont tout de même réduites au maximum (moins de 2 % des variations journalières).

Le coût de fonctionnement en consommation énergétique :

Le gel de silice fonctionne sans alimentation une fois mis en place⁴⁹.

Pour les autres systèmes, la consommation a été calculée sur le principe que chaque système fonctionnait à son maximum sur l'année, il a donc fallu prendre la consommation en fonctionnement maximal et l'exprimer sur un an.

Les EBC 10™, ont une consommation maximale de 100 W à l'heure⁵⁰, ainsi cela nous ramène à 876 kW par année⁵¹.

Les PEM sont plus complexes, car la consommation dépend du système installé, du nombre et du type de membranes.

Pour un système de 2 membranes de 7x7cm et un boîtier de contrôle, nous avons une consommation maximale de 2 x 4,95 + 1,44 W à l'heure⁵². Cela aboutit à 99,3 kW par année, c'est le cas de la vitrine située à Chartres.

La vitrine de Cuffy présente 4 membranes de 7x7 et donc une consommation de 196 kW/an.

Pour St Vrain, ce sont deux membranes de 5x5 ayant une consommation deux fois inférieure qui sont installées, nous avons alors une consommation de 12,6 kW/an.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Consommation à l'année (kW/an)	55	99	196	0	0	0	976	976
Note	3	3	3	4	4	4	2	2

Tableau 5 : Evaluation de la consommation en énergie.

Ainsi ce sont les régulations par gel de silice qui obtiennent les meilleures notes, suivie des PEM avec une consommation légère et enfin les EBC 10™ avec une consommation près de 10 fois supérieure aux systèmes de régulations de St Vrain et de Chartres. Pour ce critère, le gel de silice semble indétrônable car ne nécessite aucune alimentation électrique.

⁴⁹ Il en faut cependant pour le régénérer et le conditionner.

⁵⁰ D'après la fiche technique.

⁵¹ Une année étant considéré sur 365 jours.

⁵² Les consommations ont été communiquées par N. Buis, d'après fiche produits Ryosai.

Le coût de fonctionnement lié à l'entretien :

Le FluXor™ ne nécessite aucun entretien⁵³ à l'exception d'éventuelles pannes de sondes, le suivi du bon fonctionnement se fait via la plateforme « Preservarium ». A titre d'exemple le système mis en place à St Vrain n'a pas été modifié depuis 2008. De plus les défauts de la vitrine à Cuffy ne semblent pas être liés à un mauvais entretien mais plus aux caractéristiques de la vitrine, les éléments ayant été vérifiés à plusieurs reprises.

L'EBC 10™ nécessite un contrôle général de service tous les 2 ans⁵⁴, le prix de cette révision s'élève à 350 euros. Sur une période de 5 ans, cela fait donc 875 euros à prévoir.

Les réservoirs⁵⁵ du condensateur sont vidés une fois toute les 6 semaines⁵⁶. Nous estimons cette intervention à 20 min. Ce qui revient à 2h 40 par an, à un tarif « salaire minimum de référence » de 11 euros 27 l'heure. Donc, il s'agit de déboursier 30 euros par an et ainsi 150 euros pour 5 ans, ajoutons à cela la charge qu'est celle d'avoir du personnel disponible pour effectuer cette tâche.

Le Prosorb™ nécessite un jeu de cassettes par an pour chaque vitrine⁵⁷ à 73 euros l'unité.

La vitrine 5 fonctionne avec un jeu de 5 cassettes, ce qui correspond à un déboursement de 1825 euros pour 5 ans.

Les vitrines 6 et 10 n'ont que 2 cassettes par jeu, ce qui amène à 730 euros pour cinq ans.

Le temps de 10 min estimé nécessaire pour le changement de cassette est ici financièrement négligeable, 1,87 euro par an. L'évaluation considère cela comme plutôt satisfaisant bien que la vitrine 5 demande plus d'attention en raison du nombre de cassettes, cette dernière est considérée comme peu satisfaisante.

Cela reste relativement faible pour 5ans de plus le Gel de silice ne demande de manipulation qu'une fois par an, alors que l'EBC demande 8 interventions minimum.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Frais	0	0	0	1825, 1 à 2 interventions	730, 1 à 2 interventions	730, 1 à 2 interventions	1025, 8 interventions	1025, 8 interventions
Notes	4	4	4	2	3	3	2	2

Tableau 6 : Evaluation de l'entretien.

Le critère de coût d'achat du dispositif :

Les cassettes de Prosorb™ sont facturées à 73,00 euros⁵⁶ l'unité. Les vitrines 6 et 10 à Boulogne-sur-Mer en nécessitent deux. La vitrine 5 en nécessite cinq.

Les EBC 10™ sont eux facturés pour 2504,00 euros⁵⁸, et une unité est suffisante pour chacune des vitrines concernées.

⁵³ Chaque élément est testé et « rodé » en atelier avant envoi afin de s'assurer de l'absence de défaut de fabrication.

⁵⁴ C'est-à-dire après environ 15 000 à 20 000 heures de marche. D'après la fiche technique.

⁵⁵ Il serait également nécessaire de désinfecter ces derniers régulièrement, mais nous ne disposons pas d'informations nécessaires pour évaluer le coût de ces opérations.

⁵⁶ Information communiquée par Mme Tonnel.

⁵⁷ Au minimum, cela dépend des années, parfois ce nombre s'élève à deux.

⁵⁸ D'après le fournisseur Long Life for Art.

Enfin les boîtiers FluXor™ sont facturés 2799,94 euros⁵⁹, les membranes 5x5 et 7x7 sont respectivement facturées 632,35 et 1038,18 euros. Également, les sondes sont facturées 202,92 euros et les supports de membranes 456,17 euros.

Ainsi pour Chartres, le coût d'achat s'élève à 5991,56 euros, l'installation de Cuffy quant à elle coûterait 8 980,26 euros.

Pour St Vrain, le coût est de 5179,90 euros

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Prix (€)	5179,90	5991,56	8980,26	365,00	146,00	146,00	2504,00	2504,00
Notes	1	1	1	4	4	4	2	2

Tableau 7 : Evaluation du coût d'achat.

Ici, les systèmes PEM nécessitent un investissement très conséquent, les EBC 10™ un coût d'achat environ deux fois moindre mais étant tout de même près de dix fois supérieur au coût du gel de silice, c'est pourquoi la note 3 n'a pas été attribuée.

Le temps nécessaire avant retour à un environnement stabilisé :

Évalué à partir des graphiques de thermo hygrométrie en fonction du temps, ainsi que l'observation simple des mesures sur le tableau.

Pour les PEMs, nous utilisons le cas du trésor d'Autun : une vitrine expérimentale qui présente des ouvertures clairement identifiables.

Pour une ouverture à 9h, le climat est à nouveau stabilisé à 11h30, il faut donc 2 h30⁶⁰ pour stabiliser à nouveau. C'est une observation visible 3 fois pour un temps équivalent avant stabilisation les 07.02 et 10.02.2023.

Les vitrines étudiées n'ont pas été ouvertes sur la période d'étude, il est donc nécessaire de passer à travers le cas d'Autun pour estimation.

Les autres vitrines de cette étude ont été ouvertes pour positionner les capteurs, les données sont donc bien plus accessibles.

Pour les EBC 10™, le temps avant stabilisation n'est pas observable graphiquement. D'après les données enregistrées, la stabilisation est atteinte dès 20 minutes après fermeture, et ce pour les deux vitrines 8a et 8c.

Pour les cassettes de Prosorb™, les vitrines 5 et 10 présentent une stabilisation après environ 3 jours. Il faut néanmoins 5 jours pour la vitrine 6⁶¹.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Temps	2h30	2h30	2h30	3 jours	5 jours	3 jours	20 min	20 min
Notes	3	3	3	2	1	2	4	4

Tableau 8 : Evaluation du temps avant stabilisation.

Tout reste un minimum satisfaisant car 72 heures de stabilisation pour une efficacité sur une année semblent acceptables pour la bonne conservation du patrimoine exposé. A condition de ne pas dépasser le seuil de 65 % d'H.R. Le cas de la vitrine 6 est un cas limite car si l'on dépasse les 65 % d'H.R. tout au long de cette période de 5 jours, le risque de développement de micro-organismes est réel.

⁵⁹ Ces informations sont issues de la liste de prix de 2023 fournie par MaFabrique®

⁶⁰ Bien que cela soit donné pour la vitrine d'Autun qui présente grand volume comparable à Cuffy, nous pouvons imaginer que les vitrines de St Vrain et de Chartres arrivent à stabiliser plus rapidement car le volume y est inférieur.

⁶¹ Voir [A.2.5.1], [A.2.5.3] et [A.2.5.2]

Le niveau de bruit émis :

Le gel de silice et les PEM sont silencieux car il n'y a pas de pièces mécaniques en mouvement pour le bon fonctionnement de ces derniers⁶².

Les EBC 10™ présentent une émission de 37 à 48 dB⁶³ en fonction de l'habillage, cela peut paraître relativement faible mais suffisant pour émettre un bruit de fond qui peut perturber le silence des certains espaces.

Ces émissions sont dues à la pompe permettant la ventilation forcée et le condensateur dans une moindre mesure.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Niveau sonore (dB)	0	0	0	0	0	0	37 à 48	37 à 48
Notes	4	4	4	4	4	4	2	2

Tableau 9 : Evaluation du niveau de bruit émis.

Ici, la mini climatisation chute à 2 car le bruit émis par la pompe et le condensateur peuvent être dérangeants, là où l'absence de bruit des deux autres systèmes est un vrai avantage.

La plage de température pour un bon fonctionnement :

Elle a été considérée comme critère car le système EBC 10™ est un système « Pelletier » qui fonctionne avec un condensateur. Ce dernier doit atteindre la température de rosée pour condenser l'eau présente sous forme de vapeur.

Or dans les cas qui nous intéressent, la température de rosée est bien souvent négative⁶⁴, ce qui n'est pas compatible avec le fonctionnement de l'EBC, car la condensation produirait de la glace.

Ce qui n'est pas le cas pour les autres systèmes car il n'y a pas de condensation forcée⁶⁵.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Temp. (°C)	-	-	-	-	-	-	5 ° C à 80 %	5 ° C à 80 %
Notes	4	4	4	4	4	4	2	2

Tableau 10 : Evaluation de la plage de température pour fonctionnement.

Ainsi d'après la fiche technique, l'appareil ne pourrait fonctionner en déshumidification dans un environnement à 5°C à 80 % d'humidité relative dans des conditions de pression usuelles. Dans le cadre de monuments historiques, ce sont des conditions qui peuvent avoir lieu en hiver. Cette période étant la plus humide en Europe, il s'agit de la période où la déshumidification est la plus utilisée, ce qui pose un problème.

Les autres systèmes ne souffrent pas de ce problème dans les conditions usuelles que nous rencontrons.

⁶² Voir Fiche technique FluXor™.

⁶³ D'après la fiche technique EBC 10™.

⁶⁴ Cela est régulier à Chartres.

⁶⁵ L'adsorption du gel de silice étant régie par d'autres règles liées à l'échelle de réaction.

Le volume maximal d'air traité par une unité :

Pour le FluXor™ (PEM), une surface d'activité de 25cm² par m³ pour un renouvellement d'air allant jusqu'à 0,2 volume par jour⁶⁶ est recommandée.

Ainsi un FluXor™ couplé à un jeu de membranes 5x5 peut traiter un volume de 1 m³.

Cependant un FluXor™ couplé à deux jeux de membranes 7x7 et donc 96 cm² de surface active vont pouvoir traiter un maximum de 3,92 m³.

Pour l'EBC 10™, un maximum de 3 m³ est recommandé par le fabricant. Notons que les EBC 11 et 12 de la gamme peuvent traiter jusqu'à 5 et 10 m³ respectivement⁶⁷.

Une cassette de Prosorb™ de 950g est recommandée pour jusqu'à 0,5 m³ en fonction des conditions climatiques⁶⁸.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Volumes	1 m ²	2 m ²	3,98 m ²	0,5 m ²	0,5 m ²	0,5 m ²	3m ³	3m ³
Notes	2	3	4	1	1	1	4	4

Tableau 11 : Evaluation du volume traitable par unité.

Ainsi, les cassettes de Prosorb™ sont les moins efficaces comme attendu étant donné qu'il est courant de les démultiplier pour traiter un grand volume, les PEM présentent des capacités variables en fonction des installations et l'EBC 10™ y est comparable.

La question de la pérennité du système :

Le FluXor™ présenterait des signes de vieillissement après 15 années d'utilisation (2008 à 2023) pour l'installation de St Vrain. Ce vieillissement est mis en évidence par une remontée progressive du taux d'humidité relative⁶⁹.

L'EBC 10™ nécessite une révision tous les 2 ans, mais semble fonctionner au-delà de 8 ans (2015 – 2023), cependant il est difficile de savoir si l'appareil ne présente pas de signe de vieillissement car nous n'avons pas de données climatiques antérieures exploitables.

Les cassettes ont une pérennité de 12 mois dans les conditions d'utilisation à Boulogne-sur-Mer, parfois moins en fonction des années.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Durée de vie	15 ans	15 ans	15 ans	1 an	1 an	1 an	8 ans	8 ans
Notes	4	4	4	1	1	1	3	3

Tableau 12 : Evaluation de la pérennité du système.

⁶⁶ Recommandation de la fiche FluXor™.

⁶⁷ Voir fiche technique EBC™.

⁶⁸ Fiche technique Prosorb™.

⁶⁹ Cela peut également être lié à un vieillissement du joint d'étanchéité et nécessite d'être vérifié lors du prochain relevé.

Une pérennité d'une année semble très peu à l'échelle de la conservation du patrimoine, c'est pourquoi la note de 1 a été octroyée. Cependant des pérennités probablement supérieures à 8 ans et d'environ 15 ans semble satisfaisantes pour mettre en place un plan de conservation sur long terme.

La capacité de modulation :

Le système FluXor™ permet d'adapter l'installation aux besoins à l'aide du choix de la taille des membranes et des sondes que l'on souhaite ajouter⁷⁰. De plus si besoin une chaîne « master-slave ⁷¹» est possible.

L'EBC 10™ ne permet pas de modifier l'appareil en fonction des besoins, mais une chaîne « master-slave ⁷¹» est possible.

Le gel de silice présente une capacité d'adaptation en fonction des besoins car sa forme, sa quantité et son aspect sont modifiables.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Notes	3	3	3	4	4	4	2	2

Tableau 13 : Evaluation de la capacité de modulation.

Mesures de contrôle de l'évolution climatique exploitables :

Le FluXor™ présente, dans les versions en vente actuellement, un enregistrement automatique des données intérieures et extérieures, que ce soit localement ou connecté en temps réel à la plateforme « Preservarium » fournie. Ainsi les données sont exportables en tout temps.

L'appareil EBC 10™ n'enregistre aucune donnée⁷², il nécessite un appareil de mesure auxiliaires, ce qui est également le cas du Prosorb™.

	St Vrain	Chartres	Cuffy	Boul. 5	Boul. 6	Boul. 10	Boul. 8a	Boul. 8c
Notes	4	4	4	1	1	1	1	1

Tableau 14 : Evaluation de l'aide à la surveillance du climat intégrée.

Ainsi le FluXor™ présente ici un avantage certain en termes de suivi de l'activité du système de régulation de vitrine.

⁷⁰ Il est désormais possible d'enregistrer la présence de composés organiques volatils, l'intensité lumineuse et autres capteurs d'ouverture dans le cadre d'une mission sûreté. Il est également possible d'obtenir le mode de fonctionnement (humidification/déshumidification) de l'appareil en fonction du temps. Voir fiche technique.

⁷¹ Il s'agit d'une mise en série de plusieurs appareils.

⁷² Pour ce qui est des appareils de l'étude, dans les dernières générations cette option est disponible. Voir fiche technique.

Chapitre 5 : Présentation des résultats de la comparaison.

Dans ce chapitre sont présentés l'exploitation visuelle de l'attribution des notes réalisées dans le chapitre précédent.

Ainsi nous pouvons observer l'empreinte graphique de chaque système à travers les graphiques radars. Ces représentations vont largement faciliter l'exploitation de cette étude comme il sera observé dans le prochain chapitre.

Pour réaliser ces derniers⁷³, l'ensemble des notes de chaque système a été réuni en « moyenne » afin que cela soit plus visible, une version de ces empreintes comportant les maximums et minimums est également visible en annexes⁷³.

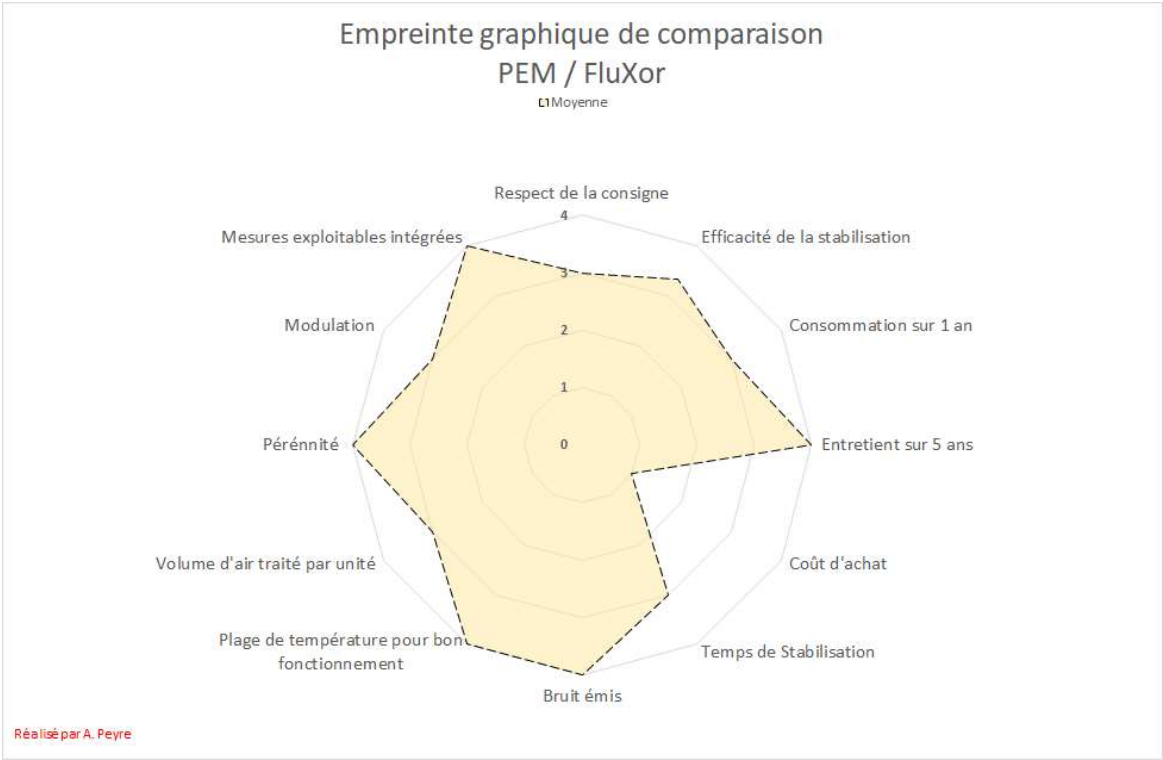
L'échelle allant de 0 à 4 reprend toujours l'échelle de notation allant de note punitive à « très satisfaisant ».

En règle générale, il est explicite que les critères de conservation que sont le taux de conformité et l'efficacité de la stabilisation sont fortement en faveur des PEMs. Ces dernières sont également favorisées par un faible entretien et un bon volume d'air traité, mais le prix d'achat est bien plus élevé que les autres.

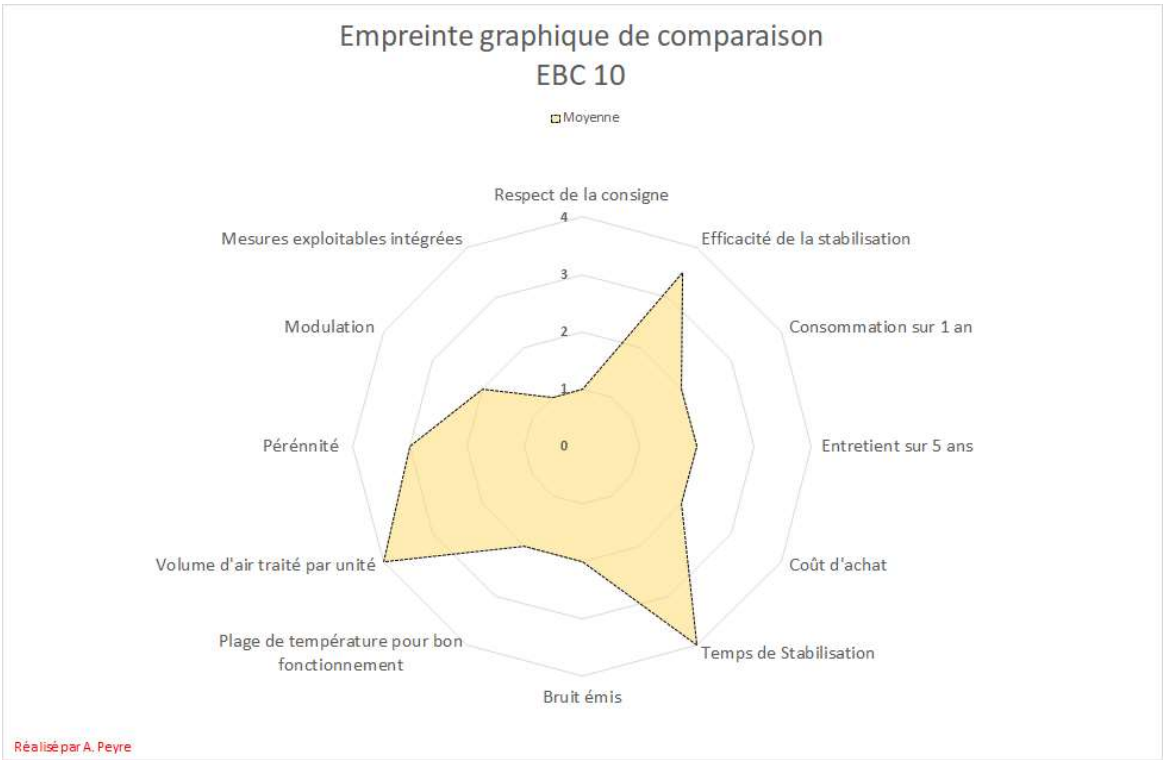
Le gel de silice offre une réelle alternative dans un tout autre esprit⁷⁴ là où l'EBC 10™ (climatisation) semble être moins efficace que les PEMs, à tarif plus abordable mais demandant beaucoup plus d'entretien et produisant un fond sonore.

⁷³ Une version comprenant maximum et minimums sont disponibles en **[A.3.1-3]**, cela correspond aux annexes A.3.1.1, A.3.1.2 et A.2.1.3.

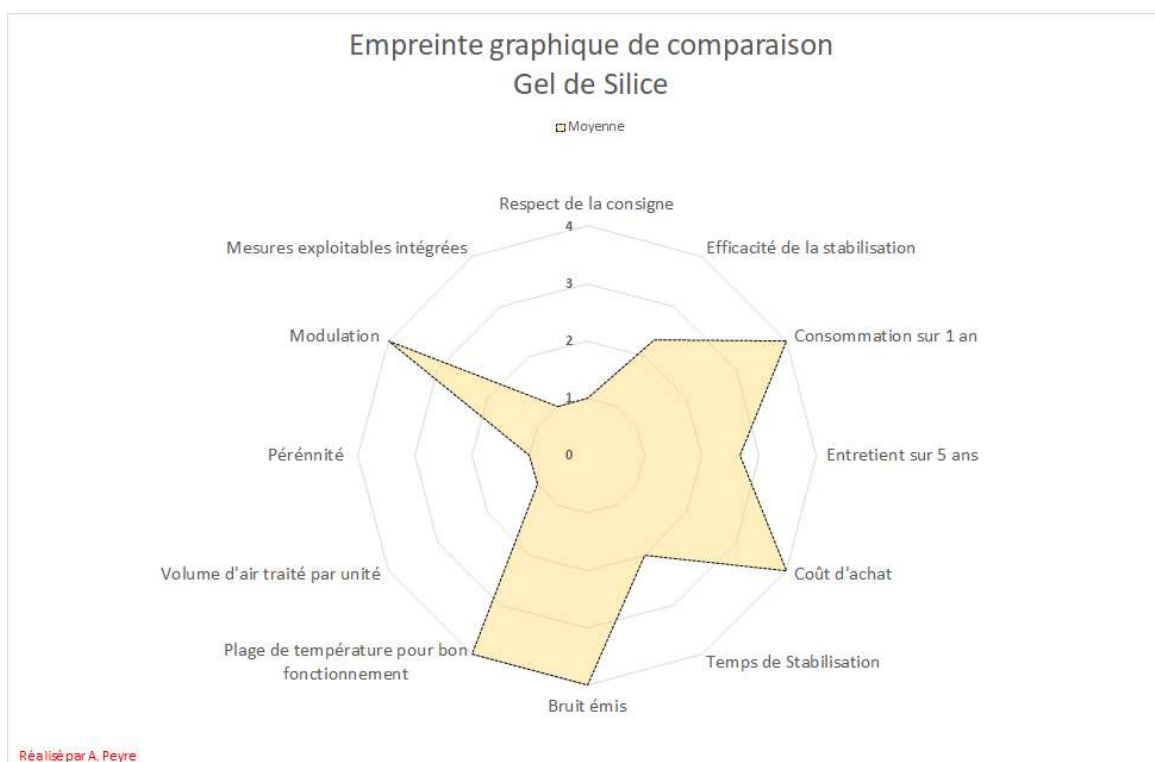
⁷⁴ Il s'agit finalement d'une solution bien plus économique et modulables mais présentant des performances bien moindres et n'étant pas adaptées pour un projet de conservation sur le long terme. Elle est cependant idéale dans le cas d'une urgence et dans le cadre d'une conservation temporaire, pour exposition ou déplacement.



Graph. 14 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes du FluXor.



Graph. 15 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes de l'EBC 10.



Graph. 16 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes du Gel de Silice.

Chapitre 6 : Quelques exemples fictifs d'exploitation de ces empreintes graphiques.

Pour exploiter ces résultats, il me semble intéressant de proposer 4 scénarios afin de présenter comment utiliser ces résultats en fonction de chaque situation qui pourrait se présenter.

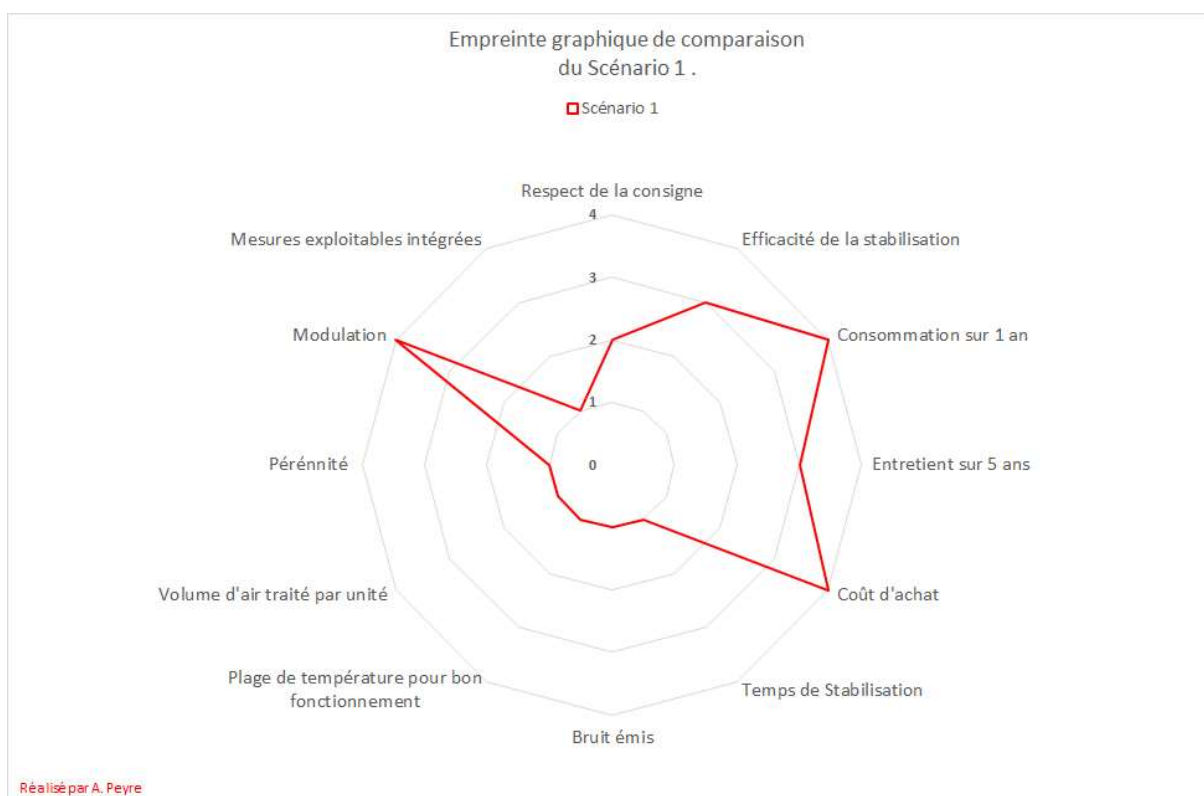
Scénario 1 :

Une institution au budget limité présentant plusieurs objets dans plusieurs vitrines de petits volumes, souhaitant faire au mieux avec les moyens à disposition ainsi il faut viser un coût d'achat faible, avec peu d'entretien car peu de personnes sont à disposition. Les performances de conservation doivent au minimum assurer une bonne stabilisation. Et le système doit présenter une bonne modulation pour s'adapter à toutes les vitrines. Le lieu d'exposition n'est pas relié à un réseau d'électricité facilement.

Ainsi les besoins s'approcheront de cela :

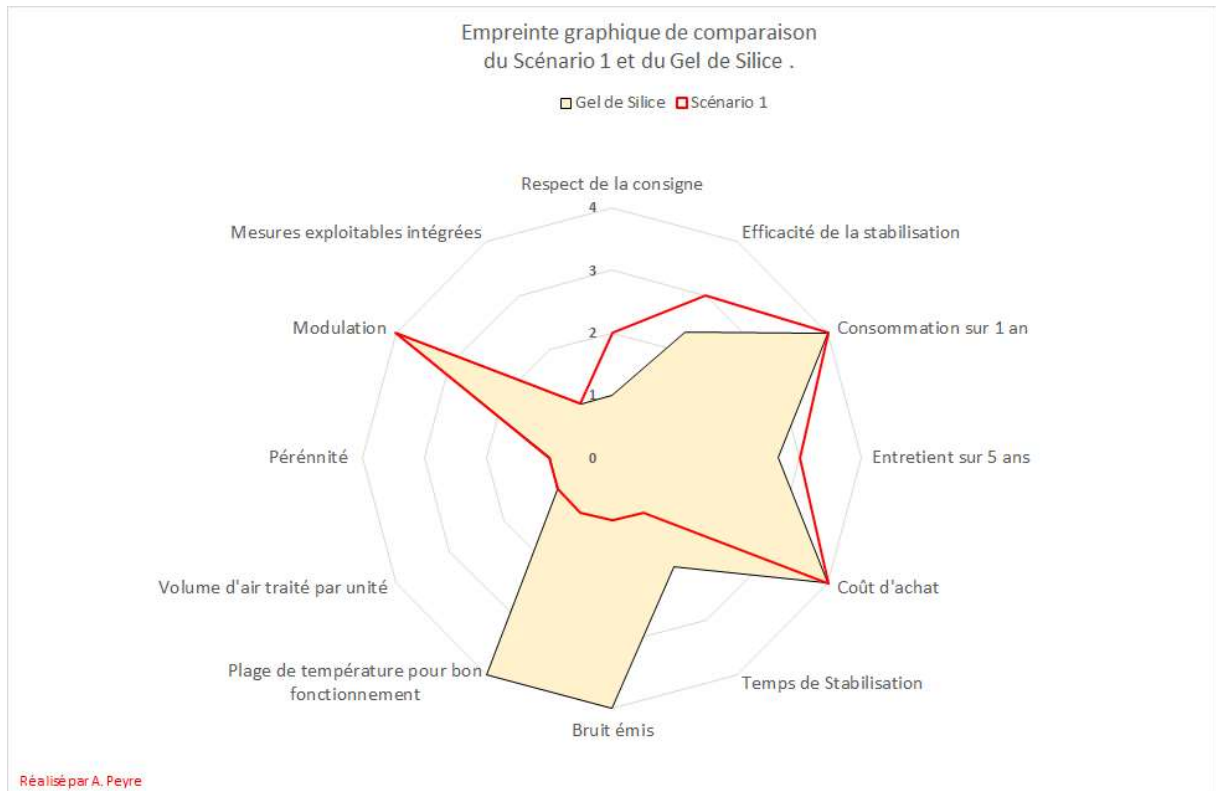
Critères	Notes		Critères	Notes
Consigne	2		Bruit émis	1
Stabilisation	3		Température pour fonctionnement	1
Consommation	4		Volume traité par unité	1
Entretien	3		Pérennité	1
Coût achat	4		Modulation	4
Temps avant stabilisation	1		Mesures exploitables intégrées	1

Tableau 15 : Notes correspondant au scénario 1.



Graph. 17 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 1.

Cette empreinte est très utile si l'on souhaite obtenir le système correspondant le mieux aux besoins, il suffit de superposer ce dernier avec les différentes empreintes obtenues au préalable⁷⁵. Pour être compatible, il faut alors que la majorité de la surface délimitée par le tracé rouge (scénario) soit remplie par les empreintes des différents systèmes. Ainsi le système qui semble être le plus approprié pour ce scénario en superposant les empreintes, est le système Gel de Silice.



Graph. 18 : Comparaison des empreintes du scénario 1 et du Gel de Silice.

⁷⁵ Voir [A.4.1.1-2]

Scénario 2 :

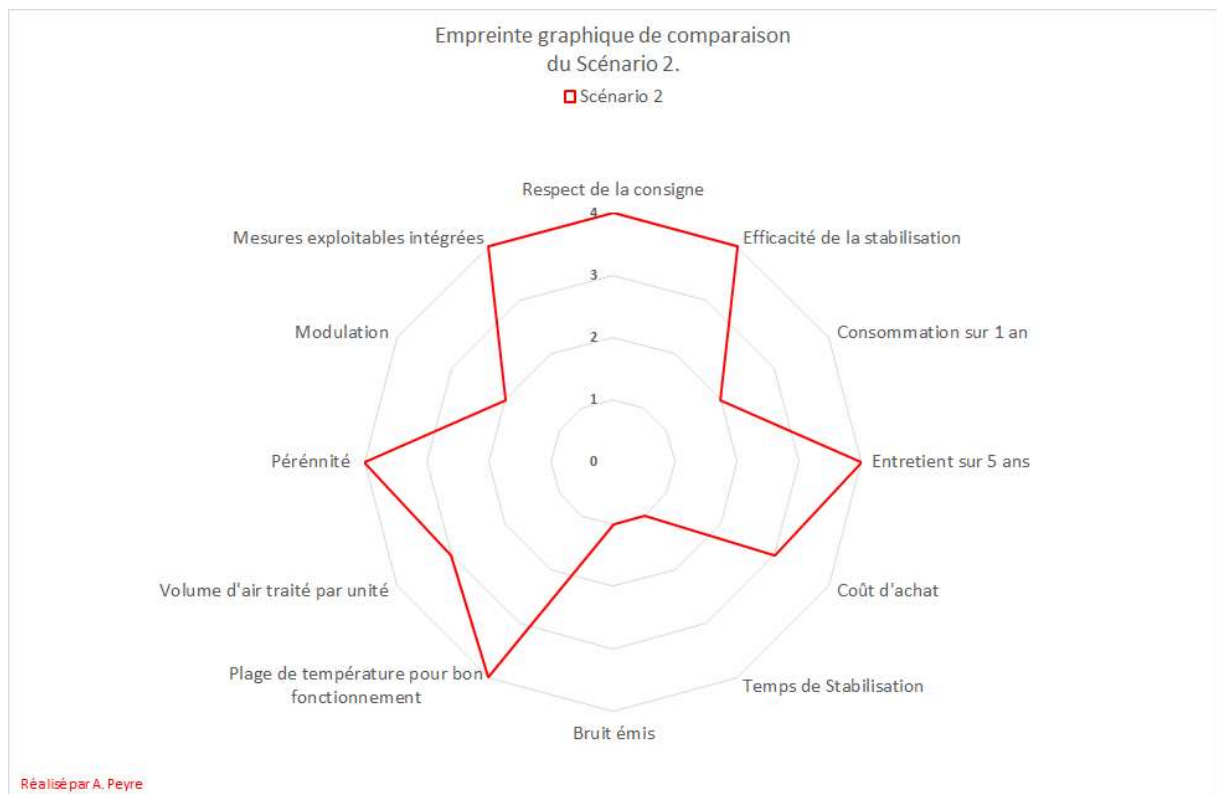
Une institution relativement modeste présente tous ses objets dans une seule vitrine de 1m³. Elle ne possède pas de personnel spécialisé à temps plein sur place, ne pouvant donc assurer un entretien. De plus un responsable régional souhaite pouvoir étudier le climat de cet espace. Les objets sont très sensibles aux variations d'humidité et l'environnement général est très humide mais relativement froid (entre 8 et 11°C)

Le système peut être relativement onéreux car il n'y a qu'une seule vitrine, mais l'installation doit alors être pérenne. Le respect des critères de conservation est absolument nécessaire. Une vitrine fermée et très étanche est en cours de réalisation pour ce projet.

Voici la transcription de ce scénario :

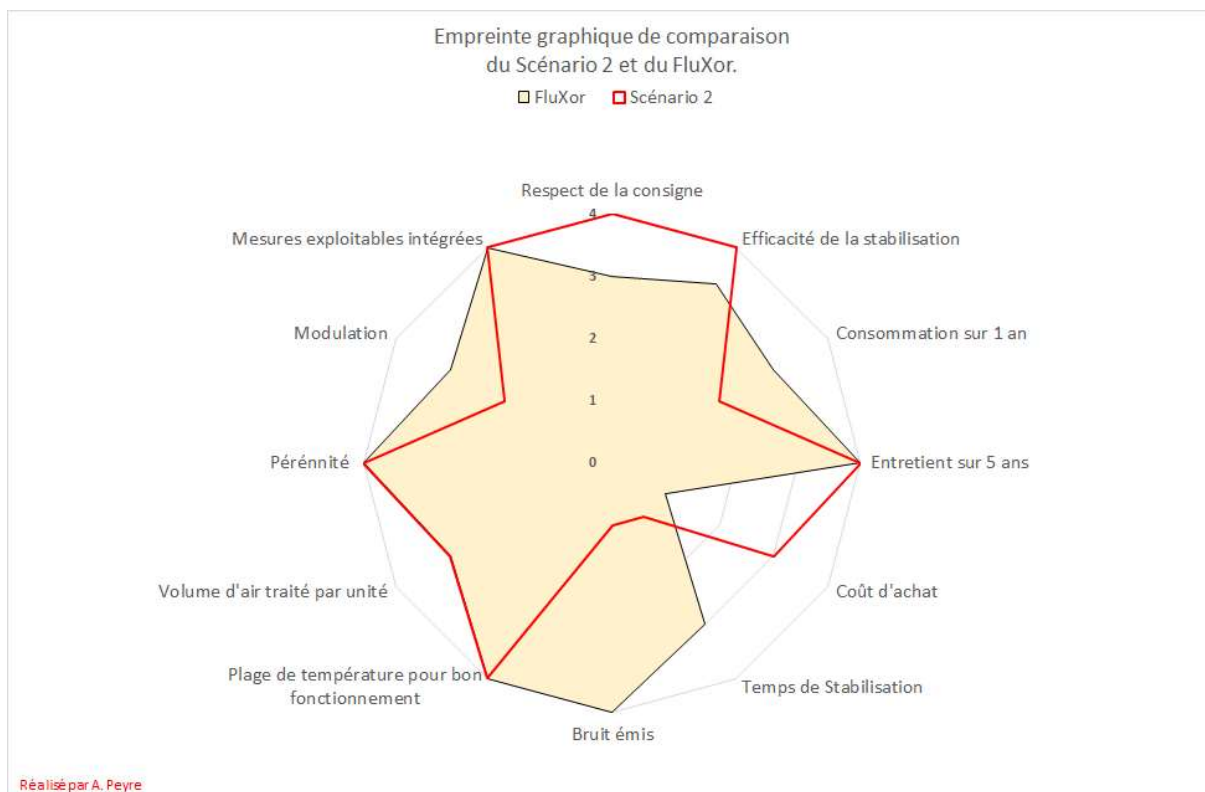
Critères	Notes		Critères	Notes
Consigne	4		Bruit émis	1
Stabilisation	4		Température pour fonctionnement	4
Consommation	2		Volume traité par unité	3
Entretien	4		Pérennité	4
Coût achat	3		Modulation	2
Temps avant stabilisation	1		Mesures exploitables intégrées	4

Tableau 16 : Notes correspondant au scénario 2.



Graph. 19 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 2.

Ainsi aucun système n'est complètement compatible⁷⁶, mais le coût d'achat étant une variable ajustable dans le scénario, il semble que ce soit le FluXor™ le plus approprié.



Graph. 20 : Comparaison des empreintes du scénario 2 et du FluXor-PEM.

⁷⁶ Voir [A.4.2.1-2].

Scenario 3 :

Une institution religieuse présente 3 vitrines de 1,5 m³, l'humidité moyenne de l'espace de présentation est de 65 % d'H.R. mais les variations journalières sont très élevées. Il est donc nécessaire de stabiliser ces variations. Les objets étant constitués de matériaux organiques, une consigne élevée autour de 56 % d'H.R. est tout à fait acceptable. L'institution a un budget conséquent, sachant que chaque vitrine doit avoir un système indépendant et donc être un minimum modulable.

La température de l'espace d'exposition est agréable.

Dans une démarche de budgétisation publique ponctuelle, l'institution souhaite un système pérenne.

De plus il arrive que les vitrines soient ouvertes plusieurs fois dans le mois, car il y a beaucoup d'alternance : nombre de pièces sont utilisées pour les offices de l'église.

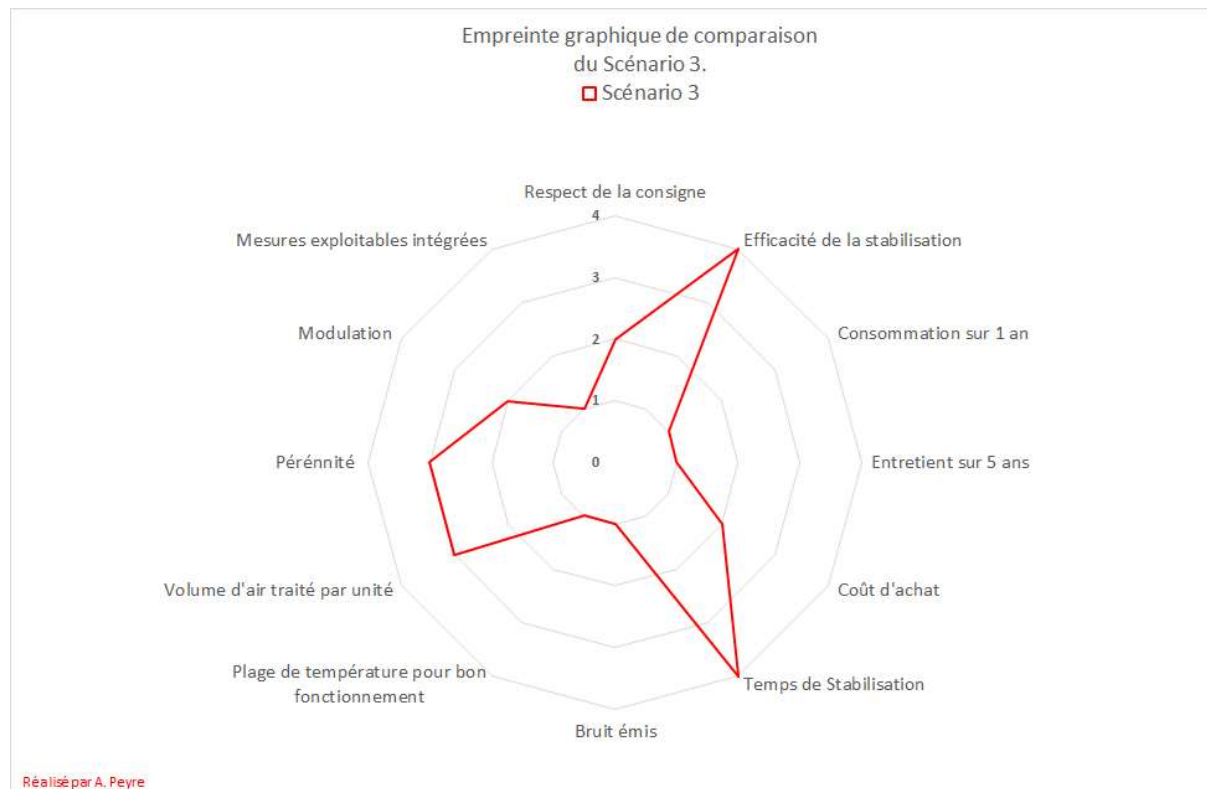
Une stabilisation rapide après ouverture est donc un plus.

L'institution réalise des visites, des employés susceptibles de réaliser un entretien si nécessaire sont présents.

Voici la transcription à travers les notes.

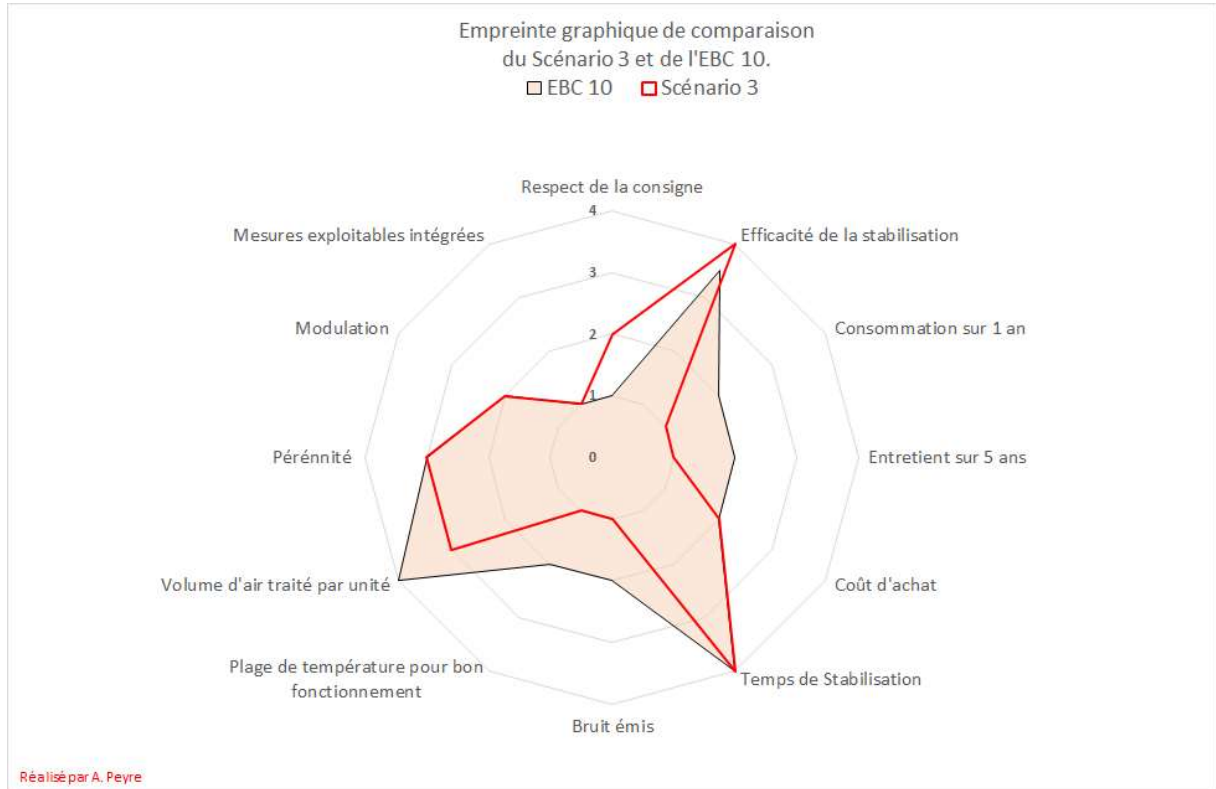
Critères	Notes	Critères	Notes
Consigne	2	Bruit émis	1
Stabilisation	4	Température pour fonctionnement	1
Consommation	1	Volume traité par unité	3
Entretien	1	Pérennité	3
Coût achat	2	Modulation	2
Temps avant stabilisation	4	Mesures exploitables intégrées	1

Tableau 17 : Notes correspondant au scénario 3.



Graph. 21 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 3.

Dans ce cas de figure, les systèmes EBC 10™ et FluXor™ semblent les plus appropriés⁷⁷, cependant le respect de la consigne semble moins important que la vitesse de stabilisation après ouverture et la différence de prix des systèmes, ainsi dans ce cas, l'EBC 10™ semble être le système le plus approprié.



Graph. 22 : Comparaison des empreintes du scénario 3 et de l'EBC 10.

⁷⁷ Voir [A.4.3.1-2].

Scénario 4 :

Un propriétaire privé et fortuné souhaite présenter le chef d'œuvre de sa collection, une épée gallo-romaine très sensible à l'humidité relative.

Cette dernière est classée au titre de Monuments Historiques et l'autorité publique locale souhaite avoir un regard sur l'environnement climatique de ce bien.

Le propriétaire souhaite l'exposer chez lui dans une vieille demeure historique, ainsi une vitrine avec un taux de renouvellement de 0,1 fois le volume par jour est en cours de réalisation.

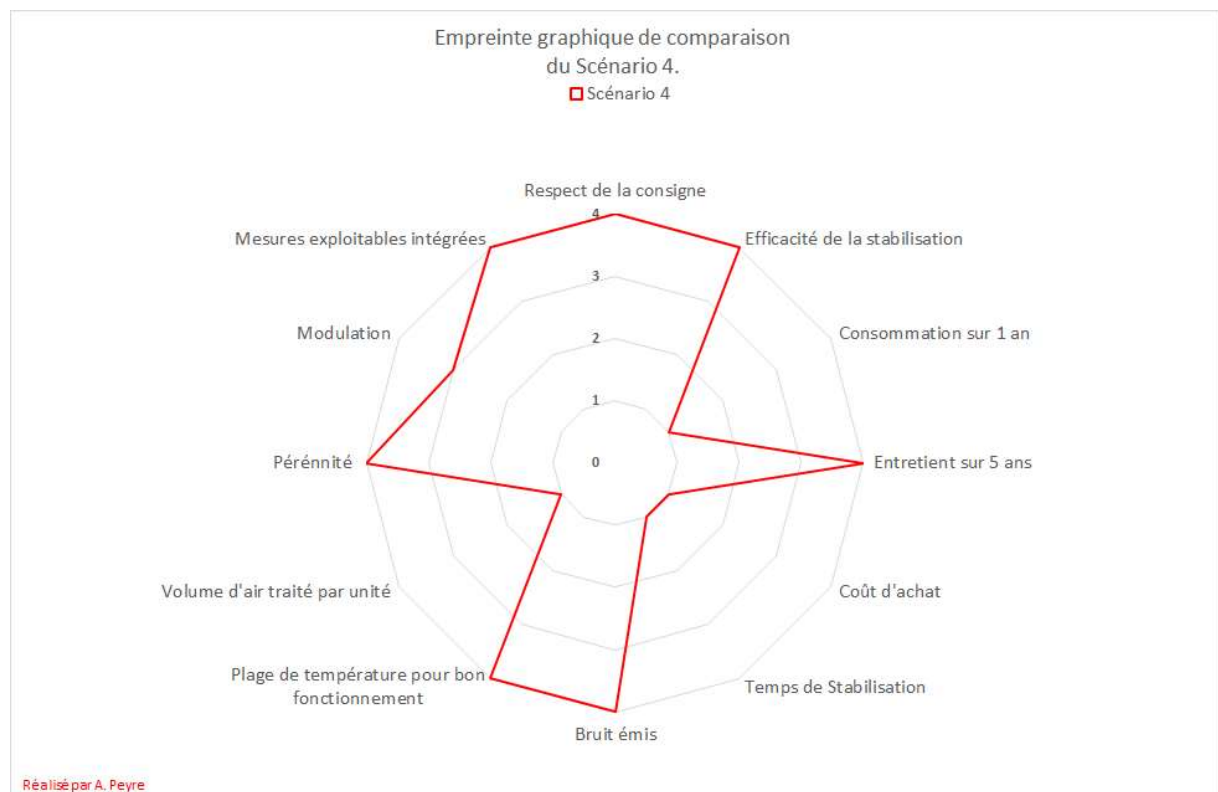
Les critères de conservation sont donc d'une importance capitale, ainsi que l'accessibilité des données climatiques. Le propriétaire ne souhaite pas se préoccuper d'un éventuel entretien et souhaite une installation pérenne.

La pièce est assez froide la moitié de l'année, car cet espace de la propriété n'est pas autant chauffé que les espaces de vie. Cependant le propriétaire souhaite un système silencieux car aime présenter l'objet et l'observer de longues heures dans le calme.

Voici l'empreinte du scénario :

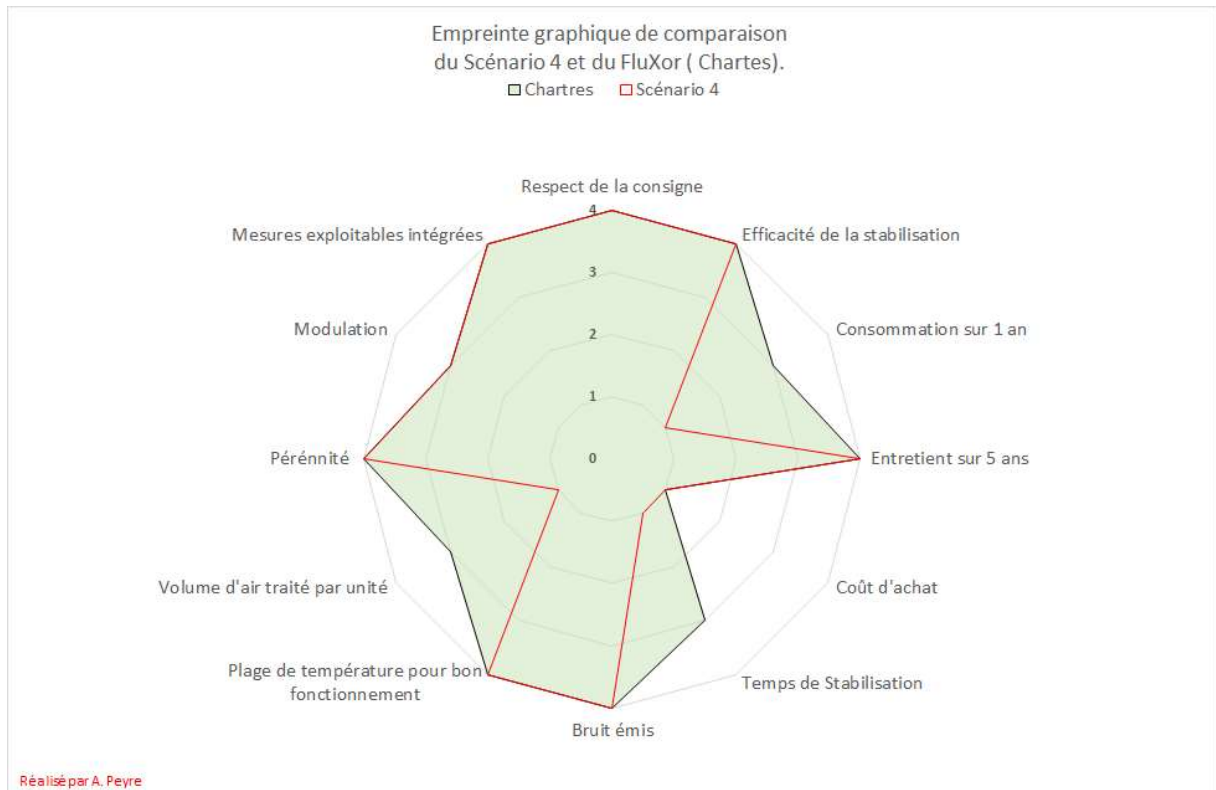
Critères	Notes		Critères	Notes
Consigne	4		Bruit émis	4
Stabilisation	4		Température fonctionnement pour	4
Consommation	1		Volume traité par unité	1
Entretien	4		Pérennité	4
Coût achat	1		Modulation	3
Temps avant stabilisation	1		Mesures exploitables intégrées	4

Tableau 18 : Notes correspondant au scénario 4.



Graph. 23 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 4.

Dans ce cas, ce serait le FluXor™⁷⁸ le plus approprié et en particulier si nous avons une vitrine présentant une très bonne étanchéité tel que c'est le cas à Chartres pas exemple.



Graph. 24 : Comparaison des empreintes du scénario 4 et du système de régulation de Chartres (FluXor en situation de fonctionnement idéal, présent dans une vitrine très étanche.).

⁷⁸ Voir [A.4.4.1-3].

Chapitre 7 : Perspectives et axes d'amélioration de cette étude.

Lors de la réalisation de cette étude, un grand nombre de difficultés ont été rencontrées, cela étant dû à la complexité d'un tel travail en souhaitant apporter le maximum de transparence et de factualité.

La principale difficulté a été de s'assurer d'une répétabilité des résultats et d'une bonne représentativité des exemples étudiées, c'est pourquoi il a été décidé d'étudier si possible au minimum trois vitrines de chaque type. Seul le système EBC 10™ a posé un problème car deux vitrines ont pu être étudiées. Cela est lié à un manque de recul lors de la mise en place des capteurs, un troisième aurait pu être positionné dans la vitrine 8b, cependant le risque de non-répétabilité des résultats a été évité dans la mesure où les résultats des vitrines 8a et 8c sont tout à fait comparables.

Afin d'estimer au mieux les comportements de chaque système, il aurait également pu être intéressant de tester ces différents systèmes dans un environnement comparable, c'est en ce sens que le site de Boulogne-sur-Mer est très intéressant car nous avons la présence de deux des systèmes étudiés dans une même pièce et dans des vitrines confectionnées par le même fabricant, suivant le même plan et au même moment : seul le volume est un facteur variable.

Ce qui nous amène à la principale difficulté rencontrée afin de livrer un travail tout à fait fiable, il a été tout au long de ce travail très difficile de dissocier les performances du système de régulation de celles de la vitrine en elle-même. Cela est très flagrant dans les différences de performances concernant le FluXor™. Pour des systèmes équivalents, les performances sont très variables entre des systèmes fonctionnant correctement (St Vrain et Chartes) et la vitrine de Cuffy qui n'est pas la plus performante de cette étude. Il aurait donc été intéressant de pouvoir dissocier ces éléments. Les pistes à notre disposition sont de connaître l'élément caractéristique de chaque vitrine qu'est le taux de renouvellement d'air journalier et ainsi de pouvoir le prendre en compte dans le calcul de performance du système en étant combiné au volume de la vitrine. Cela nécessitera des calculs bien plus complexes d'extraction d'eau sous forme de gaz en termes de quantité de matière. Ceci est éventuellement réalisable via des modèles que nous pouvons obtenir. Nous avons le suivi de l'activité des membranes et les conditions dans lesquelles ces dernières travaillent en tout temps, si nous mettons en relation cela avec l'énergie électrique apportée, nous pourrions définir la quantité d'eau extraite de l'environnement climatisé.

Pour ce qui est du gel de silice, des modélisations existent qui permettent de savoir la quantité d'eau adsorbée en fonction du temps et le seuil que la cassette peut adsorber avant qu'elle n'ait plus la capacité de remplir son office.

Cependant nous ne disposons d'aucune méthode comparable pour les EBC 10™, la solution aurait été de quantifier la quantité d'eau liquide extraite à chaque vidange du système et la corrélérer à l'évolution climatique intérieure.

Tout cela demanderait alors une étude plus approfondie sur une période bien supérieure aux deux mois de suivi.

Cependant, cela pourrait être évité artificiellement dans le cas où une expérimentation aurait lieu sur un même site avec des vitrines de même facture et dans le même état de vieillissement, la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer semble être un lieu idéal pour une telle étude. Il suffirait pour cela d'équiper deux vitrines présentes de système de régulation type FluXor™-PEM dans la salle d'art sacré, et éventuellement d'ajouter une vitrine supplémentaire afin d'avoir trois représentants de chaque système.

Ainsi les résultats de comparaison seraient plus fiables et délestés de toutes les approximations et évaluations réalisées lors de cette étude.

Un autre aspect bien plus spécifique qui signerait une amélioration certaine est la question des mesures des données climatiques. Ici nous avons des mesures à intervalles différents en fonction des installations, nous allons d'un enregistrement toutes les minutes à toutes les heures. Cela est acceptable car grand nombre d'approximations ont été réalisées ici, mais il serait idéal d'uniformiser toutes ces mesures. Il en va de même pour les appareils de mesure, les sondes n'ayant pas toutes les mêmes sensibilités, il serait intéressant de normaliser tout cela avec des sondes neuves. Et pour parfaire l'exercice, il est recommandé d'utiliser les mêmes sondes pour piloter le fonctionnement des systèmes de régulation active. Ainsi l'approche du taux de conformité pour évaluer la capacité à atteindre la consigne serait bien plus fine.

De plus ce travail semble bien incomplet tellement il existe d'autres propositions qui mériteraient d'être intégrées ici : sels saturés, climatisation mutualisée entre vitrines ou encore stabilisation des biens par interventions de restaurations

Conclusion :

En conclusion, bien que de nombreux questionnements se soient ajoutés au fur et à mesure et que quelques difficultés aient dû être surmontées, le résultat de ce travail reste malgré tout satisfaisant.

L'objectif de réalisation d'une étude comparative ouverte est réussi : sans désigner tel ou tel système comme supérieur aux autres mais bien en mettant en évidence les avantages et inconvénients de chacun, ce qui permet à chaque lecteur de choisir quels sont les critères qui selon lui sont les plus importants dans la situation qui lui est propre.

Ce travail n'est pas idéal comme cela a été développé dans le chapitre 7, mais il tente à son échelle de mettre en évidence l'intérêt que nous⁷⁹ aurions à réaliser de telles comparaisons sans se laisser aveuglément guider par les publications ne mettant en avant qu'un seul système à la fois.

Au-delà de performances mesurables ou simplement évaluables, il s'agit réellement d'identifier les différentes philosophies de traitements climatiques que l'on retrouve derrière chaque proposition.

Il ne faut cependant pas perdre de vue les principaux axes de conservation et se souvenir que tout cela doit être associé à des moyens efficaces de lutter contre chaque facteur environnemental de dégradation⁸⁰.

Et il ne faut pas oublier non plus qu'un bon contrôle de l'environnement climatique passe par une régulation comme cela a été développé tout au long de ce travail, mais également par des mesures fiables, régulières et finement observées par un regard attentif et initié aux différents phénomènes observables.

Car un bon système de régulation, aussi bien adapté soit-il, n'est rien sans une surveillance constante de son bon fonctionnement.

Enfin, j'ai eu grand plaisir à réaliser ce travail et je renouvelle mes remerciements à l'égard du Dr. Faïsl Bousta pour l'opportunité de réalisation d'un tel travail ainsi que le suivi et la supervision tout au long de ce dernier.

⁷⁹ *Professionnels de la conservation de biens culturels.*

⁸⁰ *Il s'agit des 10 facteurs définis par l'institut canadien de conservation.*

J'ai pu me rendre compte que la conservation est une discipline tout à fait passionnante bien que d'une profondeur illimitée. Il est aisé de se perdre dans des développements, des recherches et des tentatives de compréhension très poussées, ce qui peut amener à se détourner des objectifs initiaux.

Il est également important de se souvenir que les solutions envisagées, quelles qu'elles soient ne seront que temporaires. Nous ne pouvons qu'espérer ralentir au maximum le processus de dégradation de la matière.

Car **la nature retrouvera toujours le chemin de l'équilibre**, que ce soit le climat entre deux volumes séparés d'une paroi de verre ou encore l'état entropique d'un métal face à son état d'oxydation.

En vous remerciant pour l'intérêt porté à ce document.

Antonin Peyre.

Références :

Sources bibliographiques :

AFNOR. 2007 : ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (AFNOR), Norme expérimentale XP X80-002. Recommandations pour concevoir, aménager, choisir et utiliser une vitrine d'exposition de biens culturels, Saint-Denis, AFNOR, 2007, 11 p.

Barette 1985 : BARETTE Bill, « Salles d'art égyptien du Metropolitan Museum of Art », in *Museum international* (Ed. Française) vol.37, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 1985, p. 81-85.

Bousta 2011 : BOUSTA Faisl, « La vitrine du reliquaire de Saint Caprais : stabilisation de l'hygrométrie par électrolyse à membrane de polymère poreux », *CoRé*, juillet 2011, n° 26, p. 41-45.

Brimbelcombe 1983 : BRIMBELCOMBE, Peter, Ramer, Brian. « Museum display cases and the exchange of water vapour. », In : *Studies in Conservation*, Vol. 28, (1983), p. 179-188.

Cassar 1984 : CASSAR, May, « Proposal for a typology of display case construction designs and museum climate control systems », in : *ICOM 61*, Copenhagen, 1984.

Cassar 1994 : CASSAR, May et Martin, Graham. « The environmental performance of museum display cases. », in : A. ROY and P. SMITH (eds) « Preventive conservation : practice, theory and research. Preprints IIC Ottawa Congress. London : International Institute of Conservation, 1994, p. 171-173.

Dallel 2020 : DALLEL Mohamed, « Les membranes d'électrolyse : une solution innovante pour stabiliser l'humidité dans les vitrines », *Monumental 2020-2 La tapisserie*, 2nd semestre de 2020, Centre des Monuments Nationaux p.10 et 11.

De Guichen 1985 : DE GUICHEN, Gaël et KABAOGLU, Cengiz. *Petit Guide de la vitrine ratée*. In : *Museum International*, Vol.37 : 2, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 1985, p. 64-67.

Eggert 2020 : EGGERT, Gerhard. Saturated salt solutions in showcases: humidity control and pollutant absorption, 2020 [En ligne] *Heritage Science* : <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00689-3>

EN. 15999 : Comité européen de normalisation, Norme en cours de rédaction EN 15999, « Conservation of Cultural heritage – Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects – Part 1 and 2, Gracieusement fournie par M. Jacot Thierry, membre du groupe d'expert concerné. Partie 2, p. 7 et 12 à 16.

Goli 2017 : GOLI, Giacomo, et al. "Test of a device for the active control of environmental humidity in museum display cases." *International journal of conservation science* vol.8.1, 2017.

Jacot 2003 : JACOT Thierry, « La vitrine d'exposition, outil de conservation préventive intégré. », *Mémoire D.E.S.S. conservation préventive des biens culturels*, Université de Paris 1, 2003.

Haddad 2009 : HADDAD Ahmad, « Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique », Thèse au sein de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 2009.

Lony 2010 : LONY R. J. M., VAN SCHIJNDEL A. W. M., SCHELLEN H. L., « Evaluation of the climate control performance and reliability of active display cases », *Restoration of Buildings and Monuments*, 2010, Vol. 16 n° 1, p. 15-26. 4° PER B 20-8.

Melin 2007 : MELIN, Charlotta Bylund. « A presentation of a new experimental test method for humidity buffers – a comparison of two silica gels, Artsorb and Prosorb », In *Museum Microclimates, Abstracts of posters at the Copenhagen conference 19 - 23 November 2007*, The National Museum of Denmark, 2007.p 9-11.

Michalski 1985 : MICHALSKI Stefan, « Module de régulation de l'humidité relative », in *Museum international* (Ed. Française) vol.37, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 1985, p.85-88.

Michalski 2017 : MICHALSKI, Stefan. « Taux d'humidité relative contre-indiqués ». In *Les dix agents de détérioration, Site Institut canadien de conservation* [En ligne]. 2017.
<http://canada.pch.gc.ca/fra/1444925238726>

Padfield 1966 : PADFIELD, Tim. The control of relative humidity and air pollution in showcases and picture frames. In : *Studies in Conservation*, 11/1, (1966), p. 8-29.

Qi 2017 : Ronghui Qi et als, « Experimental investigation on membrane-based eletrolytic dehumidification for air conditioning systems. », Elsevier Ltd, in : *Precedia engineering*, 2017, Vol.205, p. 3194-3198.

Roquebert 2002 : ROQUEBERT Marie-France, « Les contaminants biologiques des biens culturels », *Museum national d'histoire naturelle*, 2002, Paris, p.71-87.

Shiner 2007 : SHINER, Jerry. Trends in microclimate control of museum display cases. In : *Museum Microclimates*, T. Padfield & K. Borchersen (eds.) National Museum of Denmark, (2007), p. 267-275.

Tétreault 2018 : TETREAULT, Jean et BEGIN, Paul. Gel de silice : contrôle passif de l'humidité relative. *Bulletin technique* N° 33. ICC-CCI. 2018

Thickett 2005 : THICKETT David, DAVID Frances, LUXFORD Naomi, « Air exchange rate, the dominant parameter for preventive conservation ? », *Conservator (The)*, 2005, n° 29, p. 19-34. 4° PER 20-7.

Wanielista 1996 : WANIELISTA Martin et als., « Hydrology : Water quantity and quality control », John Wiley and Sons Inc, Hoboken, 1996, USA.

Weintraub 2002 : WEINTRAUB, Steven. Demystifying silica gel. In *Object Specialty Group Postprints*, vol.9, American Group for Conservation, Washington, 2002.

Yamauchi 1999 : YAMAUCHI Shiro et als., « Humidity control for display cases in museums using a solid-state water removal device », ICOM-CC, 12th triennial meeting Lyon, 29 august - 3 september 1999.

Yu 2019 : YU, Meng et als, « A novel passive method for Regulating both air temperature and relative humidity of the Microenvironment in Museum Display Cases »,in *Energies* vol.12, Basel, 2019.

Sources techniques :

Fiche technique FluXor™ :

MaFabrique, Notice d'utilisation du FluXor FX-CA : contrôleur autonome d'humidité.

Liste de prix :

MaFabrique, Tarifs 2023.

Fiches techniques EBC 10™ :

MiniClima, Notice de présentation : Serie EBC Humidity Control, 2021.

MiniClima, Manuel EBC, 2013.

Les tarifs ont été fournis par un échange e-mail avec Long Life for Art.

Fiche technique Prosorb™:

Long Life for Art, Prosorb : humidity stabilizer, product information, 2017.

Fiche technique des Vitrines de Boulogne -sur-Mer:

Goppion, Fiche de présentation de fabrication, d'utilisation et de fonctionnement des systèmes de régulation des vitrines, 2015.

Liste des illustrations :

Illustration 1 : Schéma présentant le fonctionnement d'une PEM. ©LRMH-Bousta	12
Illustration 2 : Prise de vue d'une membrane en position. ©LRMH.....	13
Illustration 3 : Schéma de proposition d'installation d'un système FluXor. ©MaFabrique	13
Illustration 4 : Présentation d'un système EBC 10. ©Long Life for Art.	15
Illustration 5 : Présentation d'une cassette de silice. ©Long Life for Art.	17
Illustration 6 : Schéma proposant l'installation d'un système de régulation via cassette Prosorb™. ©Long Life for Art.	17
Illustration 7 : Prise de vue de la vitrine du voile de la Vierge à Chartres. ©Goppion.	19
Illustration 8 : Prise de vue de la vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy. © Promuseum	20
Illustration 9 : Prise de vue de la vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy et mise en évidence du système à support coulissant. ©Promuseum	21
Illustration 10 : Prise de vue de la vitrine de la chasse de St Caprais. ©LRMH - Peyre	22
Illustration 11 : Extrait du plan de la crypte de la basilique que Boulogne-sur-Mer, mise en évidence de la salle étudiée. © LRMH.....	23
Illustration 12 : Prise de vue présentant les vitrines 8 a, b et c de la salle d'Art Sacré. ©LRMH – Peyre.	24
Illustration 13 : Prise de vue présentant la vitrine 5. ©LRMH-Peyre.	25

Liste des graphiques présents dans le corps de texte :

Graph. 1 : Cas d'Autun, exemple d'un comportement idéal du FluXor.....	14
Graph. 2 : Exemple d'une régulation mécanisée. Issu de Goli 2017	16
Graph. 3 : Exemple d'une régulation passive. Issu de Weintraub 2002	18
Graph. 4 : Chartres, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.....	31
Graph. 5 : Chartres, Dispersion des valeurs mesurées.....	32
Graph. 6 : Cuffy, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.	33
Graph. 7 : Cuffy, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine.....	34
Graph. 8 : St Vrain, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine.	35
Graph. 9 : St Vrain, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine.....	36
Graph. 10 : Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8a.....	37
Graph. 11 : Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 5.....	39
Graph. 12 : Profils hygrométriques des vitrines étudiées.	41
Graph. 13 : Profils de stabilisation des vitrines étudiées.	41
Graph. 14 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes du FluXor.	50
Graph. 15 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes de l'EBC 10.....	50
Graph. 16 : Empreinte graphique de comparaison - valeurs moyennes du Gel de Silice.....	51
Graph. 17 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 1.	52
Graph. 18 : Comparaison des empreintes du scénario 1 et du Gel de Silice.	53
Graph. 19 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 2.	54
Graph. 20 : Comparaison des empreintes du scénario 2 et du FluXor-PEM.	55
Graph. 21 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 3.	56
Graph. 22 : Comparaison des empreintes du scénario 3 et de l'EBC 10.	57
Graph. 23 : Empreinte graphique de comparaison du scénario 4.	58
Graph. 24 : Comparaison des empreintes du scénario 4 et du systèmes de régulation de Chartres (FluXor en situation de fonctionnement idéal, présent dans une vitrine très étanche.).....	59

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Liste des critères de comparaison.	28
Tableau 2 : Echelle de notation des critères.	30
Tableau 3 : Evaluation de la consigne.	42
Tableau 4 : Evaluation de la stabilisation.	42
Tableau 5 : Evaluation de la consommation en énergie.	43
Tableau 6 : Evaluation de l'entretien.	44
Tableau 7 : Evaluation du coût d'achat.	45
Tableau 8 : Evaluation du temps avant stabilisation.	45
Tableau 9 : Evaluation du niveau de bruit émis.	46
Tableau 10 : Evaluation de la plage de température pour fonctionnement.	46
Tableau 11 : Evaluation du volume traitable par unité.	47
Tableau 12 : Evaluation de la pérennité du système.	47
Tableau 13 : Evaluation de la capacité de modulation.	48
Tableau 14 : Evaluation de l'aide à la surveillance du climat intégrée.	48
Tableau 15 : Notes correspondant au scénario 1.	52
Tableau 16 : Notes correspondant au scénario 2.	54
Tableau 17 : Notes correspondant au scénario 3.	56
Tableau 18 : Notes correspondant au scénario 4.	58

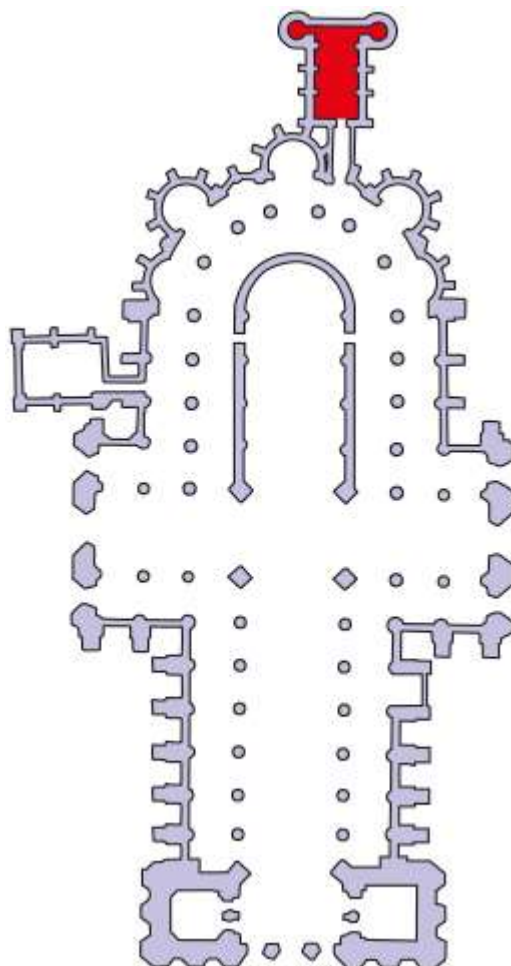
Liste des graphiques présent en annexes :

Graphique 1 : A.2.1.1 Chartres, évolution thermo-hygrométrique.	74
Graphique 2 : A.2.1.2. Chartres, Dispersion des valeurs mesurées.	75
Graphique 3 : A.2.1.3 Chartres, Evolution hydrique de la vitrine.	75
Graphique 4 : A.2.1.4 Chartres, Répartition de variations journalières de la cathédrale.	76
Graphique 5 : A.2.1.5, Chartres, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.	76
Graphique 6 : A.2.2.1 Cuffy, Evolution thermo-hygrométrique.	77
Graphique 7 : A.2.2.2 Cuffy, Dispersion des valeurs mesurées.	77
Graphique 8 : A.2.2.3 Cuffy, Evolution hydrique de la vitrine.	78
Graphique 9 : A.2.2.4 Cuffy, Répartition des variations journalières de l'espace d'exposition.	78
Graphique 10 : A.2.2.5 Cuffy, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.	79
Graphique 11 : A.2.3.1 St Vrain, Evolution thermo-hygrométrique.	80
Graphique 12 : A.2.3.2 St Vrain, Dispersion des valeurs mesurées.	80
Graphique 13 : A.2.3.3 St Vrain, Evolution hydrique de la vitrine.	81
Graphique 14 : A.2.3.4 St Vrain, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.	81
Graphique 15 : A.2.4.1 Boulogne, Répartition des variations journalières de la salle du trésor de la crypte.	82
Graphique 16 : A.2.4.2 Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8a.	83
Graphique 17 : A.2.4.3 Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8c.	83
Graphique 18 : A.2.4.4 Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine 8a.	84
Graphique 19 : A.2.4.5 Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine 8c.	84
Graphique 20 : A.2.4.6 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 8a.	85
Graphique 21 : A.2.4.7 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 8c.	85
Graphique 22 : A.2.4.8 Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 8a.	86
Graphique 23 : A.2.4.9 Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 8c.	86
Graphique 24 : A.2.5.1 Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 5.	87
Graphique 25 : A.2.5.2 Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 6.	87
Graphique 26 : A.2.5.3 Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 10.	88
Graphique 27 : A.2.5.4 Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 5.	88
Graphique 28 : A.2.5.5 Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 6.	89
Graphique 29 : A.2.5.6 Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 10.	89
Graphique 30 : A.2.5.7 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 5.	90
Graphique 31 : A.2.5.8 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 6.	90

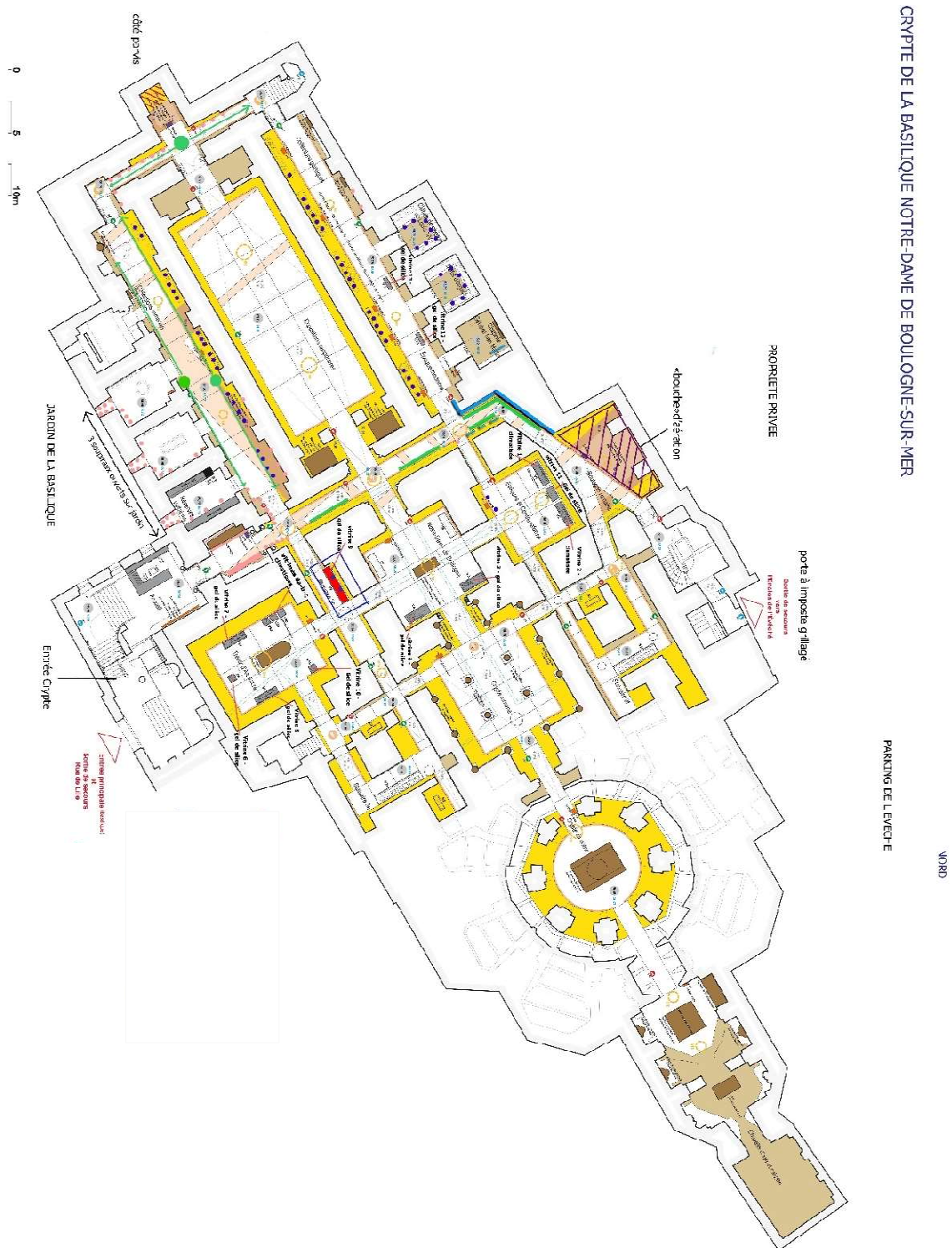
Graphique 32 : A.2.5.9 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 10.	91
Graphique 33 : A.2.5.10 Boulogne, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine 5. ...	91
Graphique 34 : A.2.5.11 Boulogne, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine 6. ...	92
Graphique 35 : A.2.5.12 Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 10.	92
Graphique 36 : A.2.6.1 Profils hygrométriques des différentes vitrines étudiées.....	93
Graphique 37 : A.2.6.2 Profils de stabilisation des différentes vitrines étudiées.....	93
Graphique 38 : A.3.1 Empreinte graphique complète de la stabilisation via le FluXor-PEM.	94
Graphique 39 : A.3.2 Empreinte graphique complète de la stabilisation via l'EBC 10.....	94
Graphique 40 : A.3.3 Empreinte graphique complète de la stabilisation via Posorb.....	95
Graphique 41 : A.4.1.1 Comparaison des empreintes du scénario 1 et de l'EBC 10.	96
Graphique 42 : A.4.1.2 Comparaison des empreintes du scénario 1 et du FluXor-PEM.	96
Graphique 43 : A.4.2.1 Comparaison des empreintes du scénario 2 et de l'EBC 10.	97
Graphique 44 : A.4.2.2 Comparaison des empreintes du scénario 2 et du Gel de Silice.	97
Graphique 45 : A.4.3.1 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 3 et du FluXor.....	98
Graphique 46 : A.4.3.2 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 3 et du Gel de Silice. .	98
Graphique 47 : A.4.4.1 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et de l'EBC 10.	99
Graphique 48 : A.4.4.2 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et du FluXor-PEM. ..	99
Graphique 49 : A.4.4.3 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et du Gel de Silice.	100

Annexes

1 Présentation des vitrines : **A.1**



Plan 1 : **A.1.1** Plan de la cathédrale de Chartres avec mise en évidence de la chapelle Saint Piat. ©cathedrale-chartres.org

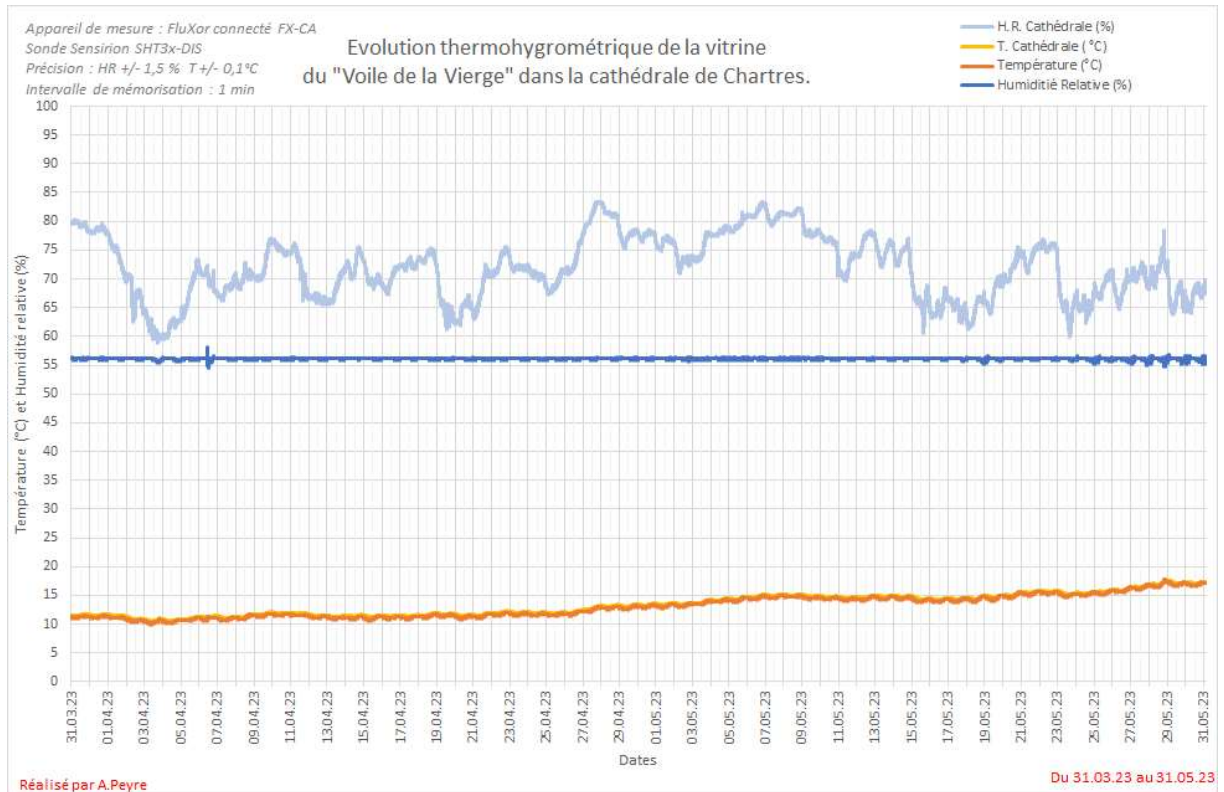


Plan 2 : **A.1.2** Plan de la crypte de Boulogne-sur-Mer. ©LRMH

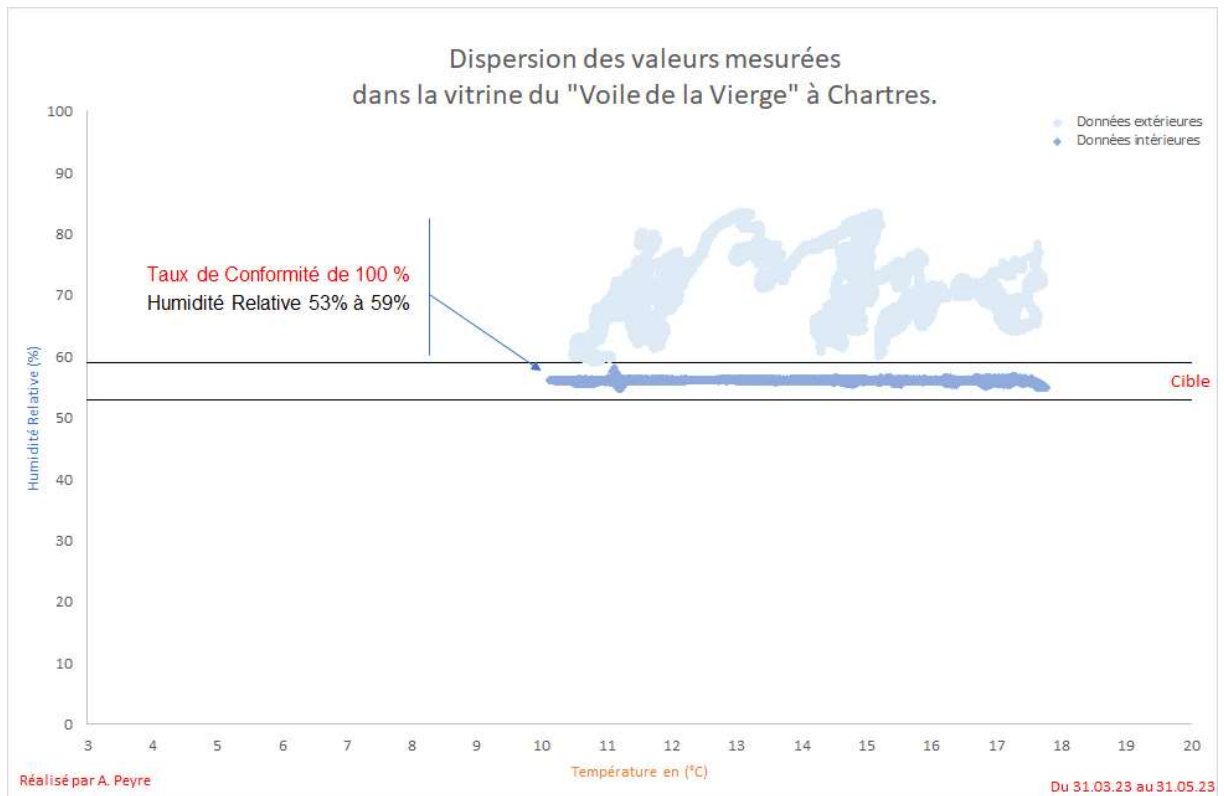
2 Graphiques :

Les graphiques seront présentés dans l'ordre du développement de ce travail.

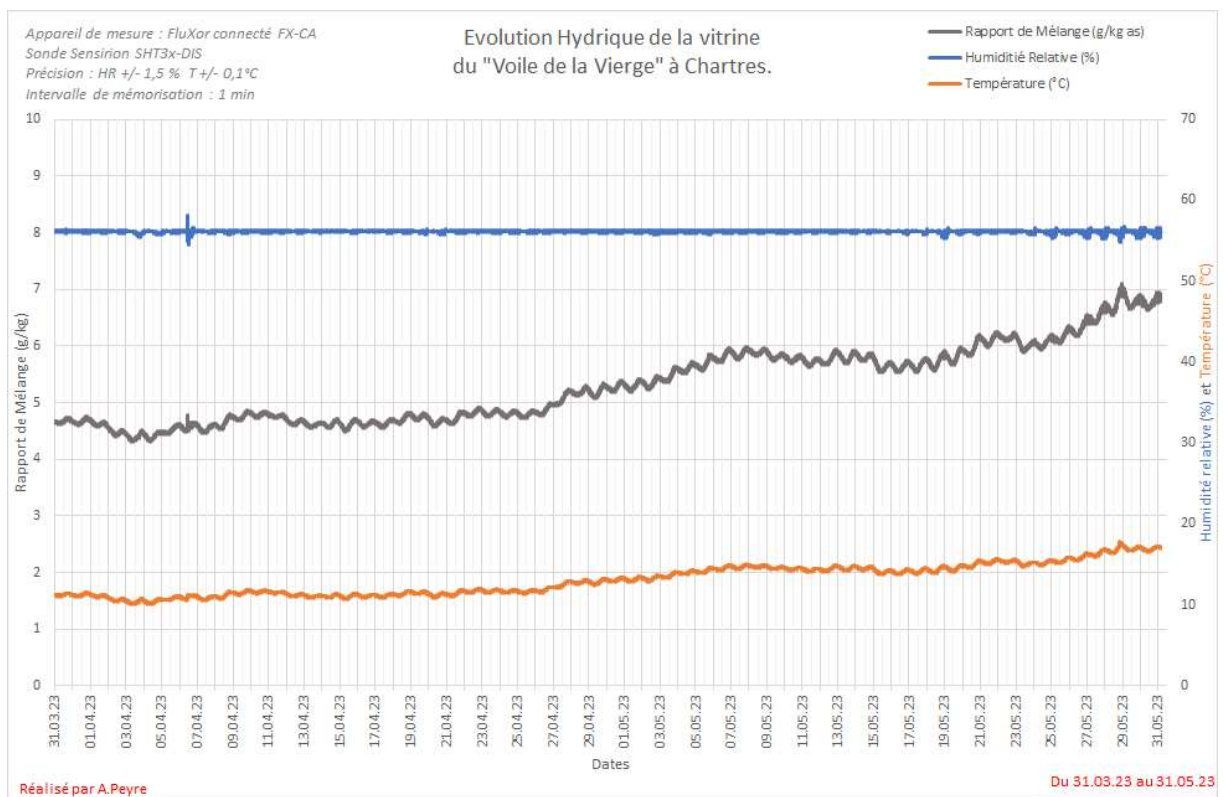
Chapitre 3 : A.2.



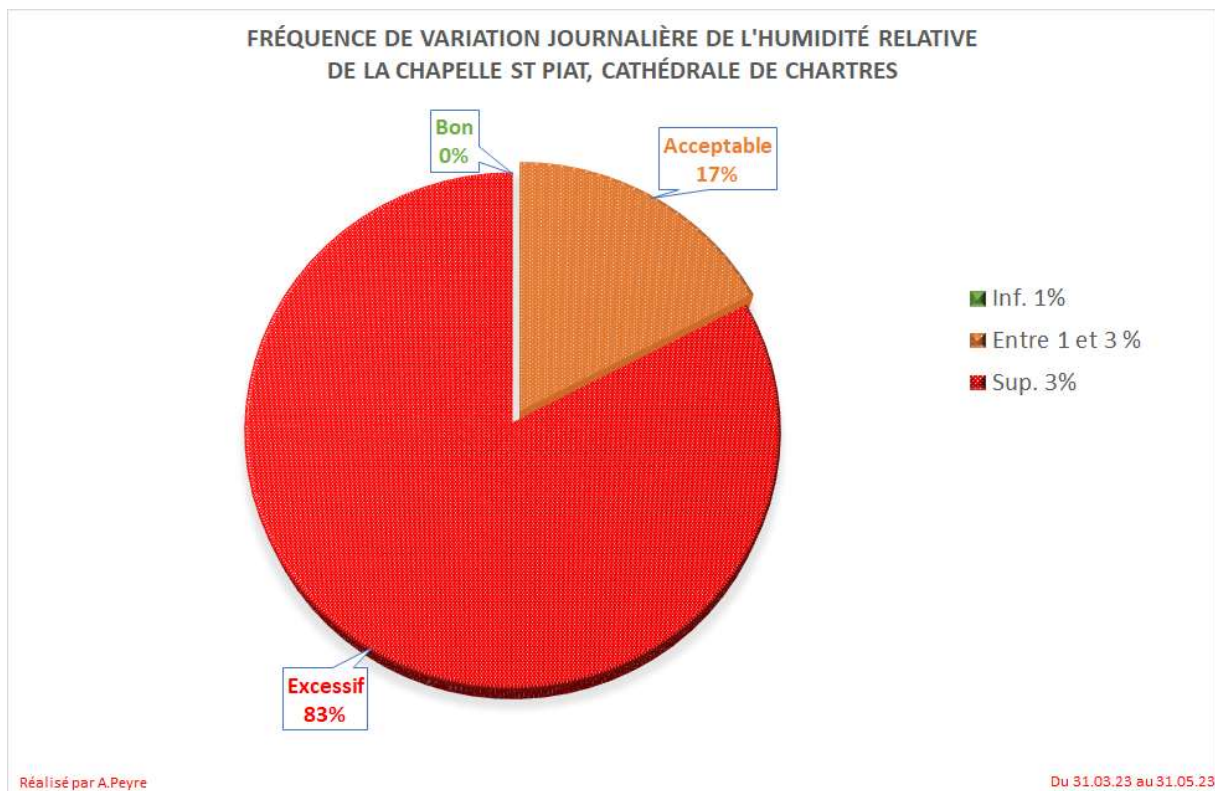
Graphique 1 : A.2.1.1 Chartes, évolution thermo-hygrométrique.



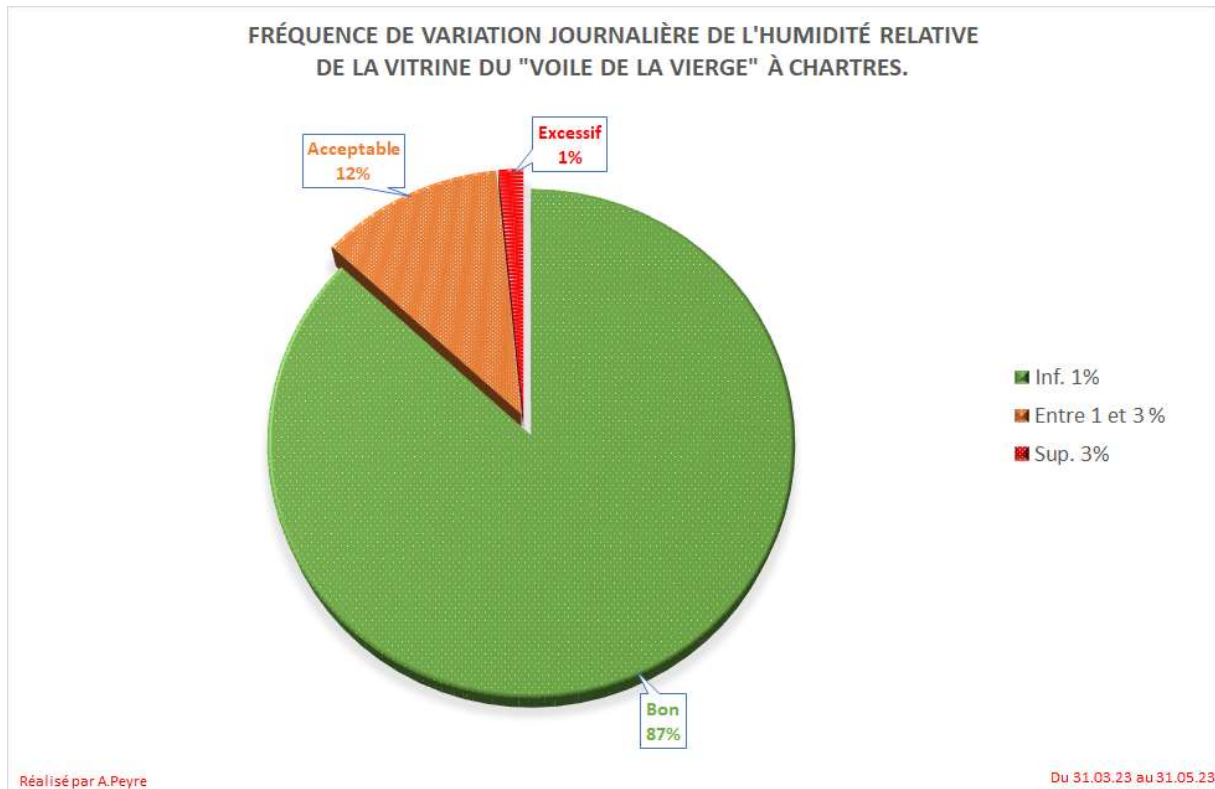
Graphique 2 : A.2.1.2. Chartres, Dispersion des valeurs mesurées.



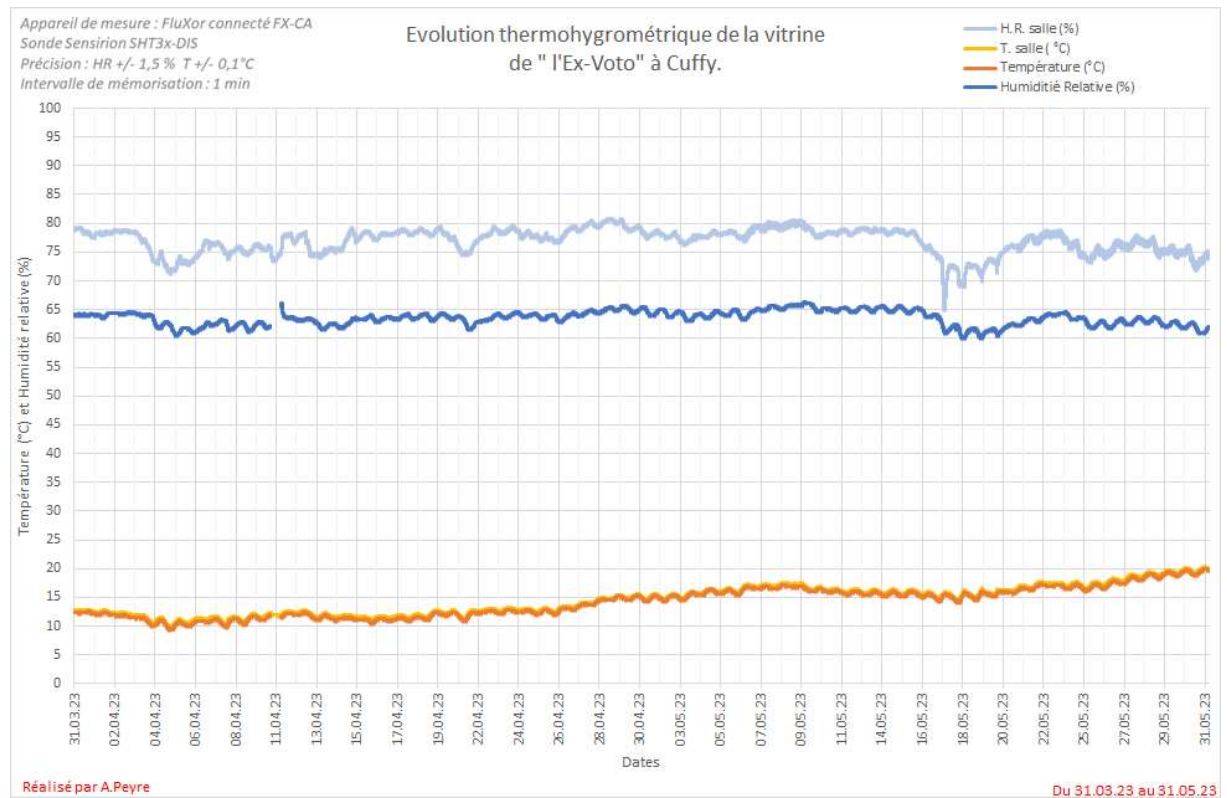
Graphique 3 : A.2.1.3 Chartres, Evolution hydrique de la vitrine.



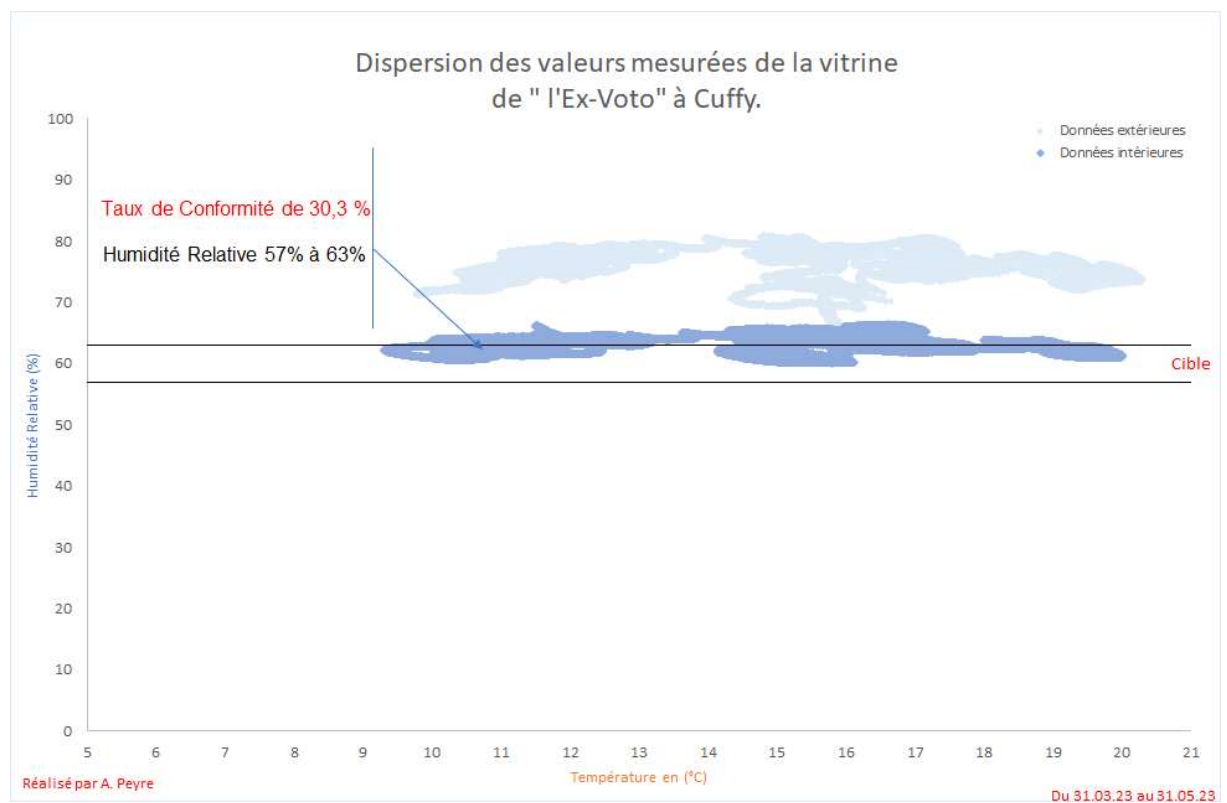
Graphique 4 : **A.2.1.4** Chartres, Répartition de variations journalières de la cathédrale.



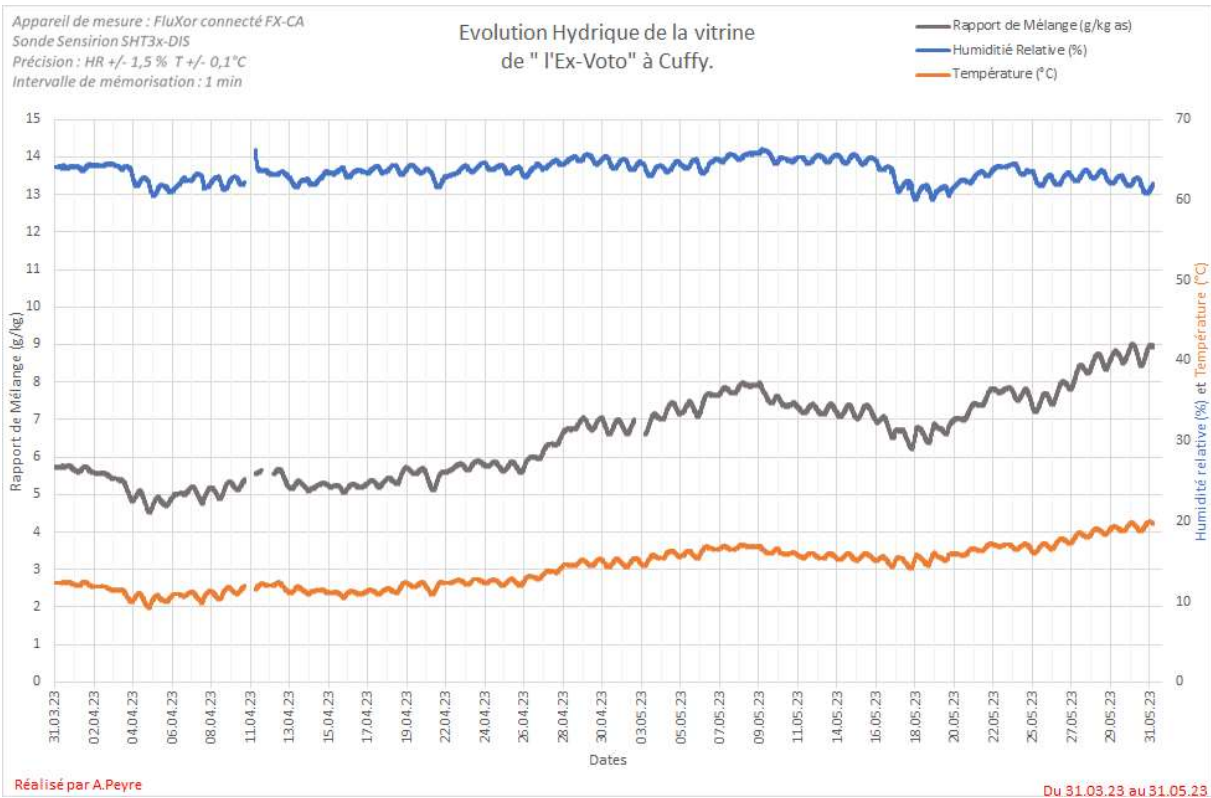
Graphique 5 : **A.2.1.5**, Chartres, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.



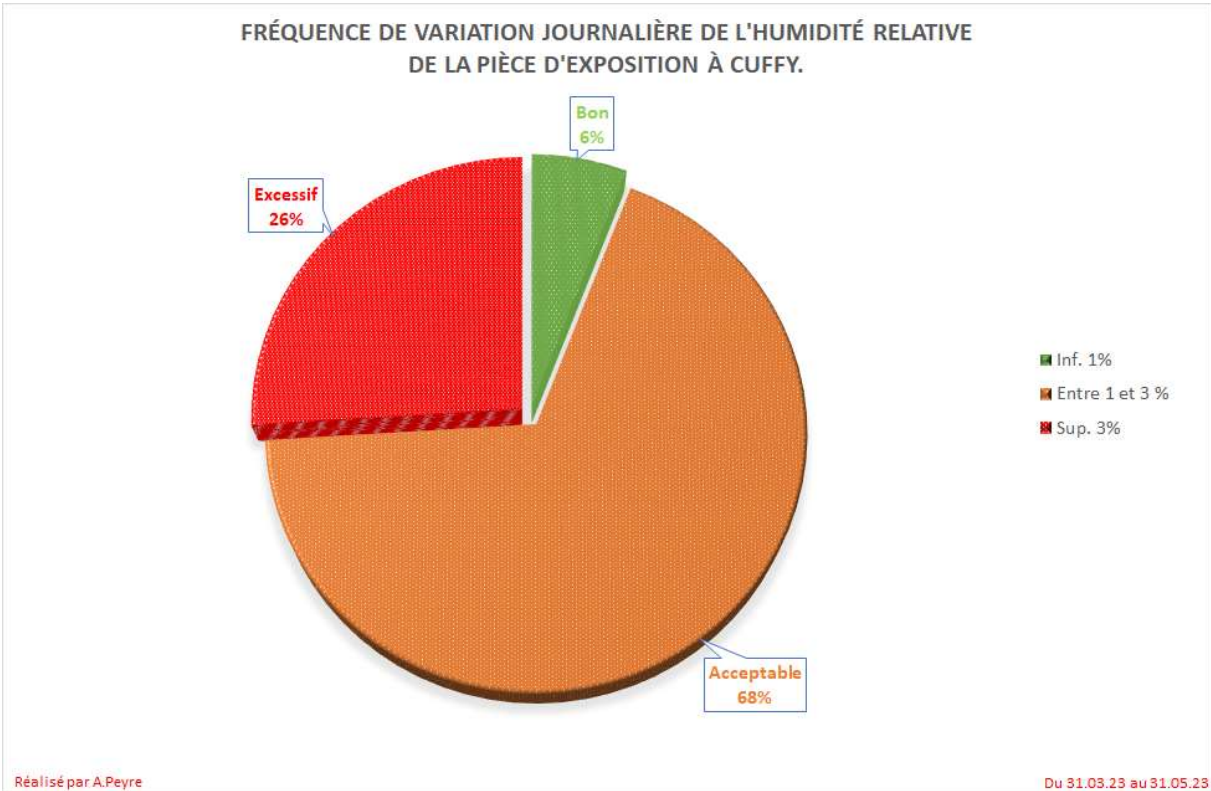
Graphique 6 : **A.2.2.1** Cuffy, Evolution thermo-hygrométrique.



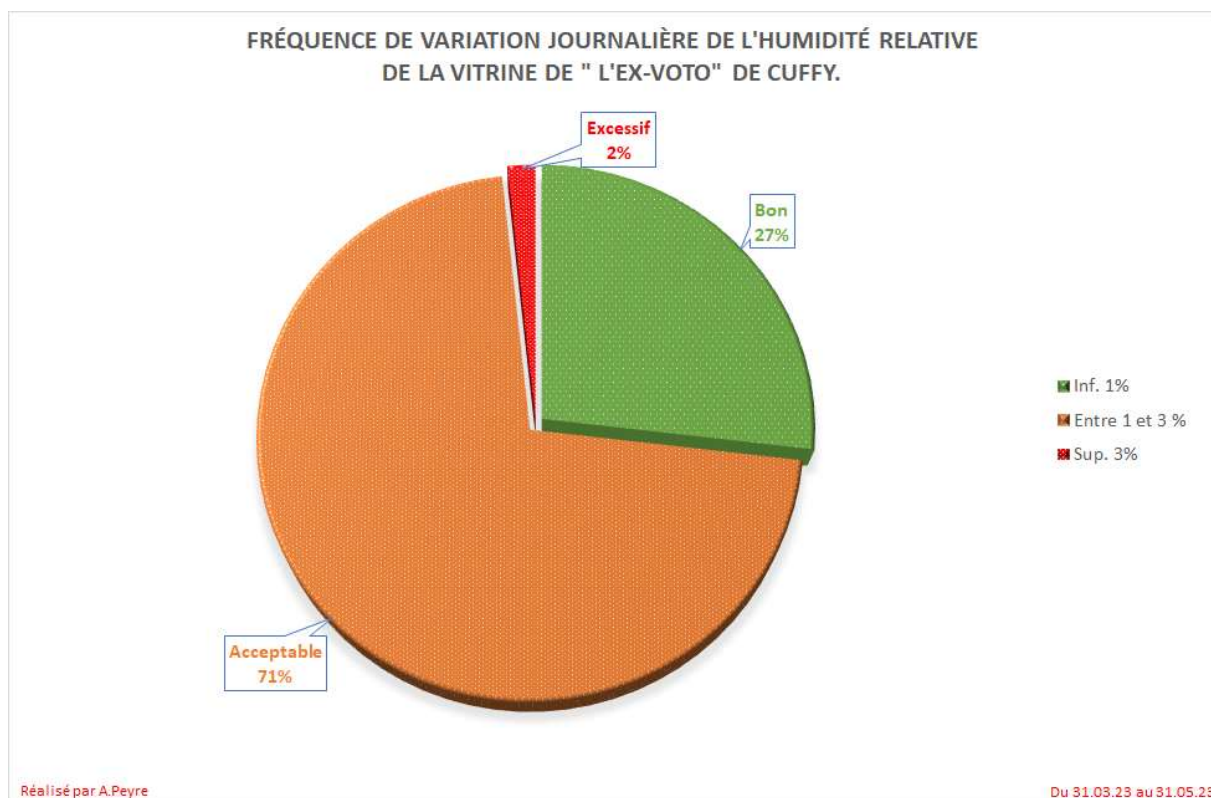
Graphique 7 : **A.2.2.2** Cuffy, Dispersion des valeurs mesurées.



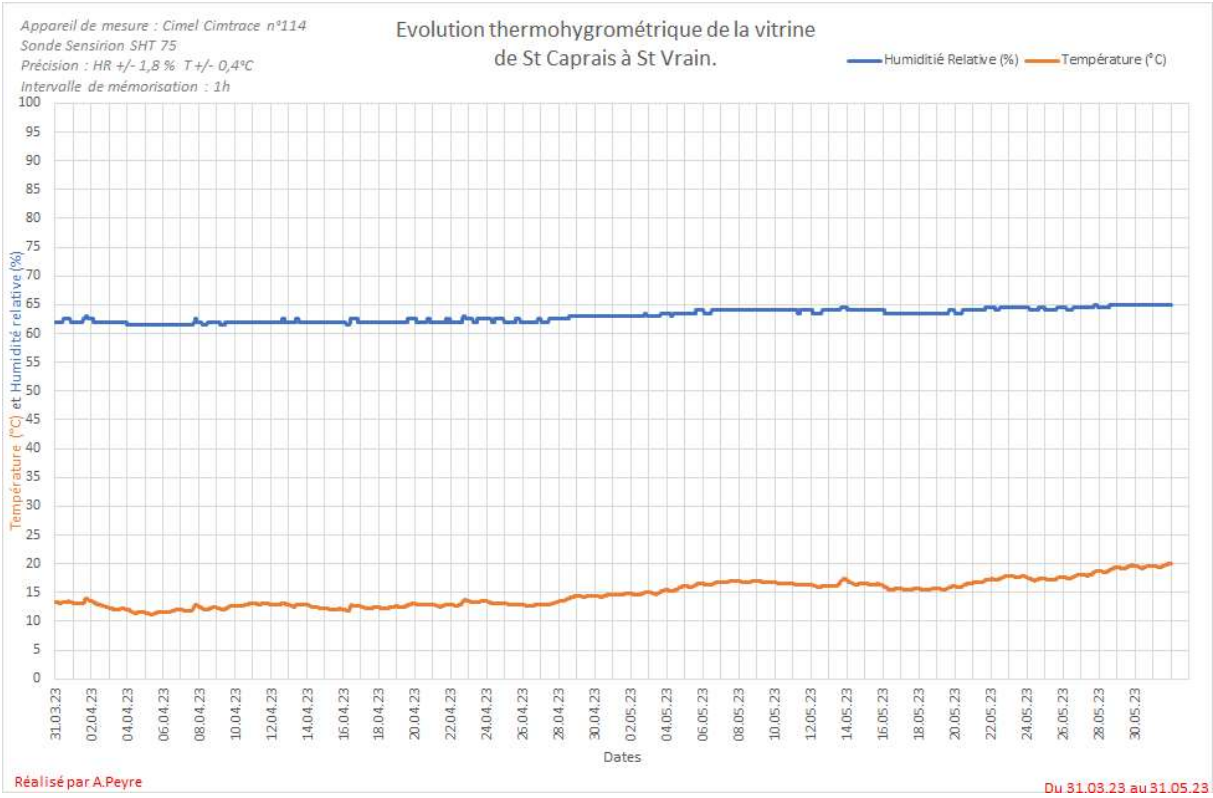
Graphique 8 : A.2.2.3 Cuffy, Evolution hydrique de la vitrine.



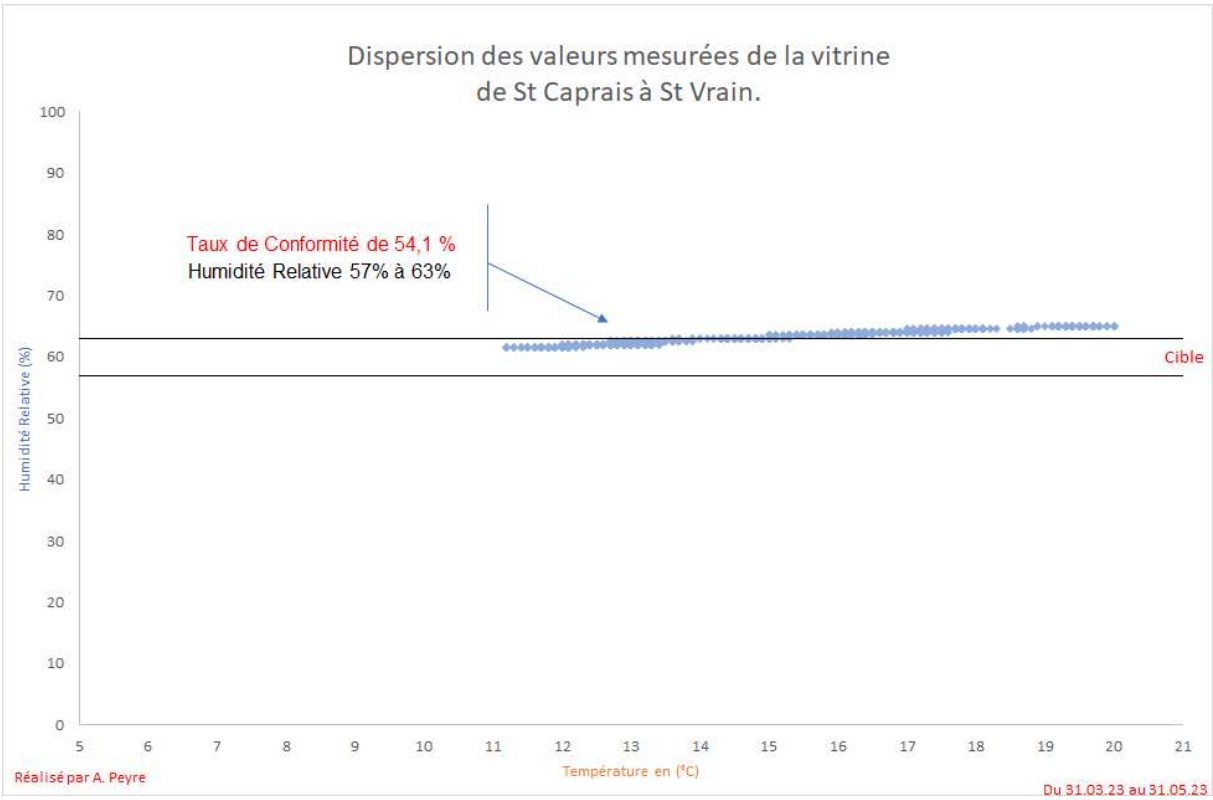
Graphique 9 : A.2.2.4 Cuffy, Répartition des variations journalières de l'espace d'exposition.



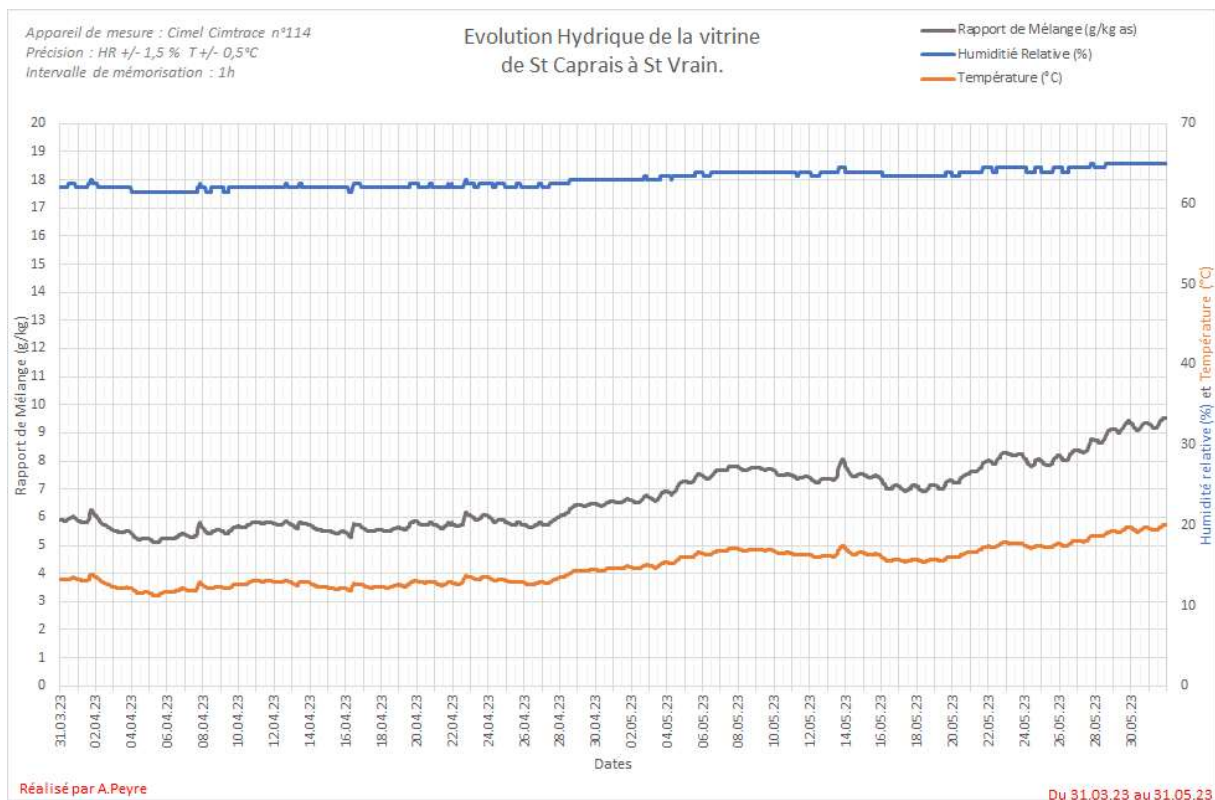
Graphique 10 : **A.2.2.5** Cuffy, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.



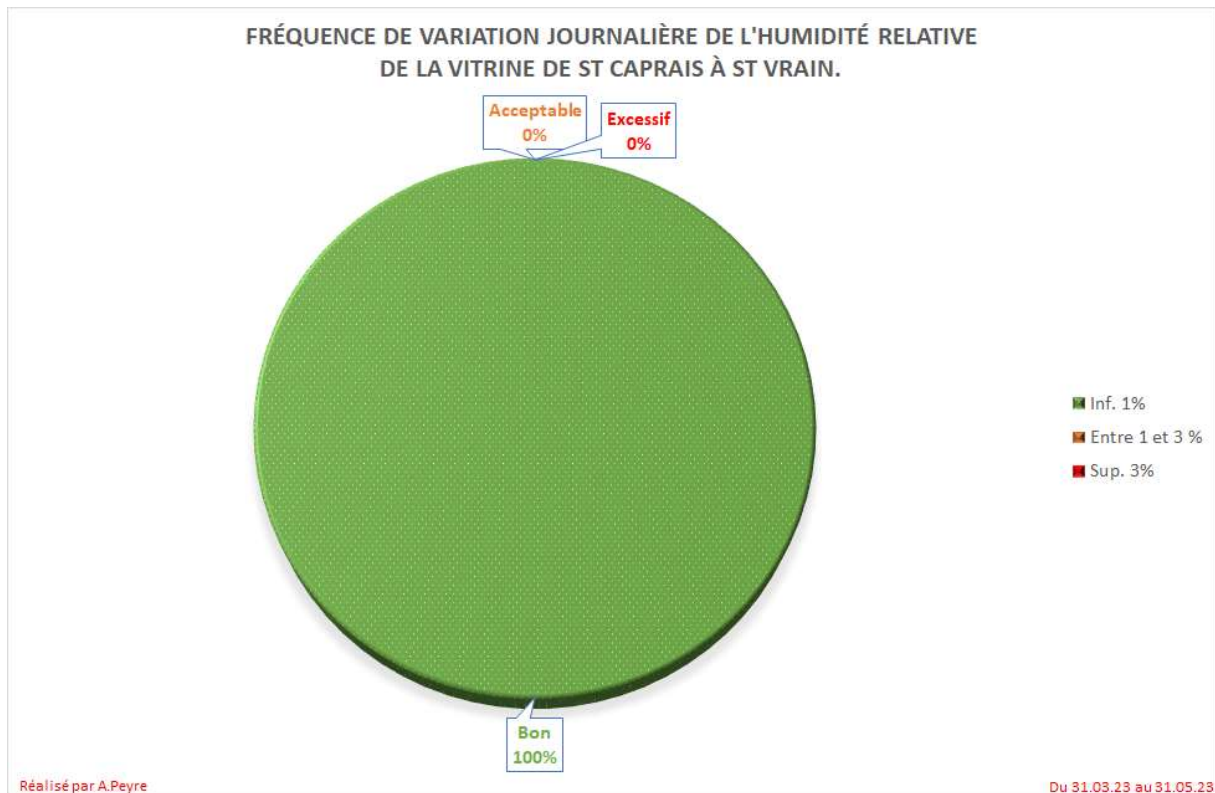
Graphique 11 : A.2.3.1 St Vrain, Evolution thermo-hygrométrique.



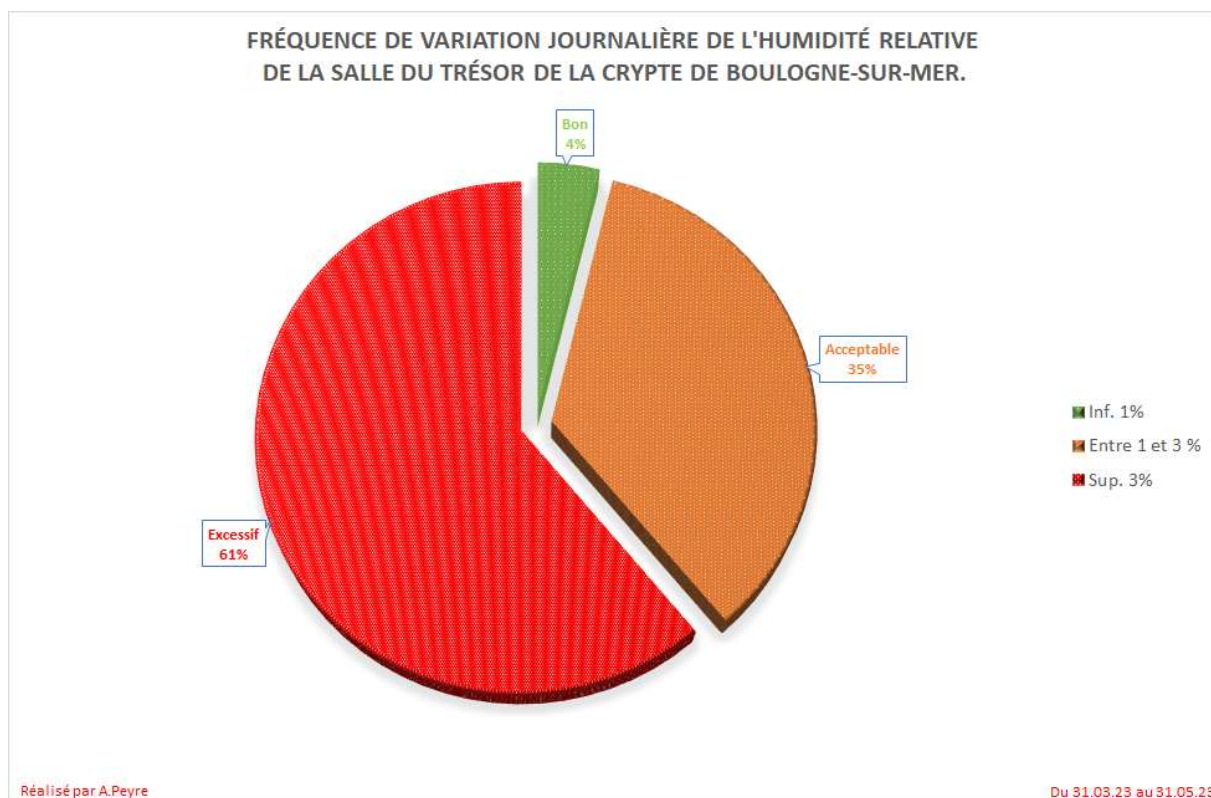
Graphique 12 : A.2.3.2 St Vrain, Dispersion des valeurs mesurées.



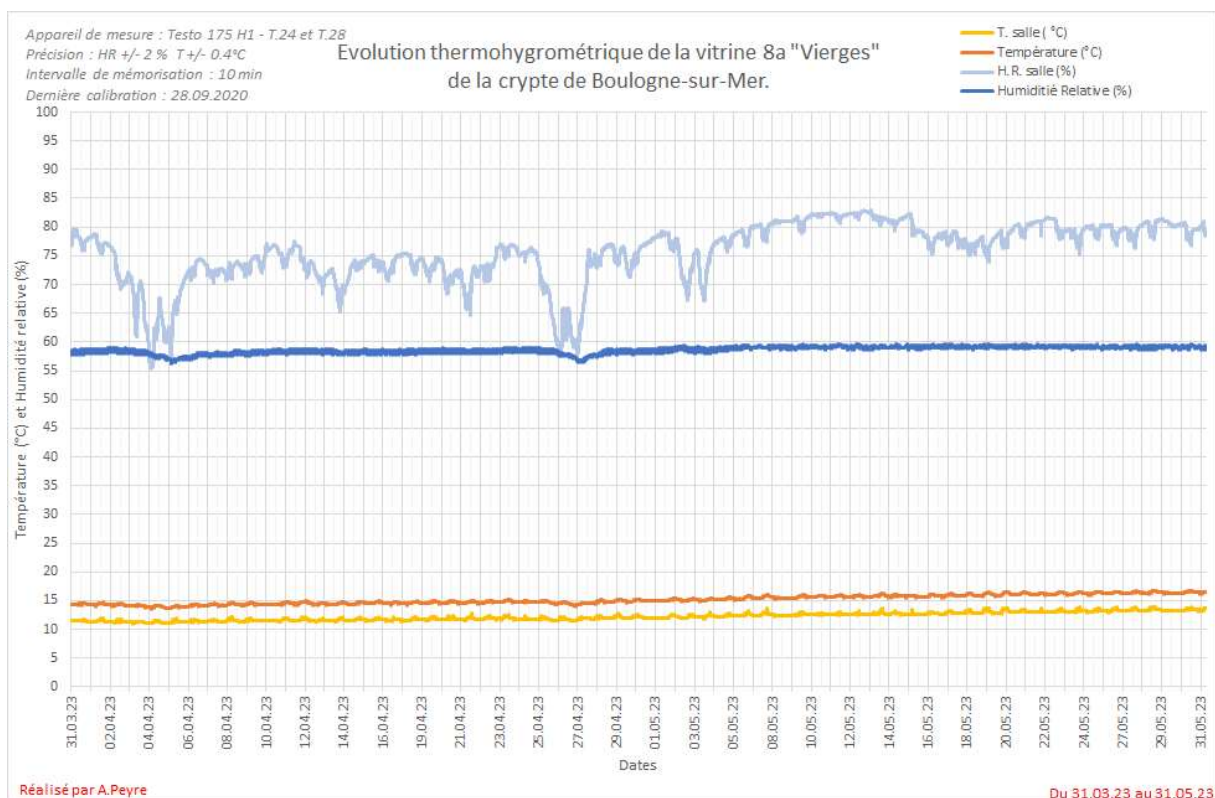
Graphique 13 : **A.2.3.3** St Vrain, Evolution hydrique de la vitrine.



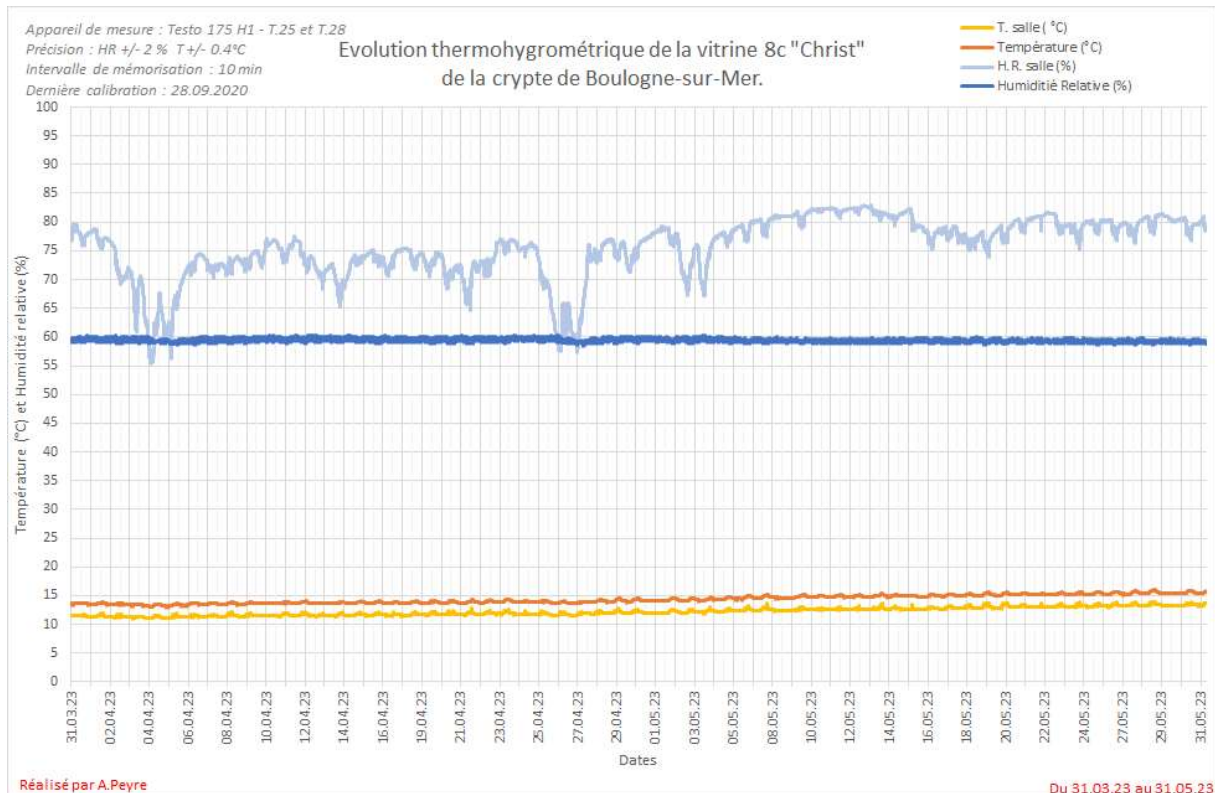
Graphique 14 : **A.2.3.4** St Vrain, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine.



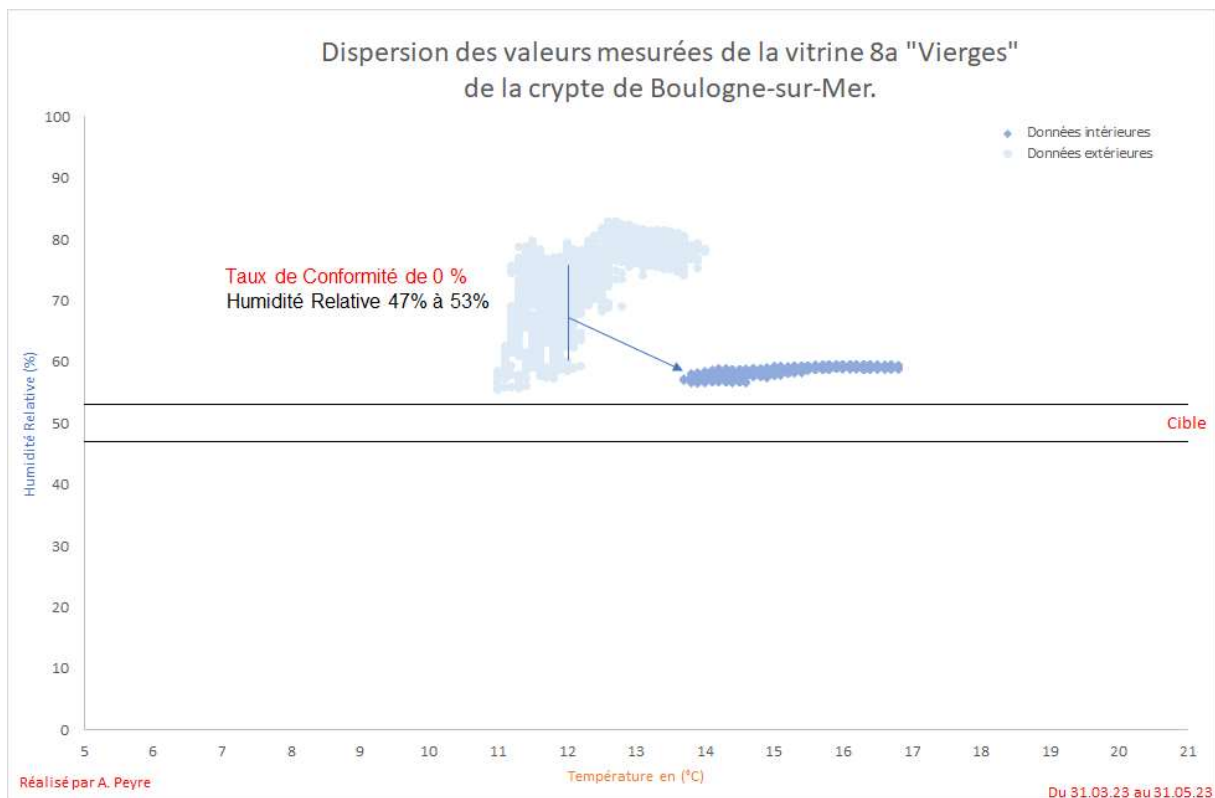
Graphique 15 : **A.2.4.1** Boulogne, Répartition des variations journalières de la salle du trésor de la crypte.



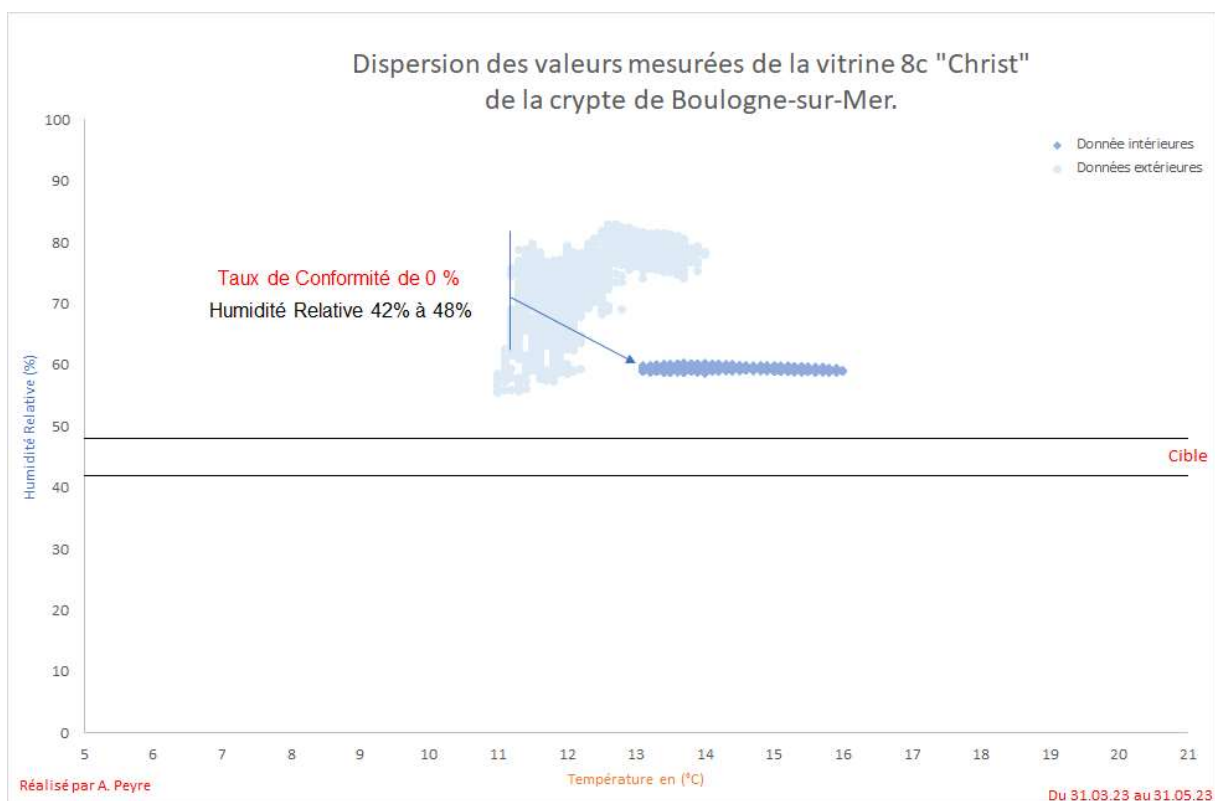
Graphique 16 : **A.2.4.2** Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8a.



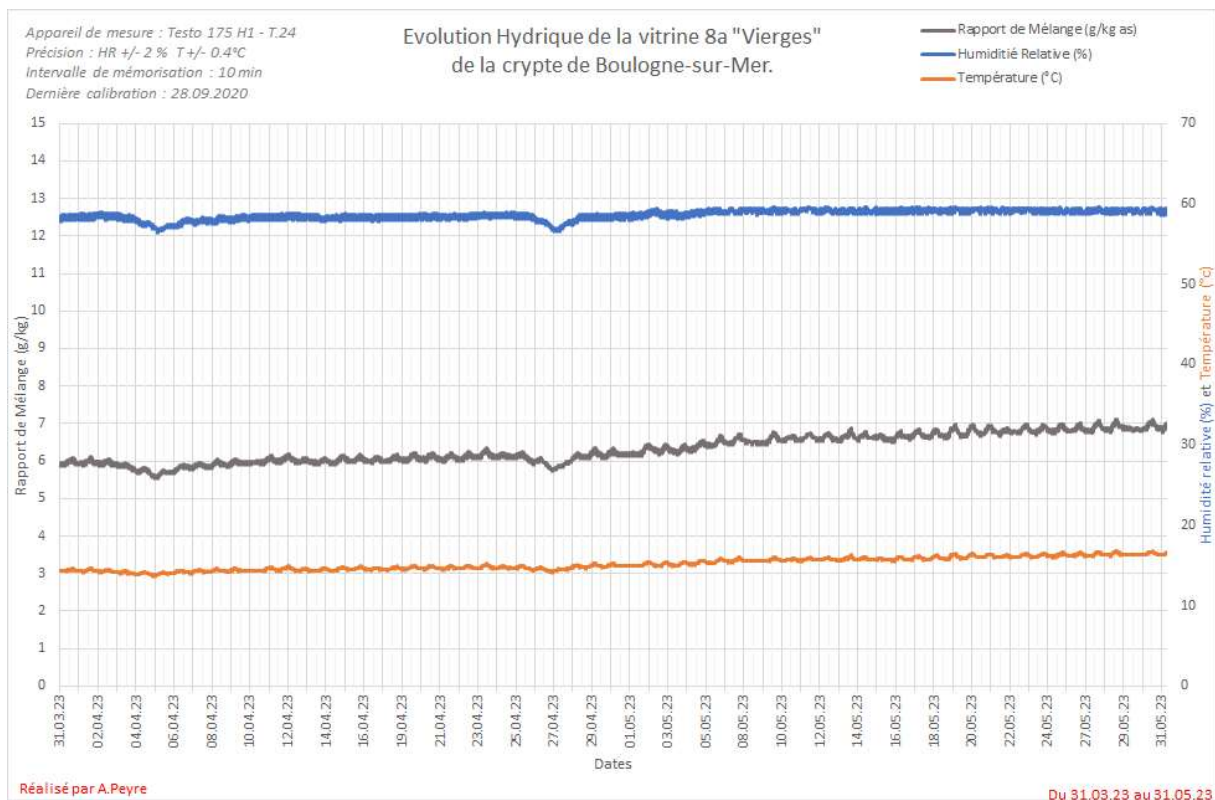
Graphique 17 : **A.2.4.3** Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 8c.



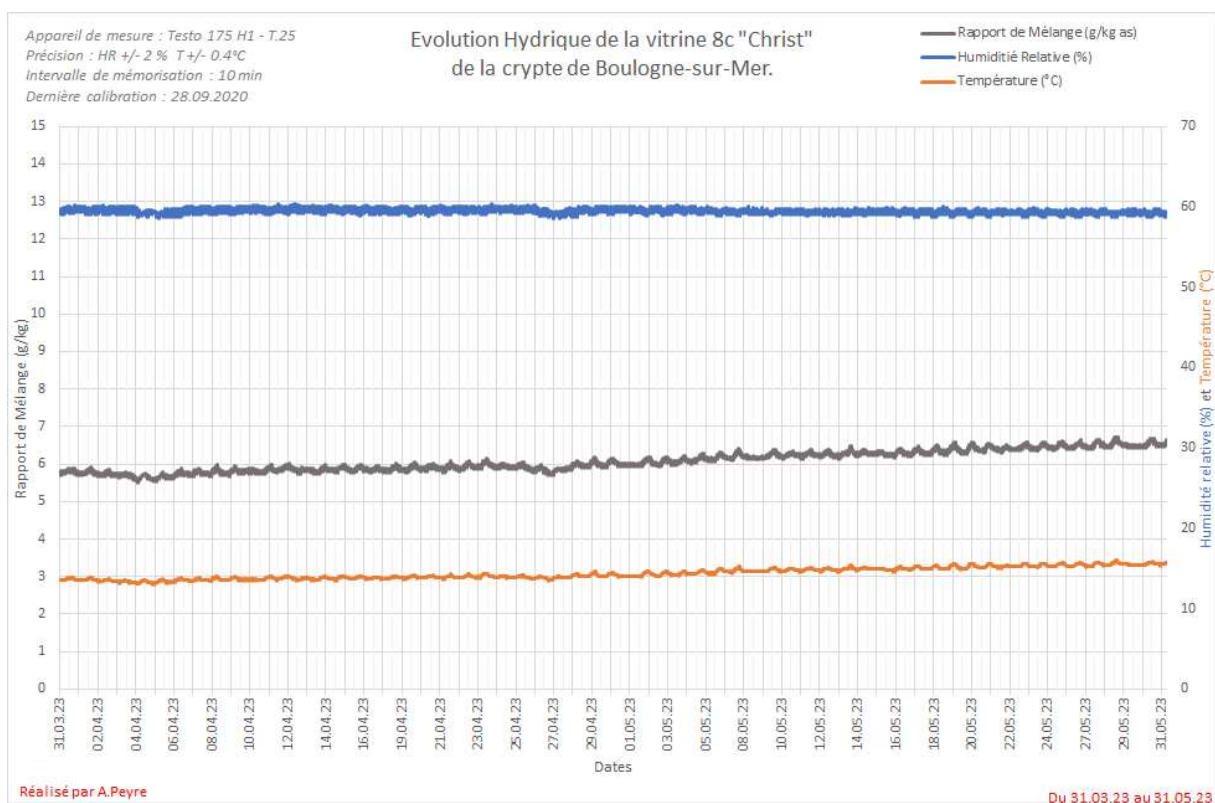
Graphique 18 : **A.2.4.4** Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine 8a.



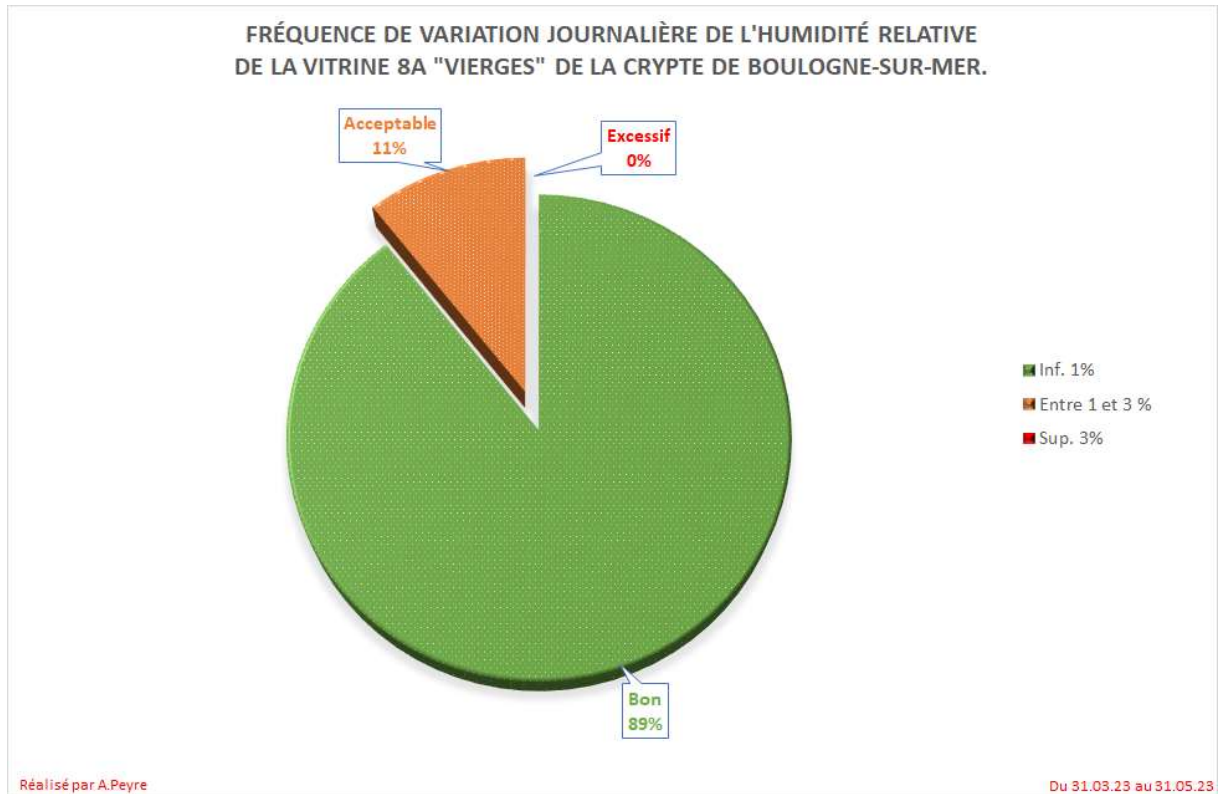
Graphique 19 : **A.2.4.5** Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées dans la vitrine 8c.



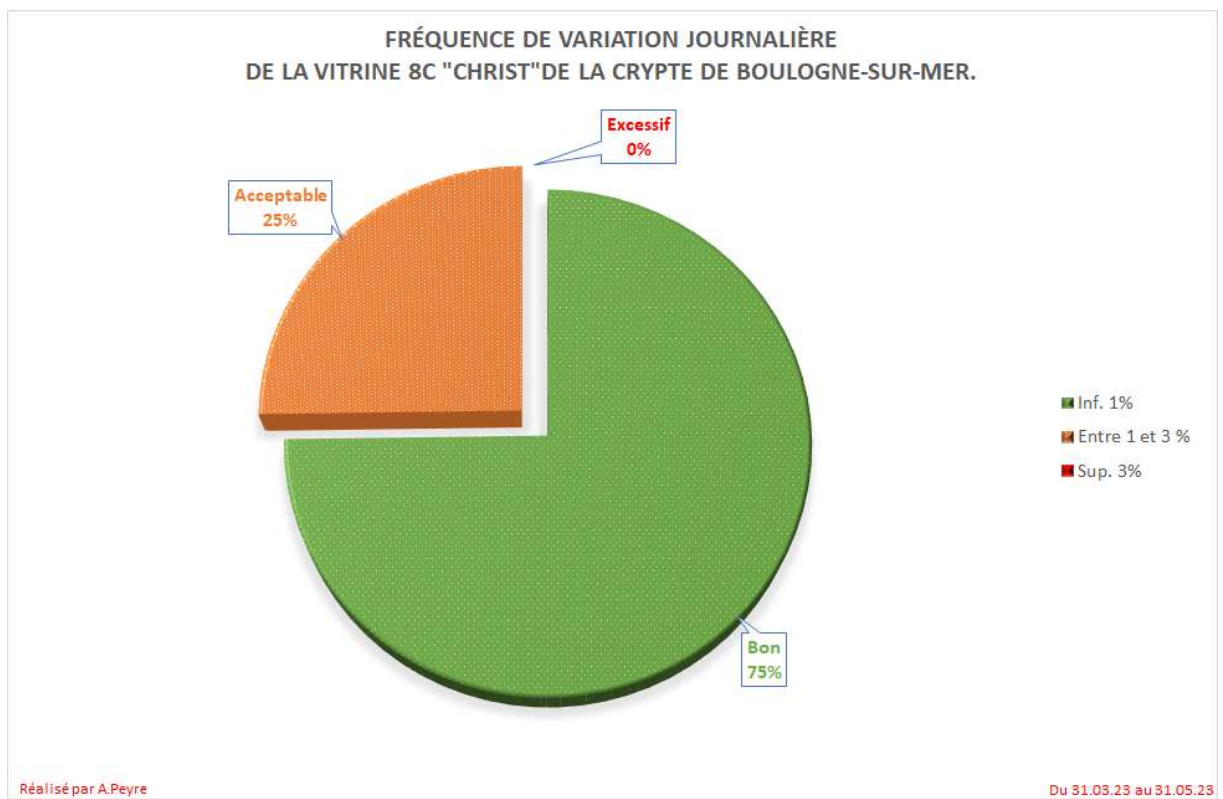
Graphique 20 : **A.2.4.6** Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 8a.



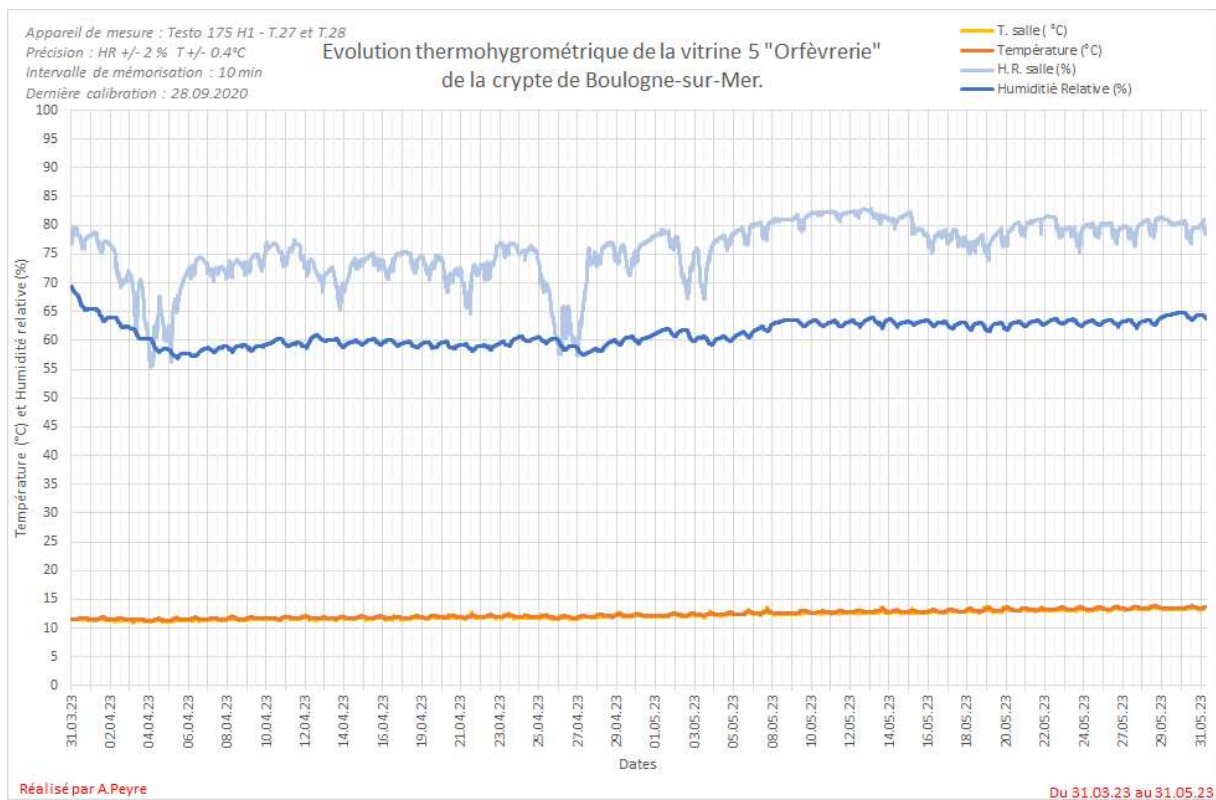
Graphique 21 : **A.2.4.7** Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 8c.



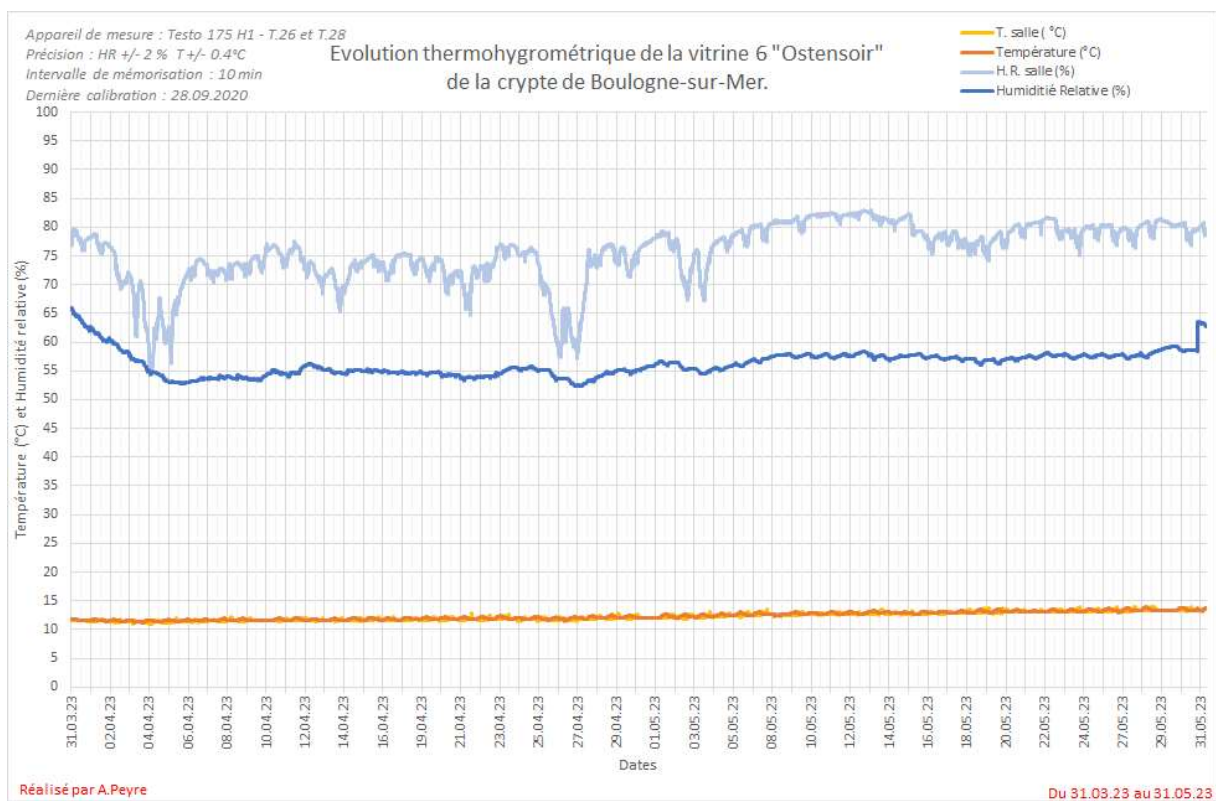
Graphique 22 : **A.2.4.8** Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 8a.



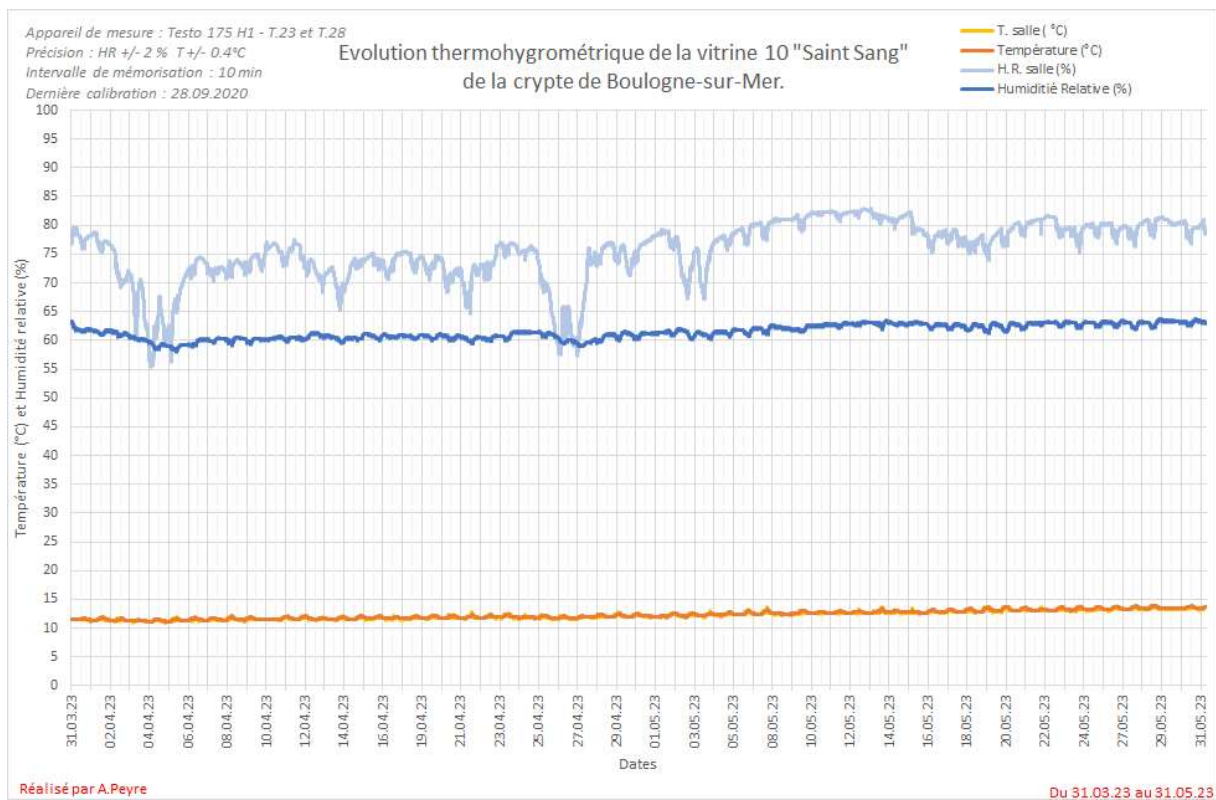
Graphique 23 : **A.2.4.9** Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 8c.



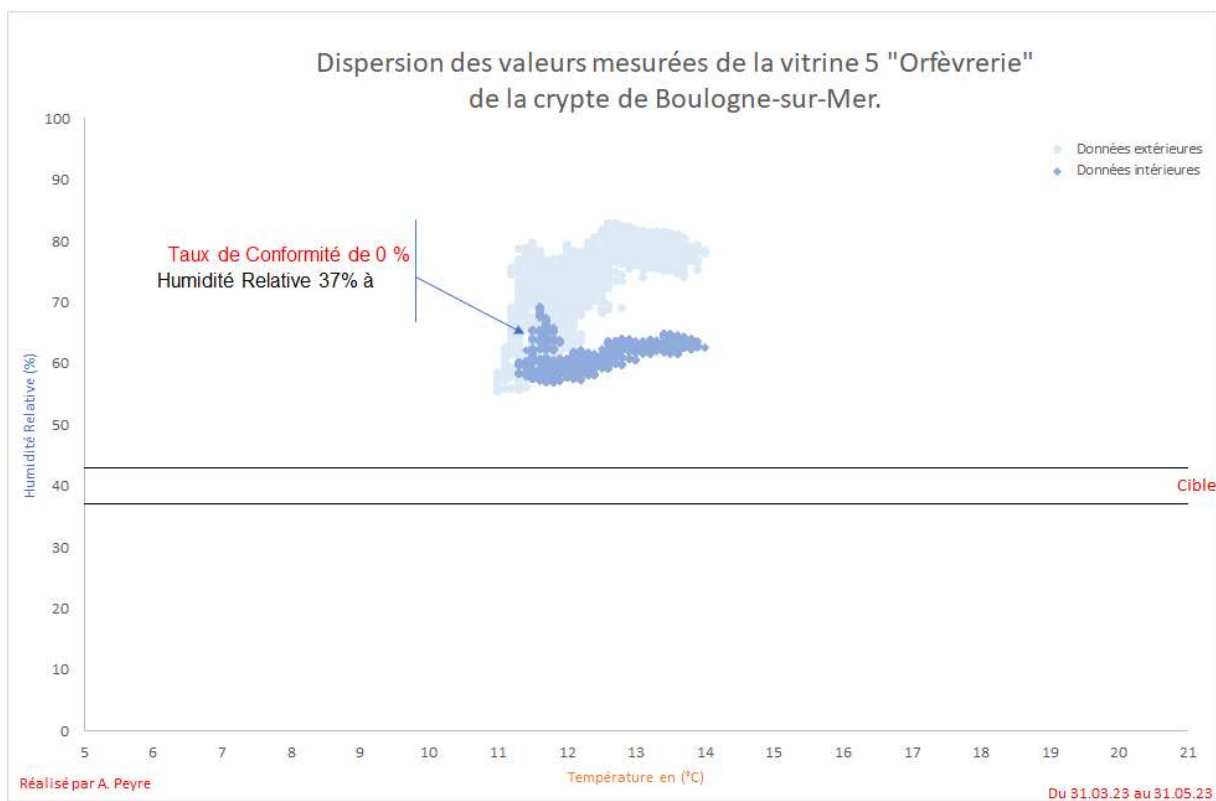
Graphique 24 : **A.2.5.1** Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 5.



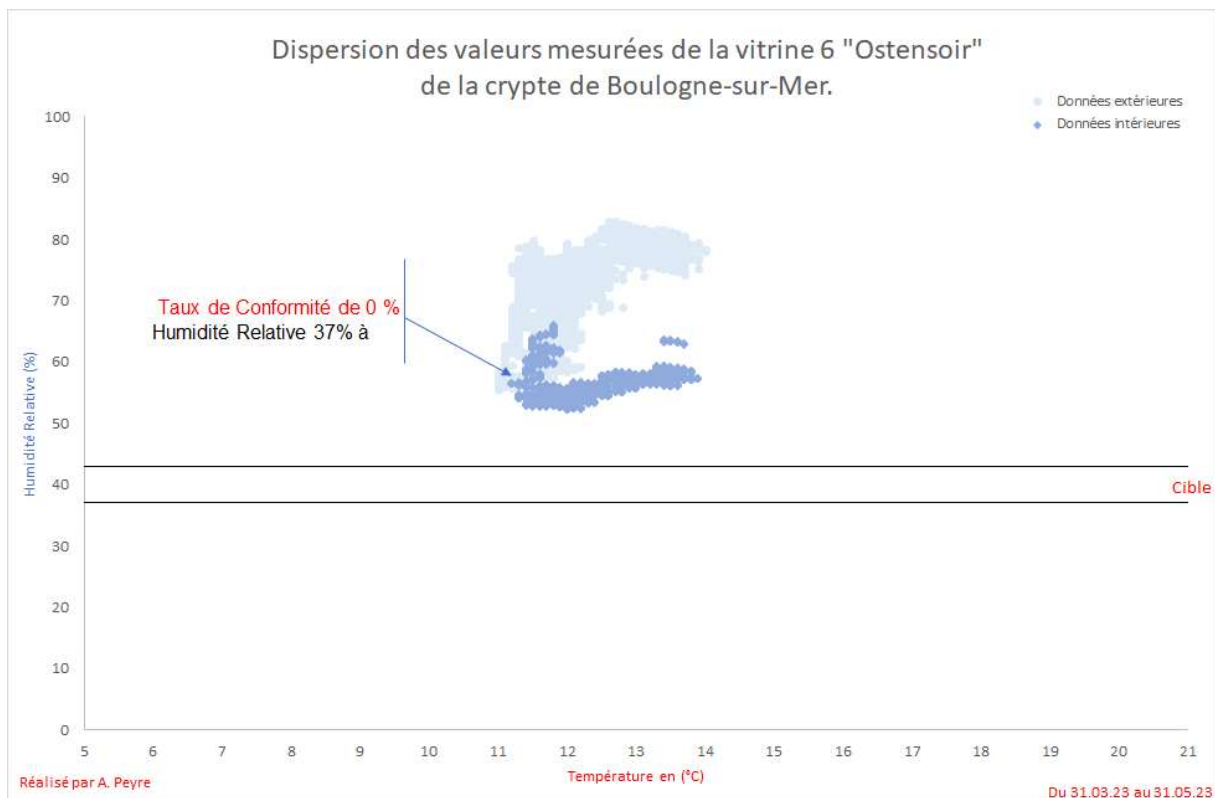
Graphique 25 : **A.2.5.2** Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 6.



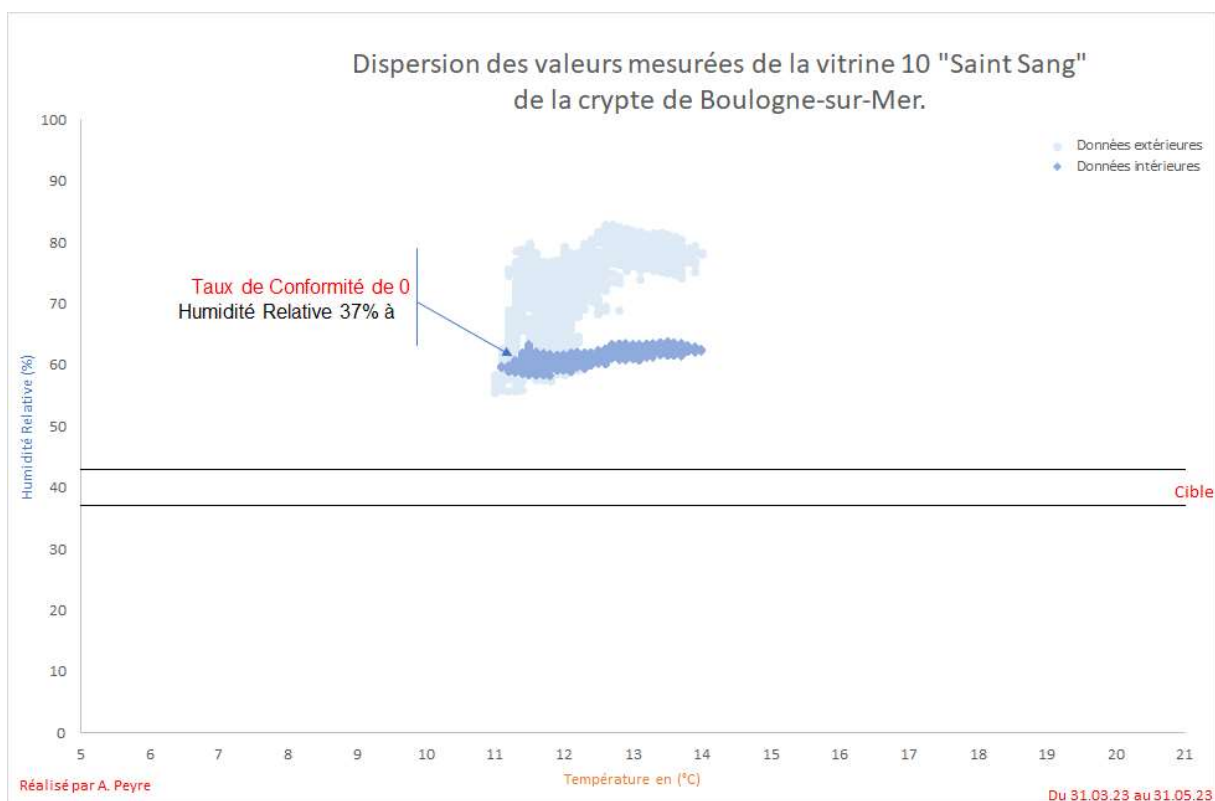
Graphique 26 : **A.2.5.3** Boulogne, Evolution thermo-hygrométrique de la vitrine 10.



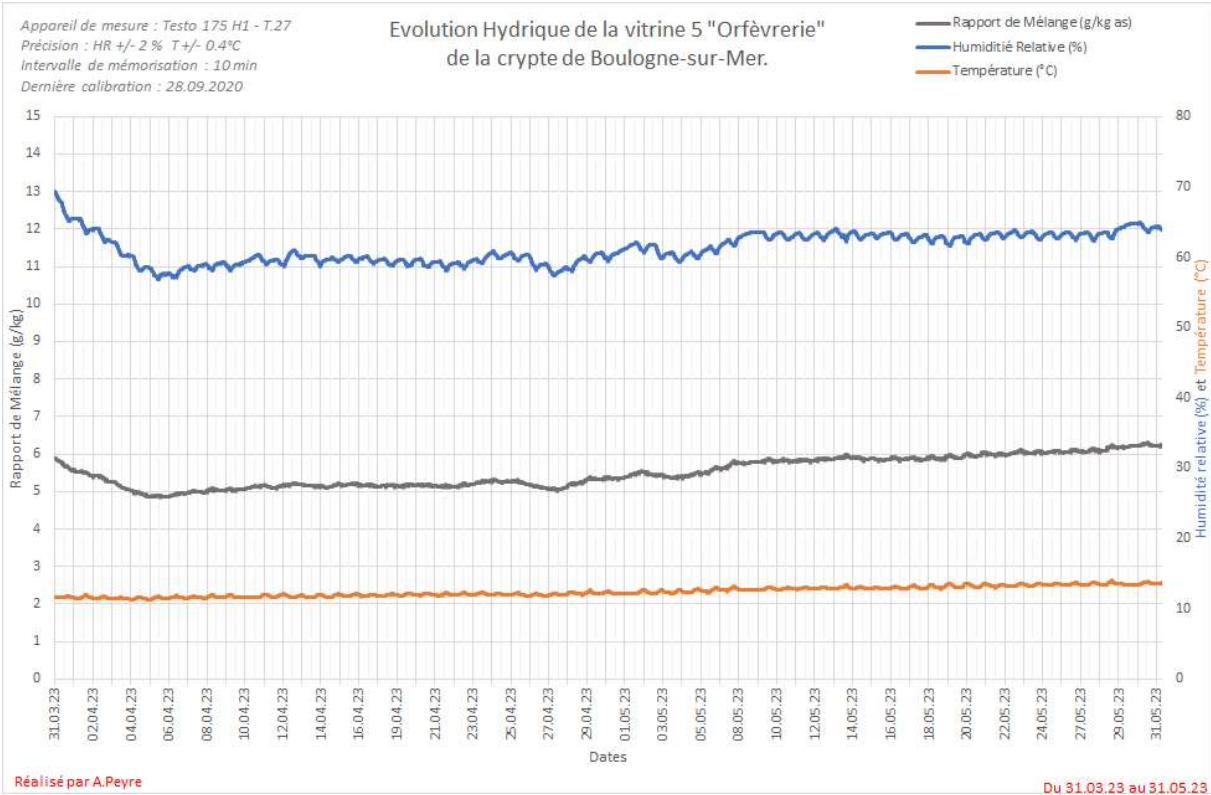
Graphique 27 : **A.2.5.4** Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 5.



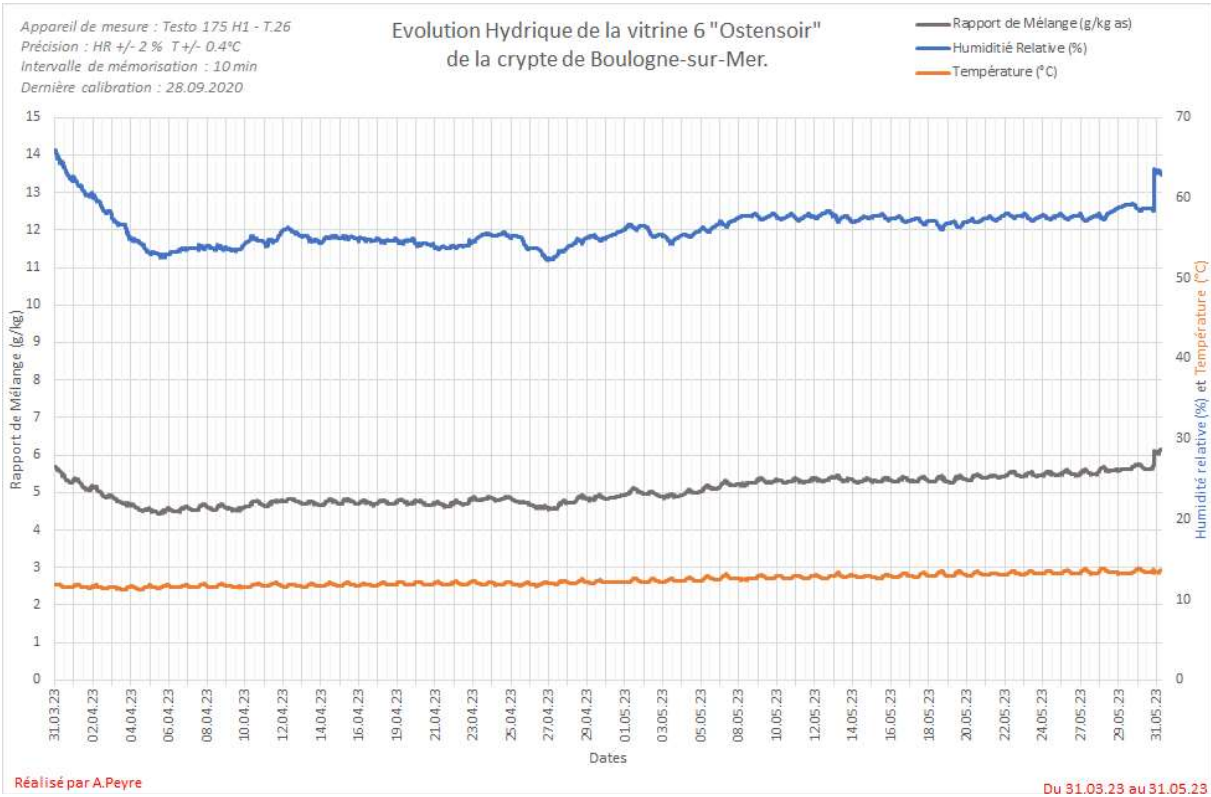
Graphique 28 : **A.2.5.5** Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 6.



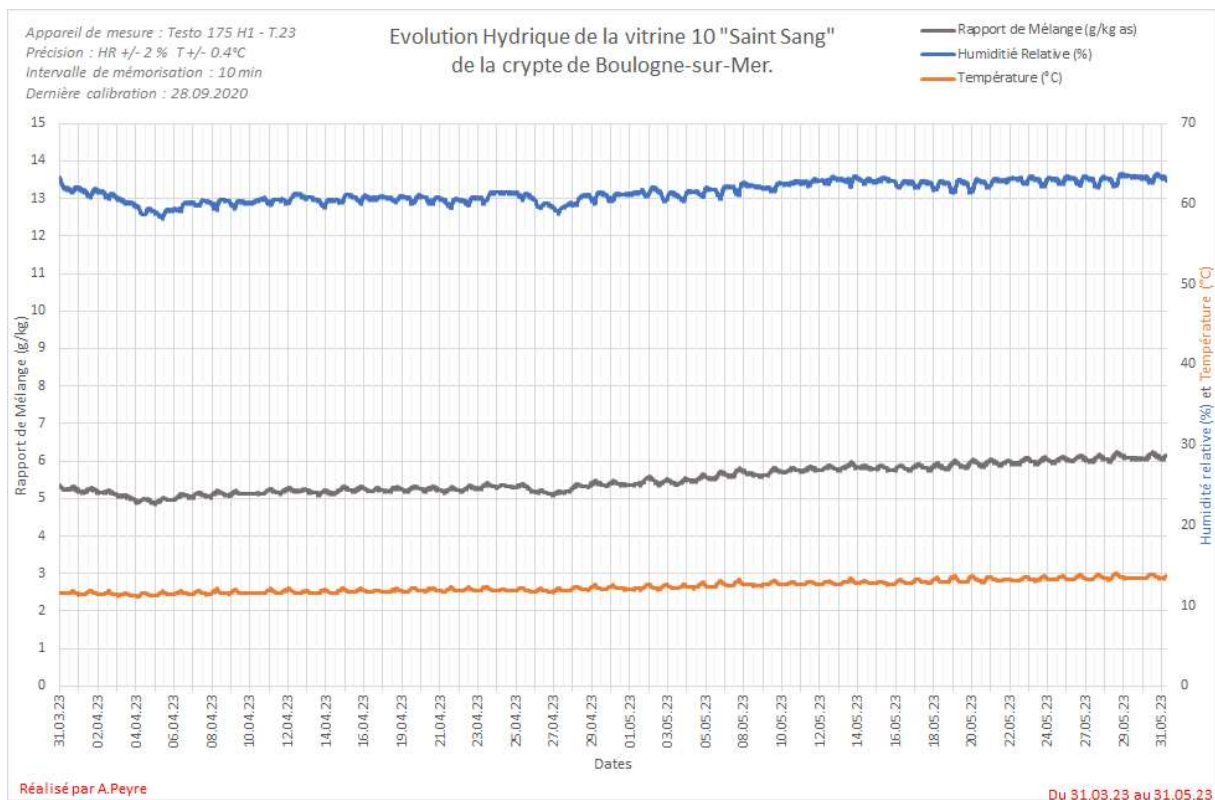
Graphique 29 : **A.2.5.6** Boulogne, Dispersion des valeurs mesurées au sein de la vitrine 10.



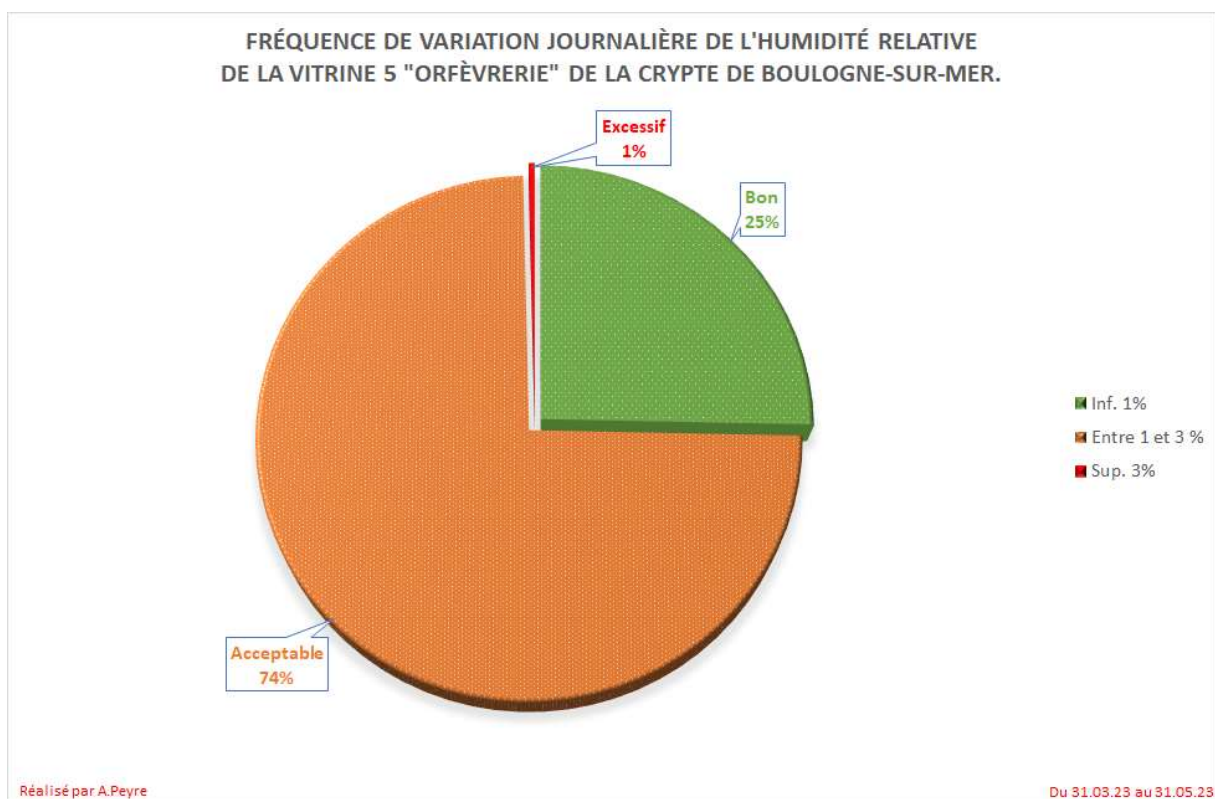
Graphique 30 : A.2.5.7 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 5.



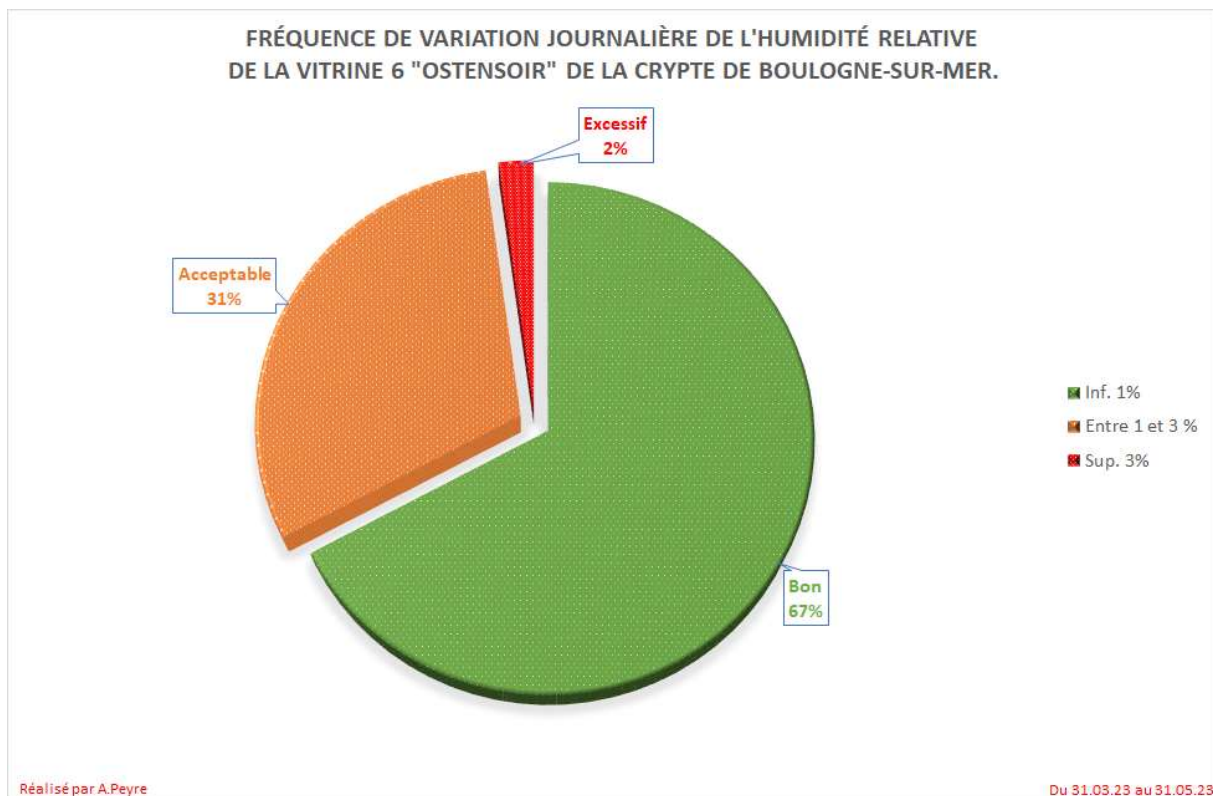
Graphique 31 : A.2.5.8 Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 6.



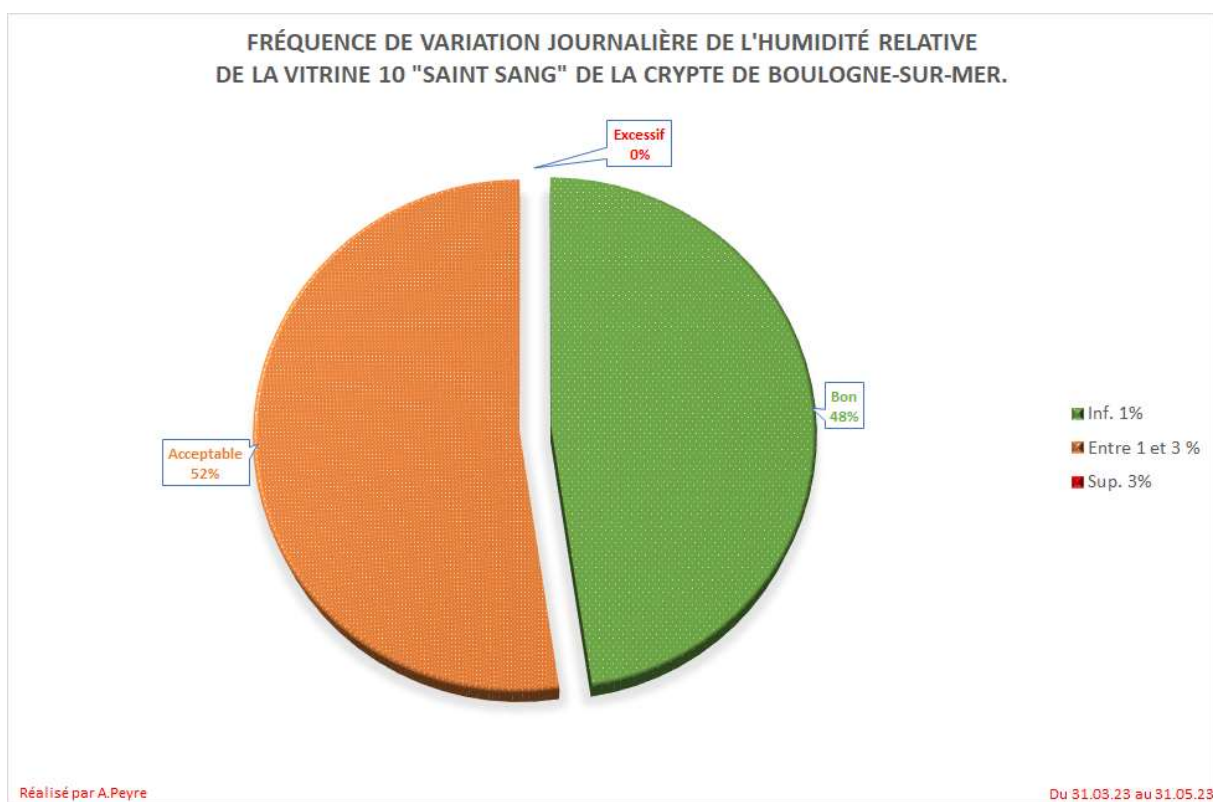
Graphique 32 : **A.2.5.9** Boulogne, Evolution hydrique de la vitrine 10.



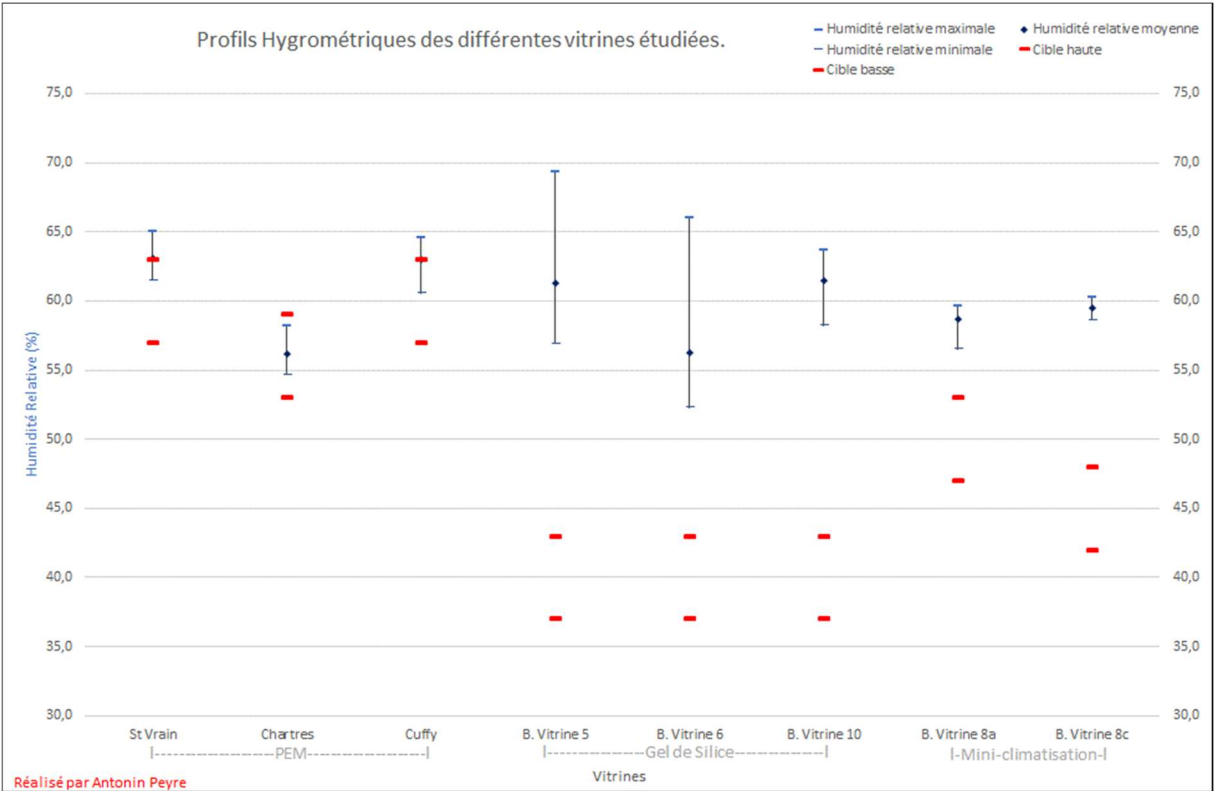
Graphique 33 : **A.2.5.10** Boulogne, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine 5.



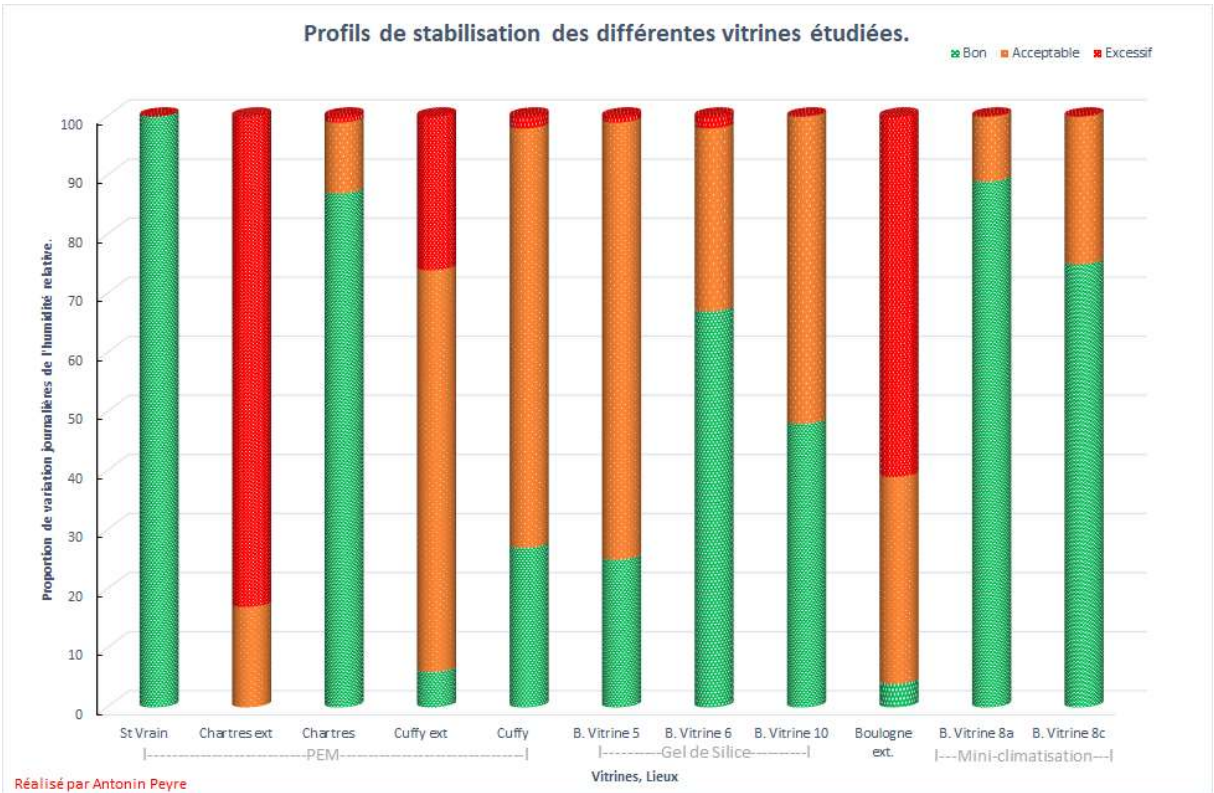
Graphique 34 : **A.2.5.11** Boulogne, Répartition des variations journalières au sein de la vitrine 6.



Graphique 35 : **A.2.5.12** Boulogne, Répartition des variations journalières de la vitrine 10.

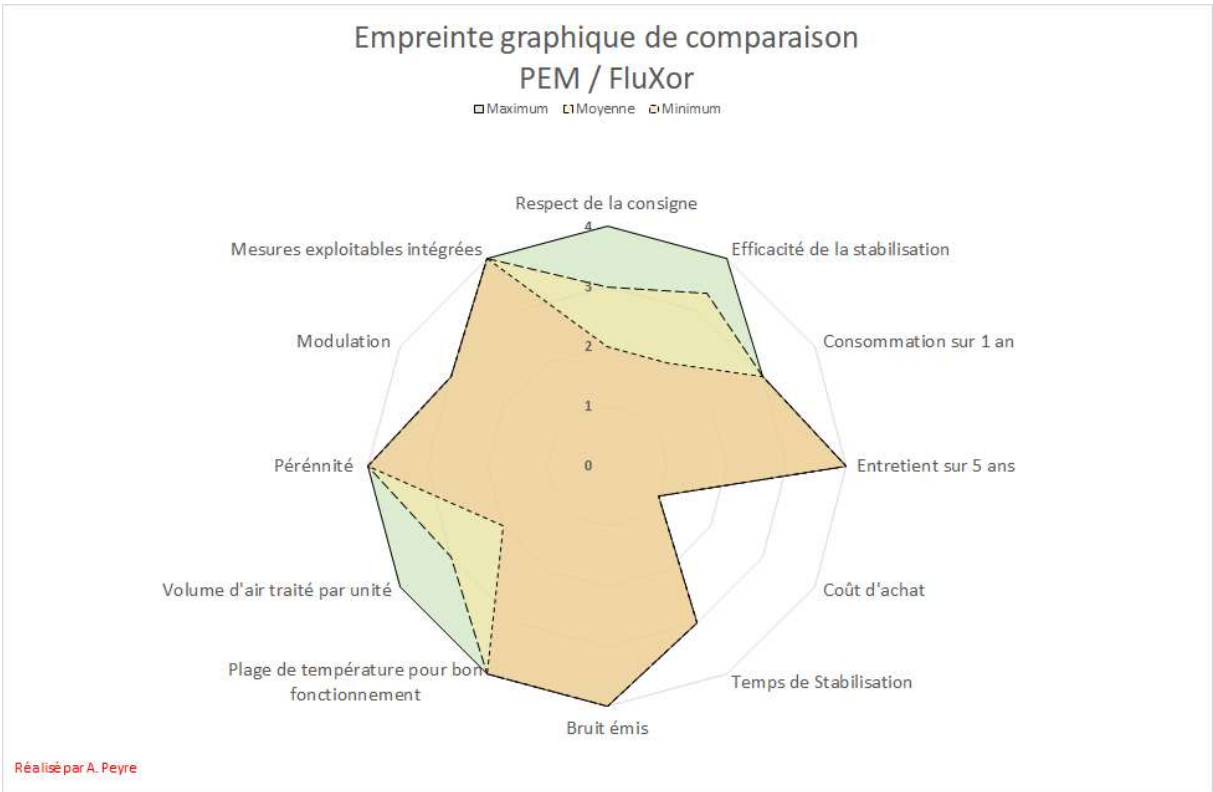


Graphique 36 : A.2.6.1 Profils hygrométriques des différentes vitrines étudiées.

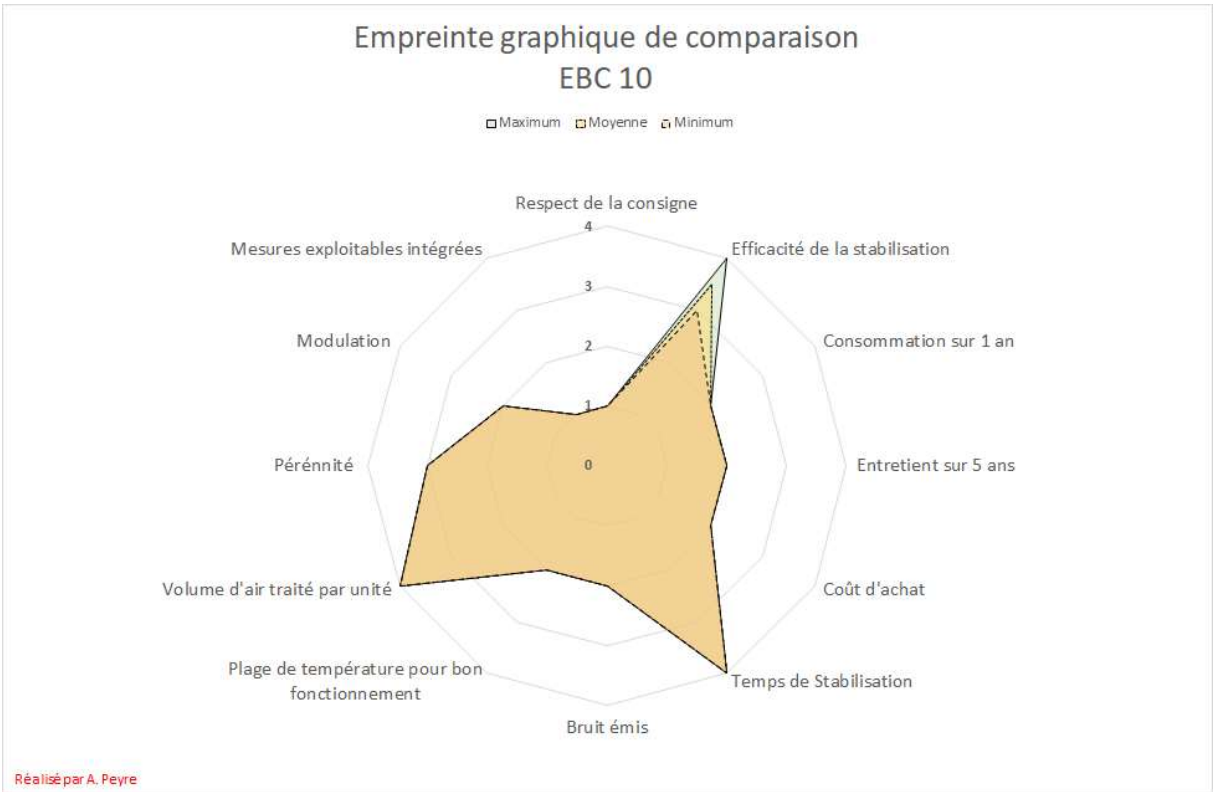


Graphique 37 : A.2.6.2 Profils de stabilisation des différentes vitrines étudiées.

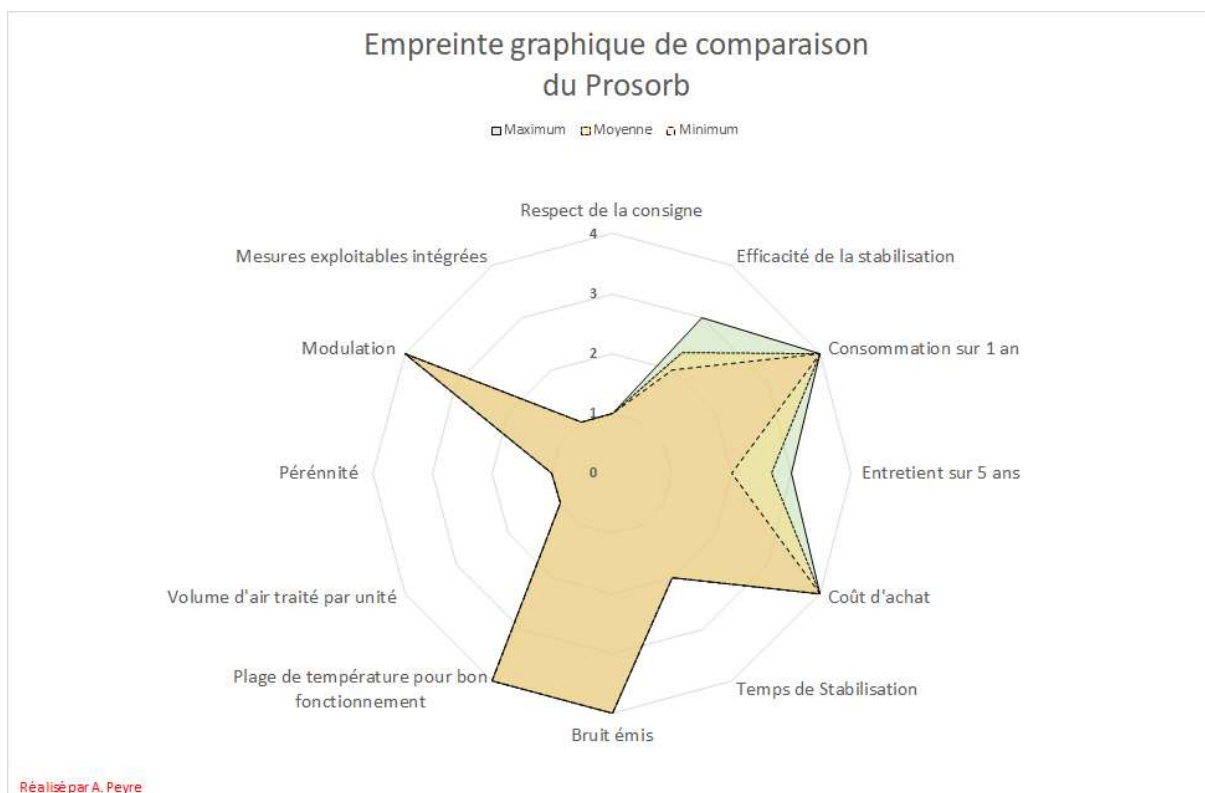
Chapitre 5 : **A.3.**



Graphique 38 : **A.3.1** Empreinte graphique complète de la stabilisation via le FluXor-PEM.



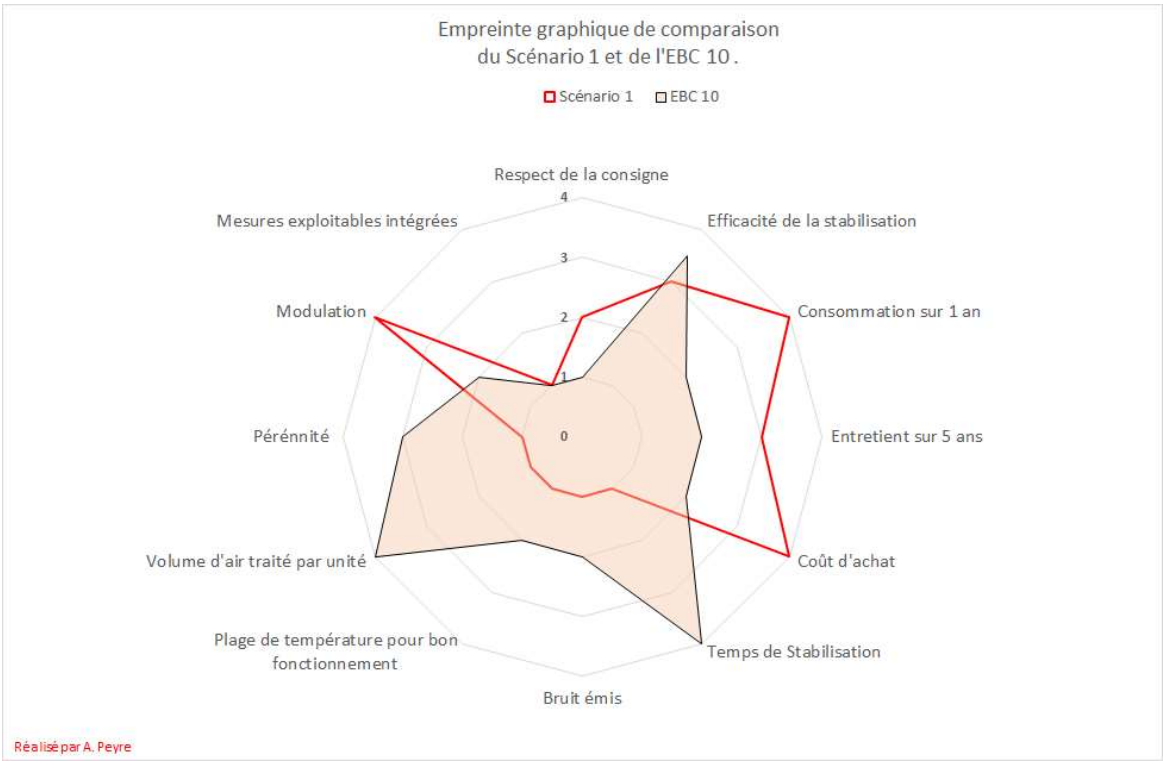
Graphique 39 : **A.3.2** Empreinte graphique complète de la stabilisation via l'EBC 10.



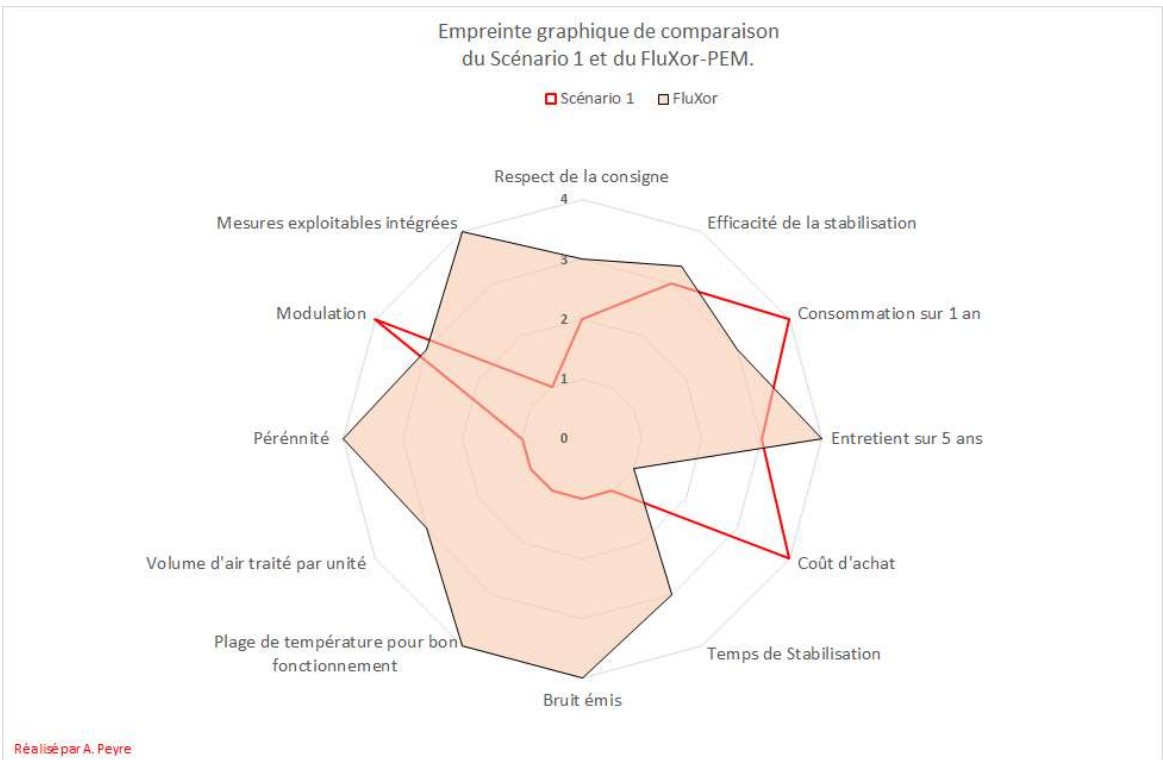
Graphique 40 : **A.3.3** Empreinte graphique complète de la stabilisation via Posorb.

Chapitre 6 : **A.4.**

Scénario 1 :

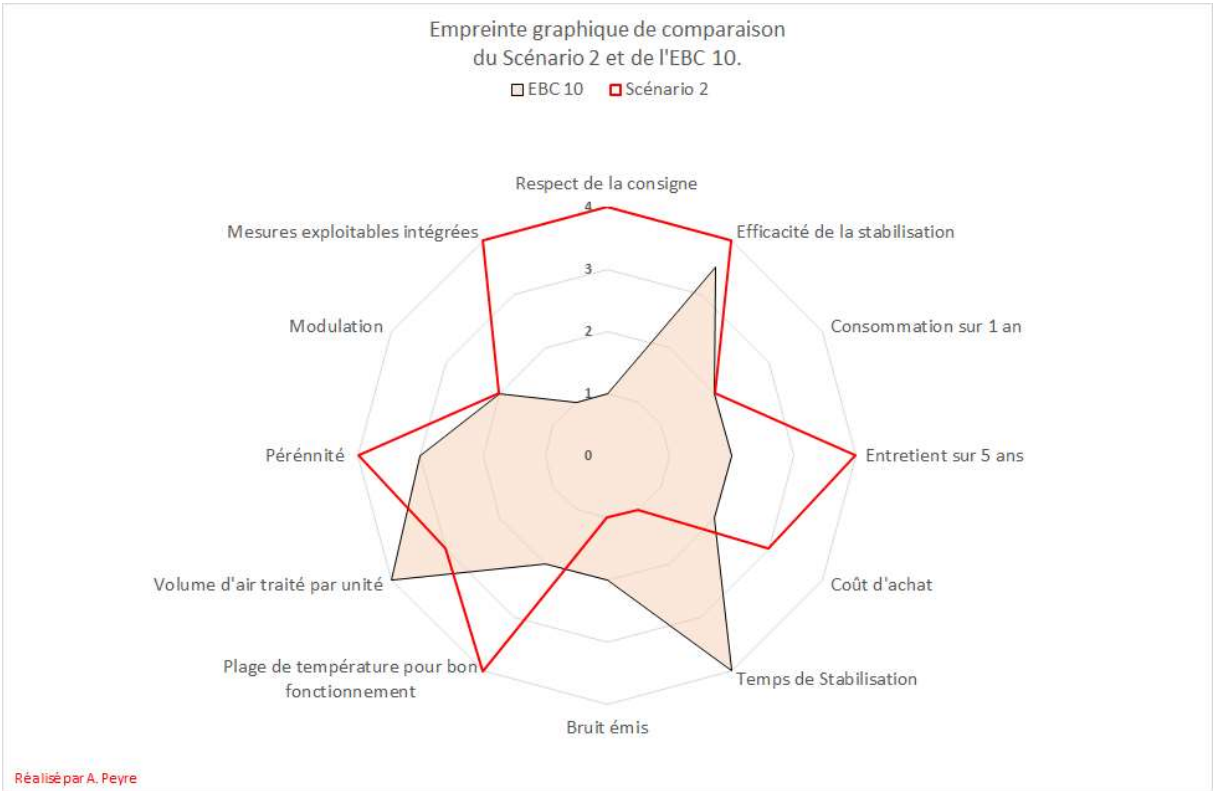


Graphique 41 : **A.4.1.1** Comparaison des empreintes du scénario 1 et de l'EBC 10.

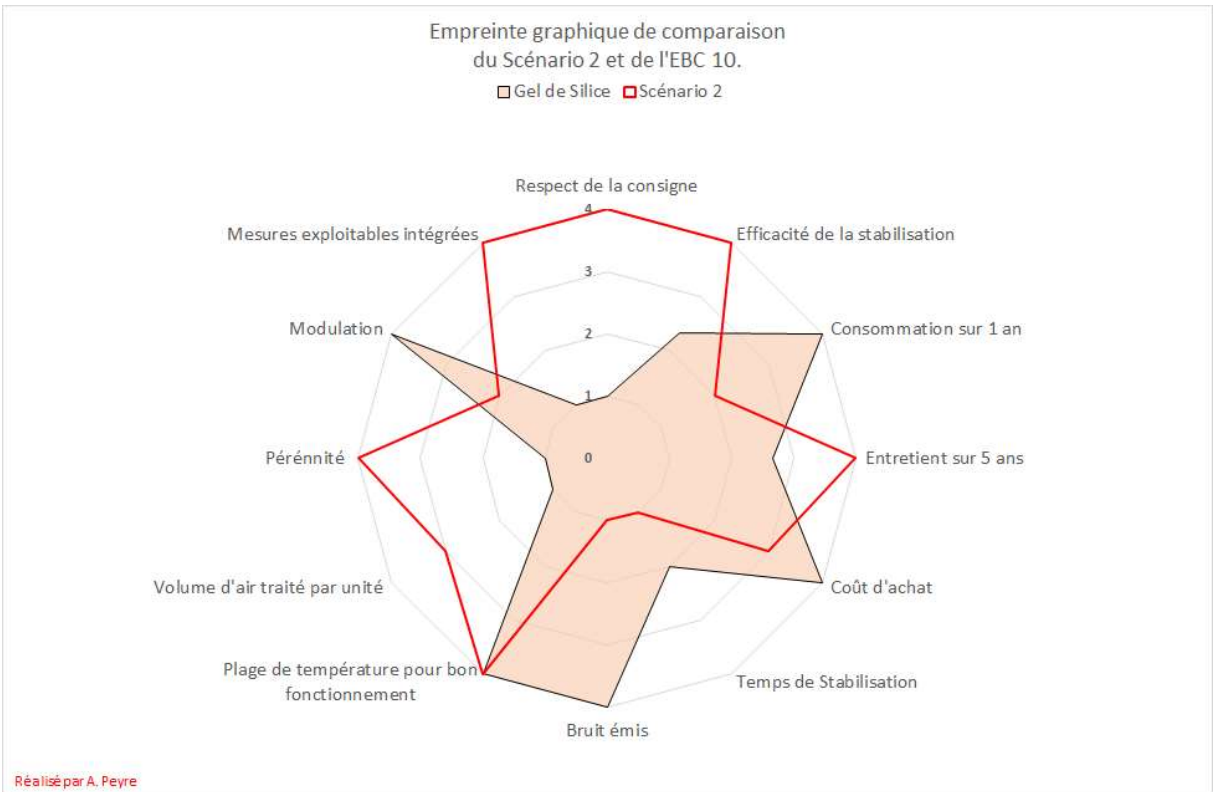


Graphique 42 : **A.4.1.2** Comparaison des empreintes du scénario 1 et du FluXor-PEM.

Scénario 2 :

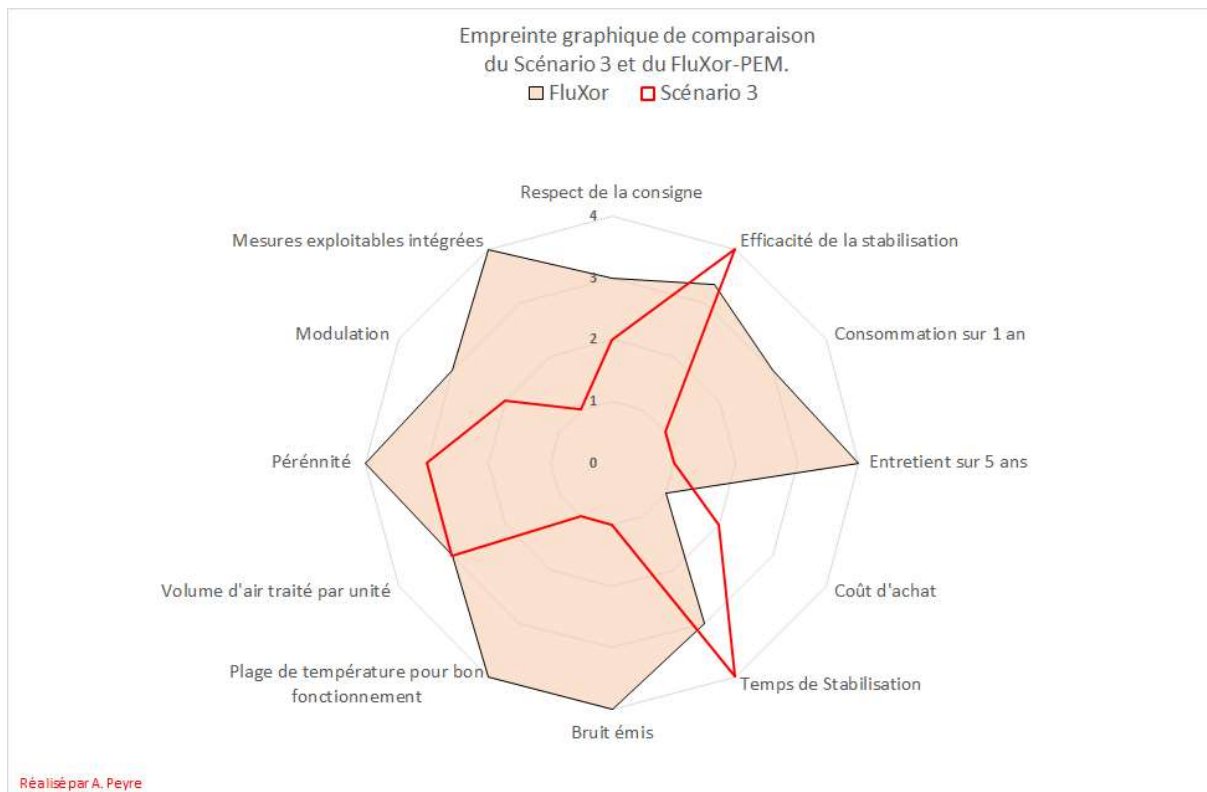


Graphique 43 : A.4.2.1 Comparaison des empreintes du scénario 2 et de l'EBC 10.

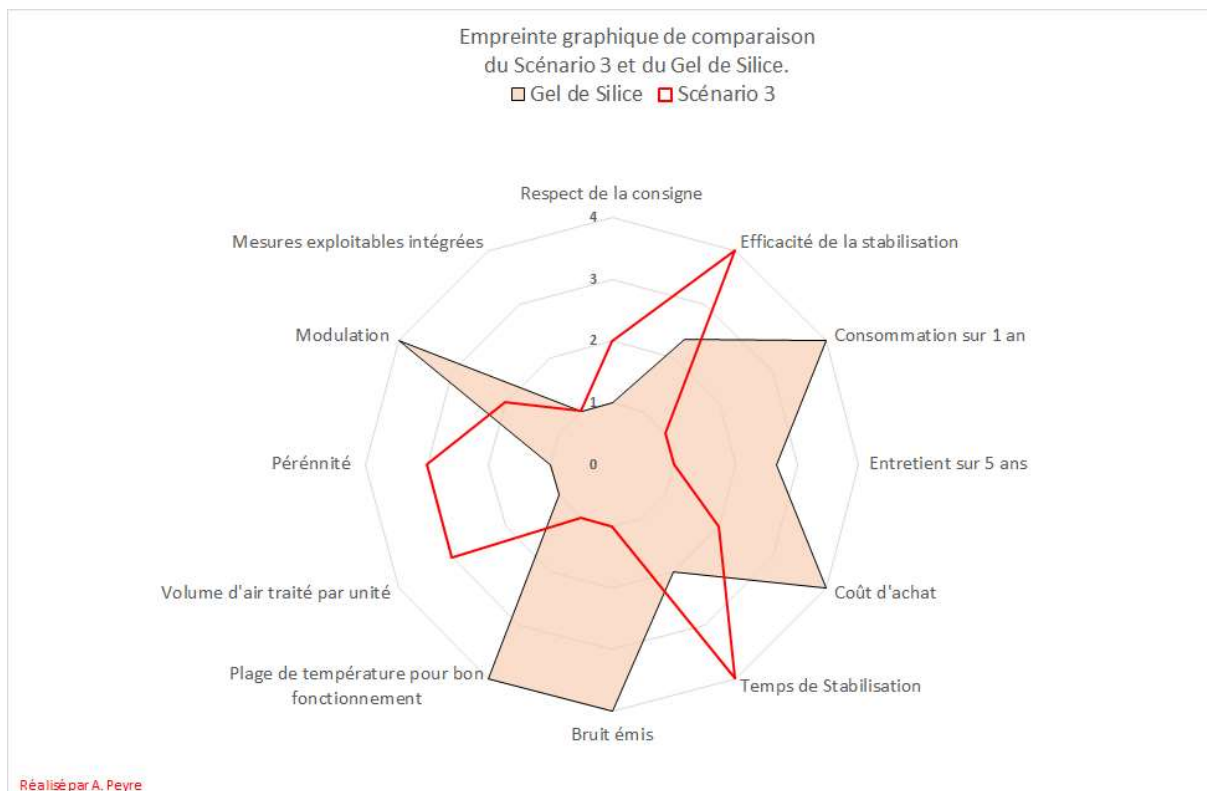


Graphique 44 : A.4.2.2 Comparaison des empreintes du scénario 2 et du Gel de Silice.

Scénario 3 :

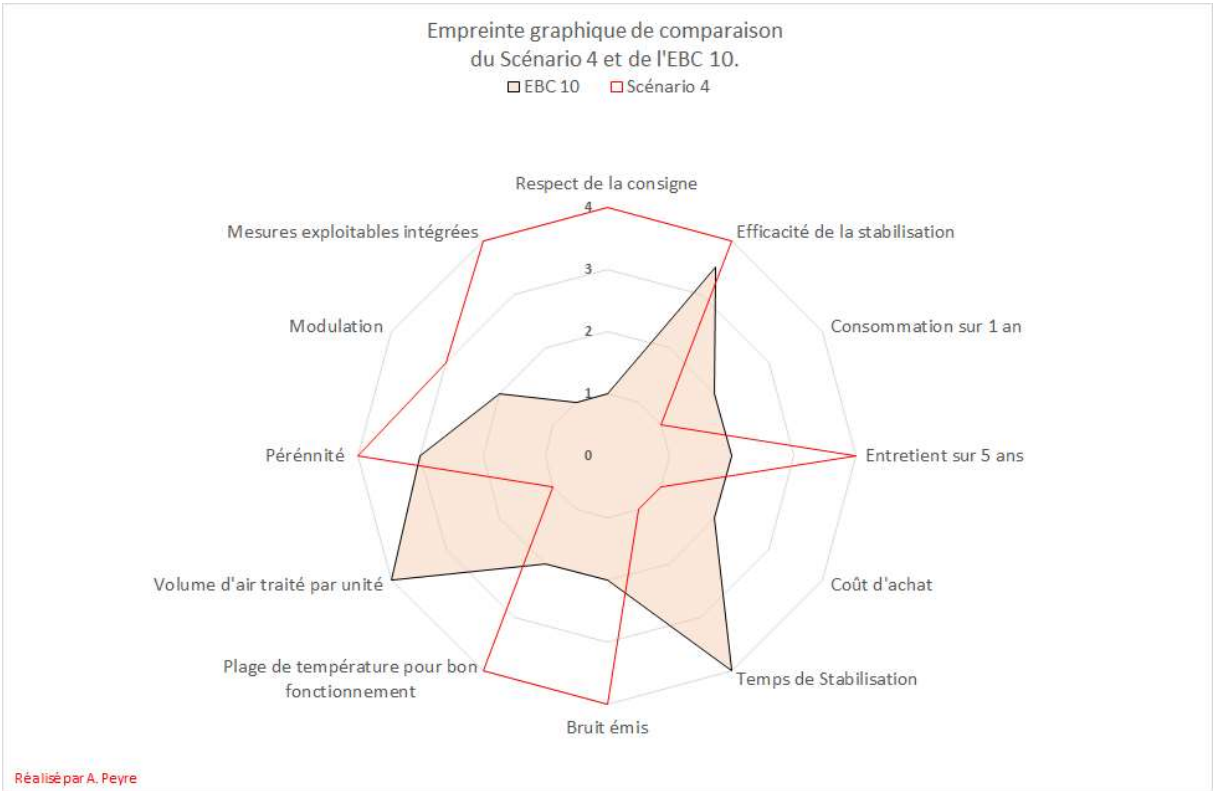


Graphique 45 : **A.4.3.1** Comparaison des empreintes graphiques du scénario 3 et du FluXor.

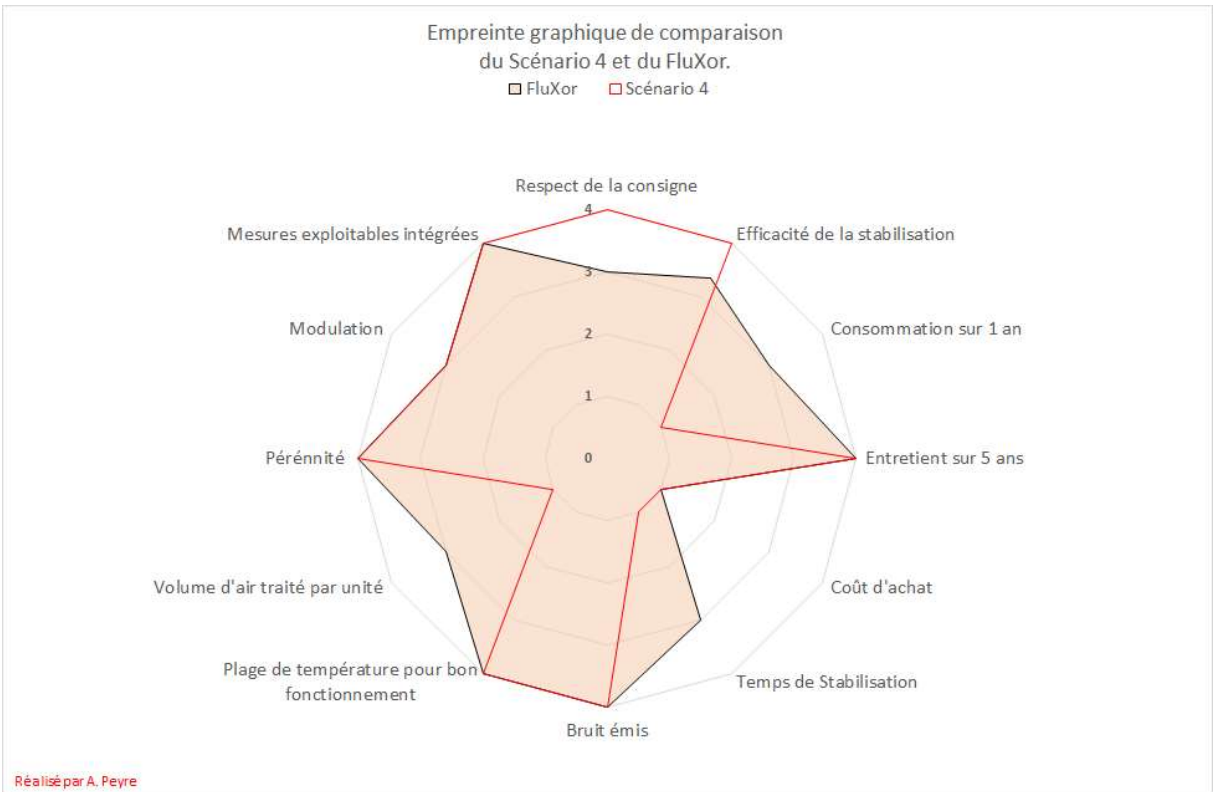


Graphique 46 : **A.4.3.2** Comparaison des empreintes graphiques du scénario 3 et du Gel de Silice.

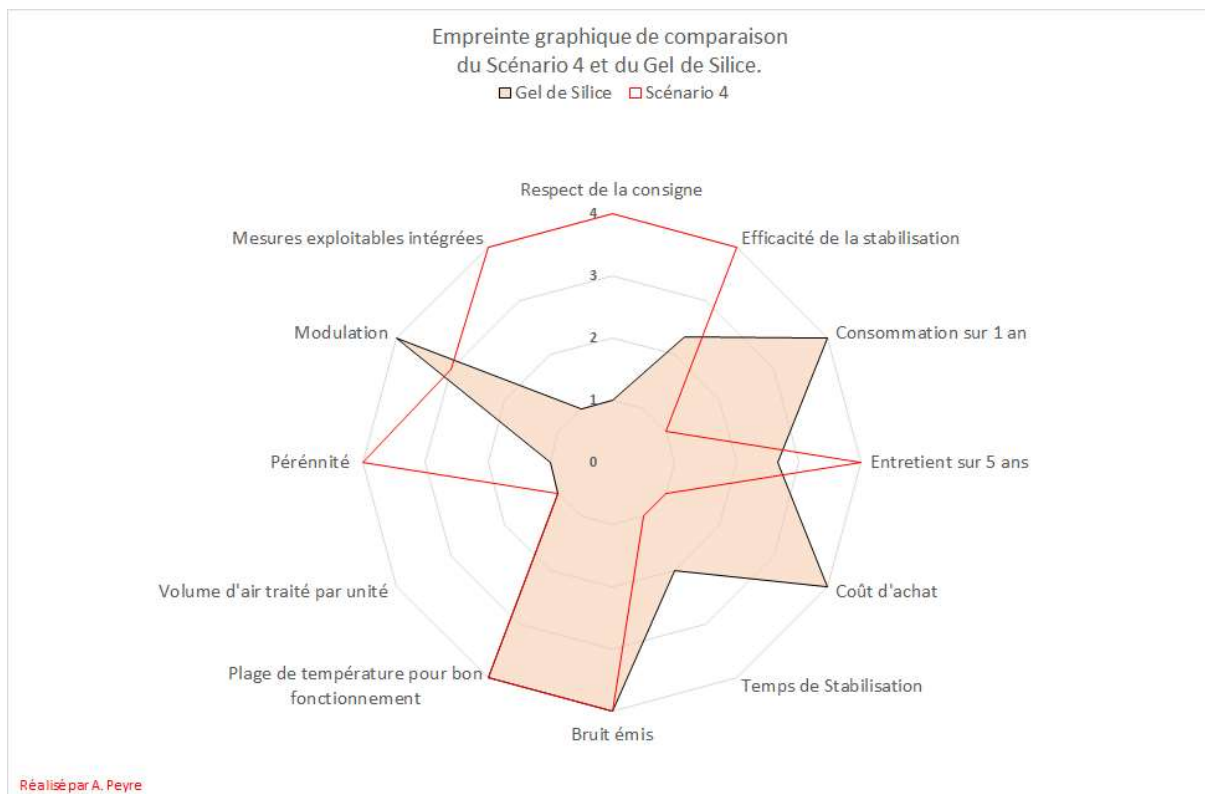
Scénario 4 :



Graphique 47 : A.4.4.1 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et de l'EBC 10.



Graphique 48 : A.4.4.2 Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et du FluXor-PEM.



Graphique 49 : **A.4.4.3** Comparaison des empreintes graphiques du scénario 4 et du Gel de Silice.

3 Analyse détaillée du comportement des vitrines :

La vitrine du voile de la Vierge à Chartres :

L'environnement proche de la vitrine est très instable, la cathédrale de Chartres étant un monument édifié tout au long du XII-ème siècle, il y règne un climat particulièrement préjudiciable pour des matériaux tels que les textiles ou encore les métaux. Le fait que la Chapelle de Saint-Piat où est situé le trésor ait été édifée au XVIème siècle n'améliore pas les choses.

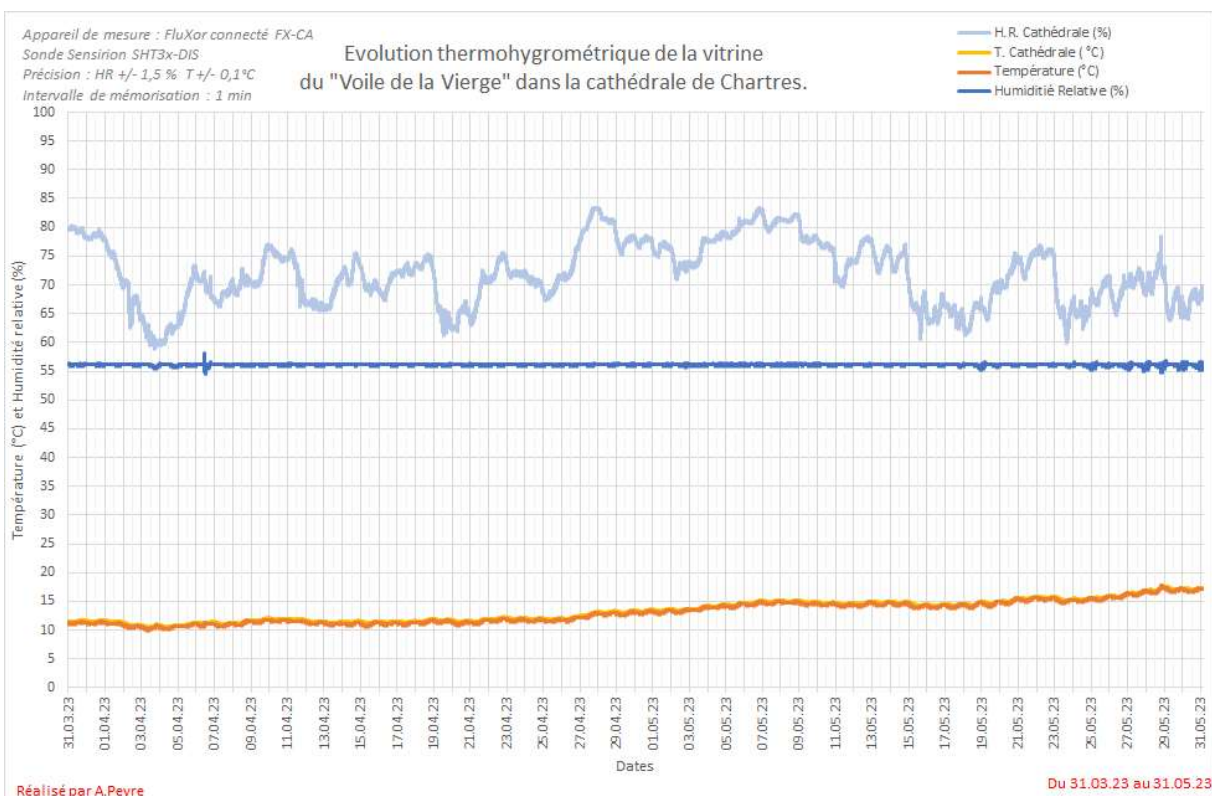
D'après les données recueillies, cet environnement présente des pourcentages d'humidité relative variant de 59,0 à 83,5 %. Les températures oscillent entre 10,5 et 17,7 °C. Bien que la température ne présente pas de variations journalières de température supérieures à 1 °C, les variations journalières peuvent atteindre 16,4 % d'H.R., nous pouvons également affirmer que plus de 82,7 % des variations journalières sont supérieures à 3 % d'H.R.

Notons que lors de la période hivernale, les conditions sont encore bien plus inadaptées⁸¹.

Ainsi, pour prévenir des dégradations certaines sur le voile de la Vierge, une vitrine équipée tel que décrit dans le premier chapitre a été mise en place et voici les résultats que nous pouvons en tirer.

Alors, sur ce graphique il est possible de voir l'impact de la vitrine sur la qualité de l'environnement climatique. En bleu foncé nous retrouvons l'humidité relative de l'enceinte de la vitrine et en bleu pâle, le tracé de l'humidité relative de la chapelle St-Piat.

Enfin en orange et en jaune sont présentées les températures, respectivement de la vitrine et de la chapelle, qui sont très proches, aucune régulation de la température n'étant mise en place.



⁸¹ D'après les résultats d'exploitations de données de la période 10.12.22 au 10.05.23, l'H.R. peut atteindre 90,5 % et des variations journalières de 18,5 % d'H.R. sont atteintes.

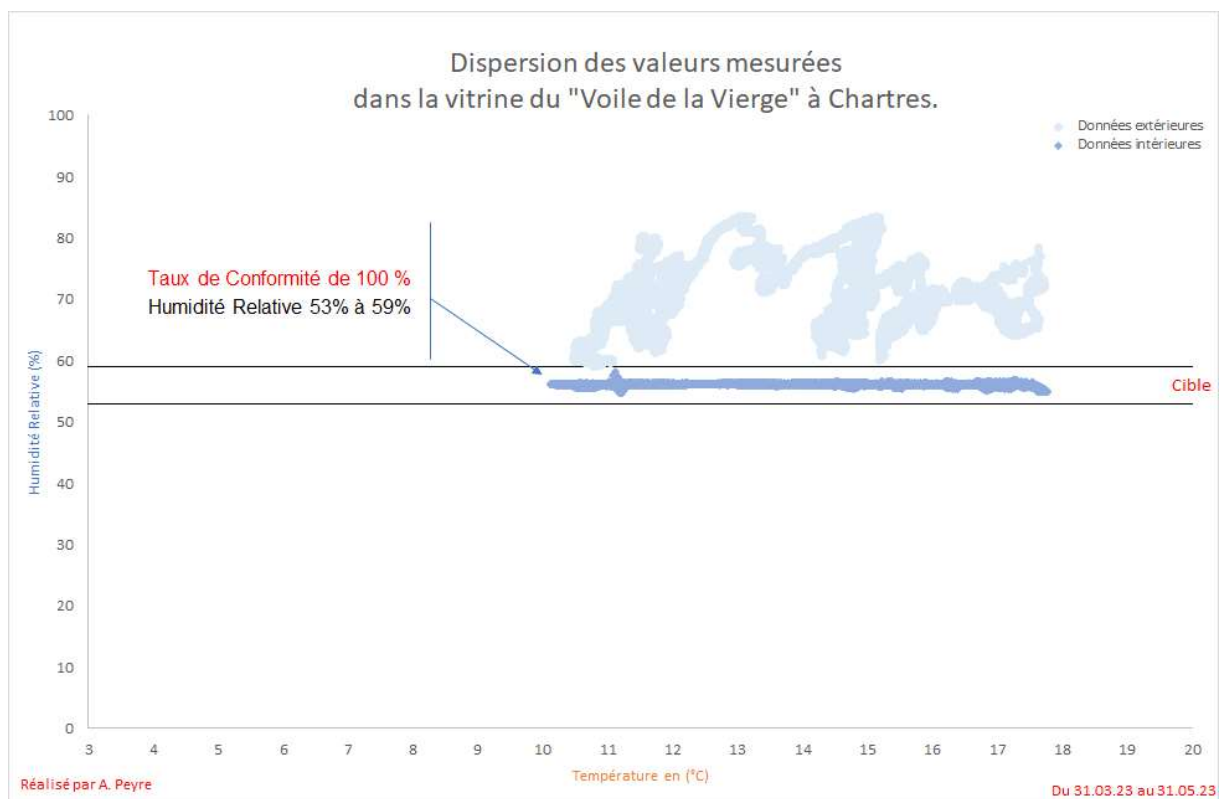
Toutes ces courbes sont tracées en fonction des dates sur l'ensemble de la période étudiée.

Nous pouvons donc retrouver un comportement climatique relativement proche de l'exemple donné dans le chapitre 1 pour un système régulant le climat à l'aide PEM.

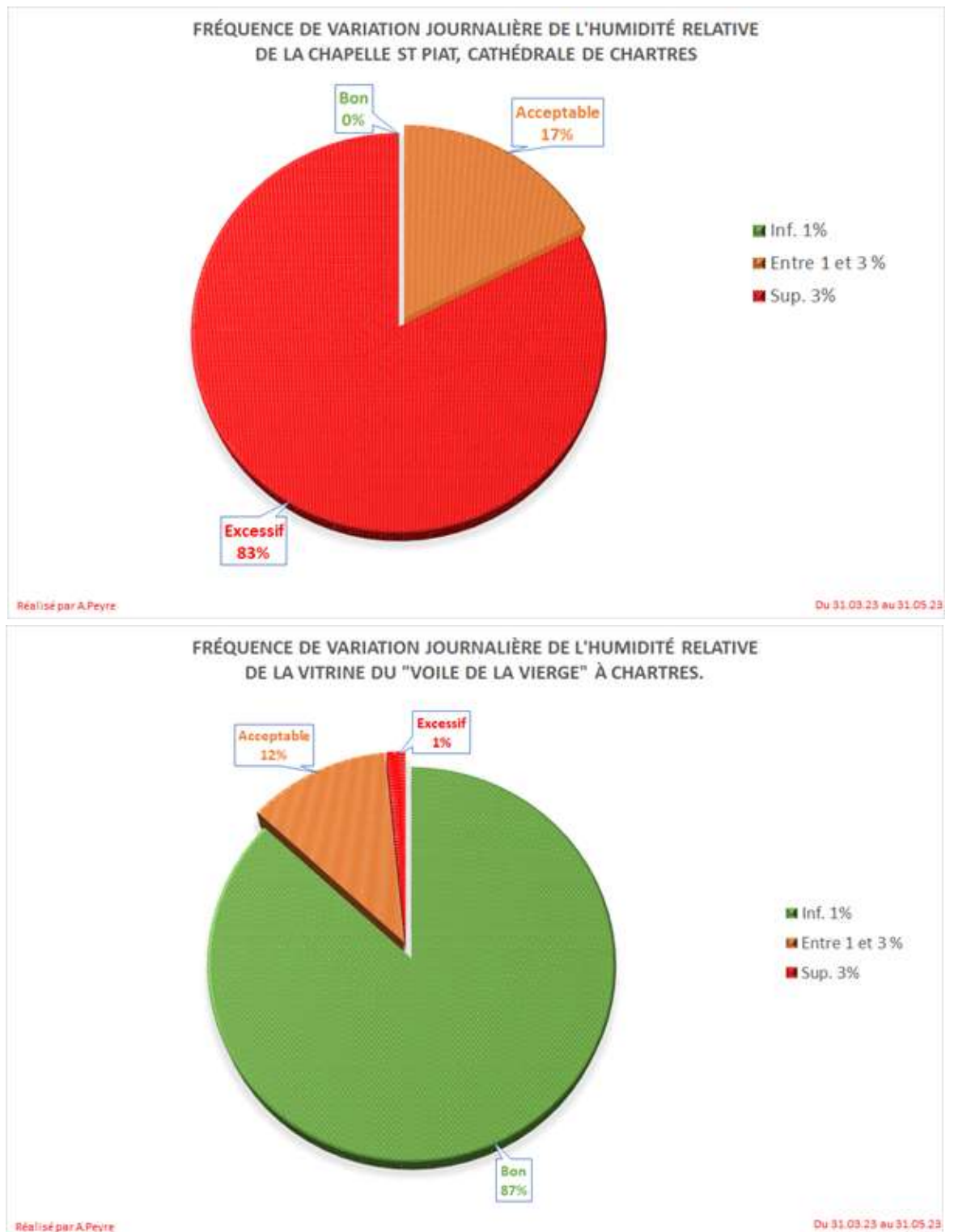
Pour ce qui est des données, les résultats sont très satisfaisants car la vitrine présente un maximum, une moyenne et un minimum respectivement de 58.2, 56.1 et 54.7 % d'H.R. Notons également une variation journalière maximale de 3,5 % d'H.R.

La consigne de cette vitrine pour une bonne conservation de ce reliquaire est fixée à 56 % d'H.R. par l'institution responsable. Nous considérons donc une cible à 56 % \pm 3 % d'H.R.

Ainsi le taux de conformité pour la période étudiée est de 100 %, tel que visible à travers ce graphique de type « nuage de points » représentant les données intérieures (bleu foncé) et extérieures (bleu pâle) de l'humidité relative en fonction de la température.



Sur ces graphiques circulaires⁸², nous pouvons avoir une vision efficace de l'évolution des variations journalières de l'humidité relative entre l'environnement non régulé (haut) et régulé (bas).



⁸² L'ensemble des graphiques sont disponibles en annexes pour une meilleure visibilité et lecture.

Il apparaît ici très clairement que le système de régulation permet de passer d'une situation considérée majoritairement comme excessive de plus de 3 % de variation journalière (rouge) à une situation très majoritairement considérée comme bonne de moins de 1 % de variation journalière (vert).

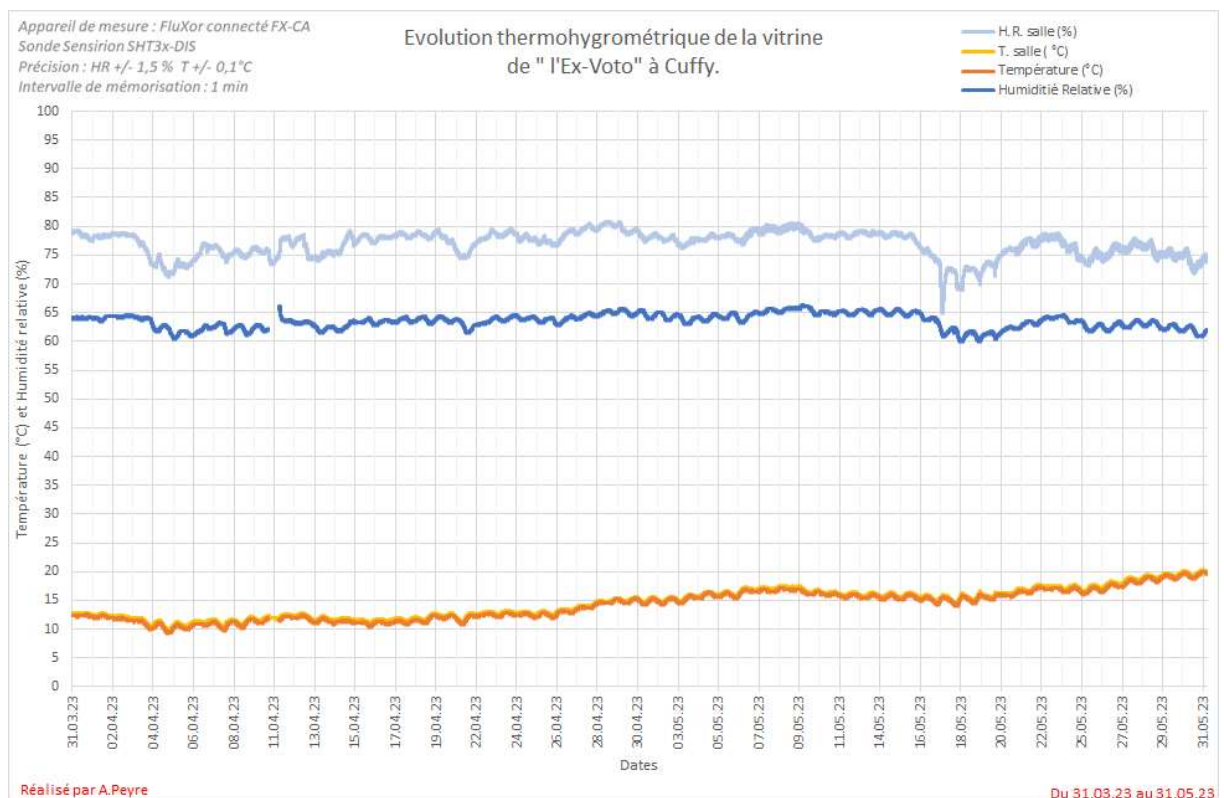
En conclusion, pour ce qui est de la vitrine du voile de la Vierge de Chartes, les résultats sont très satisfaisants⁸³ avec un taux de conformité de 100 % et une éradication des variations journalières considérées comme excessives : passant de 83 % à 1 % du volume de données enregistrées. Cela fait de cette vitrine un bel exemple des capacités idéales du système de régulation par PEM, dans le cas d'un environnement extrêmement instable tel qu'il peut l'être dans la cathédrale de Chartes.

La vitrine de l'Ex-Voto de Cuffy :

L'environnement proche de la vitrine est également instable à Cuffy tels que nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous. Le système utilisé pour réguler le climat de la vitrine est également basé sur les PEMs tels que présenté dans le 1^{er} chapitre.

L'environnement proche présente une humidité relative oscillant entre 65,1 et 80,8 % d'H.R. et une température allant de 9,8 à 20,3 °C.

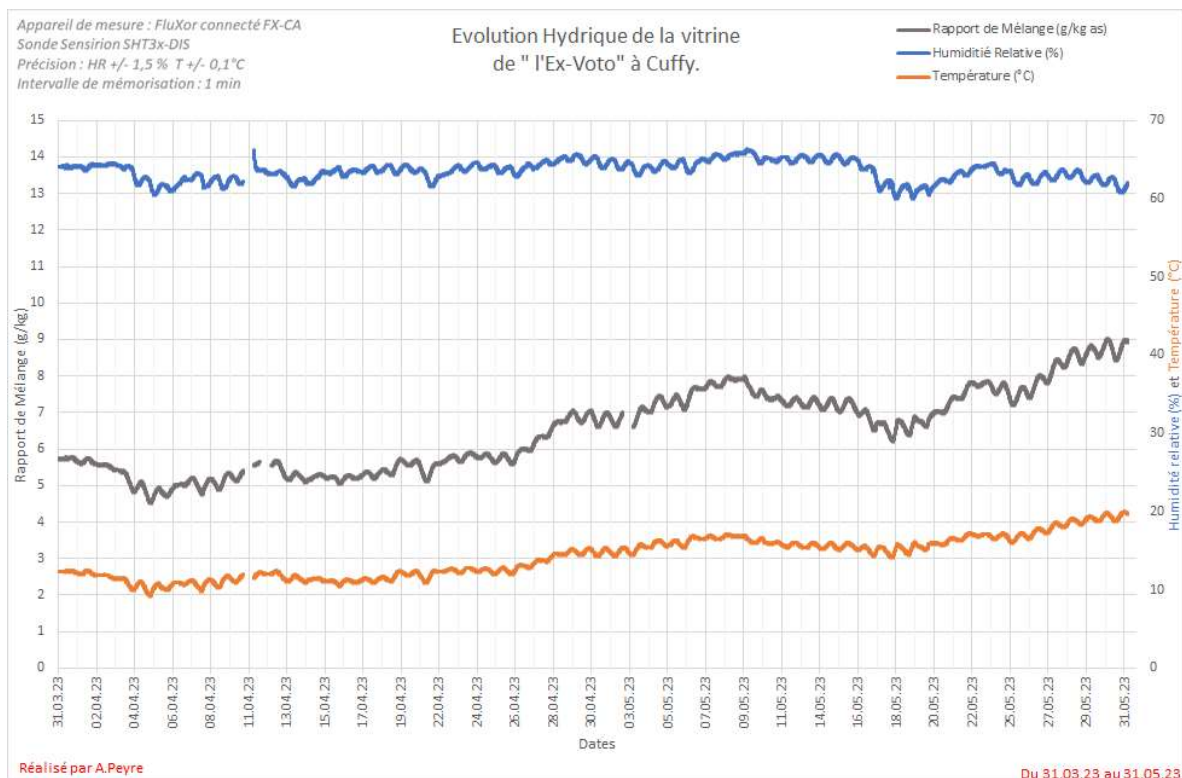
Les variations journalières d'humidité relative et de température atteignent pour maximum respectivement 11,2 % et 1,9 °C.



⁸³ Les résultats sont tout à fait similaires pour la période du 10.12.22 au 10.05.23 avec un taux de conformité de 100 % d'H.R. et 4,9 % des variations journalières considérées comme excessives pour un climat hivernal encore plus instable que lors de la période du 31.03.23 au 31.05.23.

Nous observons ici un comportement qui ne semble pas correspondre à l'exemple de comportement dit « idéal » d'un tel système tels que peuvent l'être les exemples d'Autun et de Chartres. Ici la courbe d'humidité relative de la vitrine semble suivre les variations de l'humidité relative extérieure tout en réduisant les amplitudes de variation, le tout avec un écart constant d'environ de 15 % inférieur à l'extérieur.

Afin d'en savoir plus, il a été décidé d'observer le comportement de la courbe du rapport de mélange qui correspond à la quantité d'eau sous forme de gaz présent dans la vitrine : il est représenté en gris dans le graphique suivant :



Nous observons alors que la quantité d'eau (gaz) augmente en suivant l'évolution extérieure, ce qui ne semble pas être en corrélation avec les courbes d'activité du système que l'on peut obtenir via la plateforme « Preservarium ».

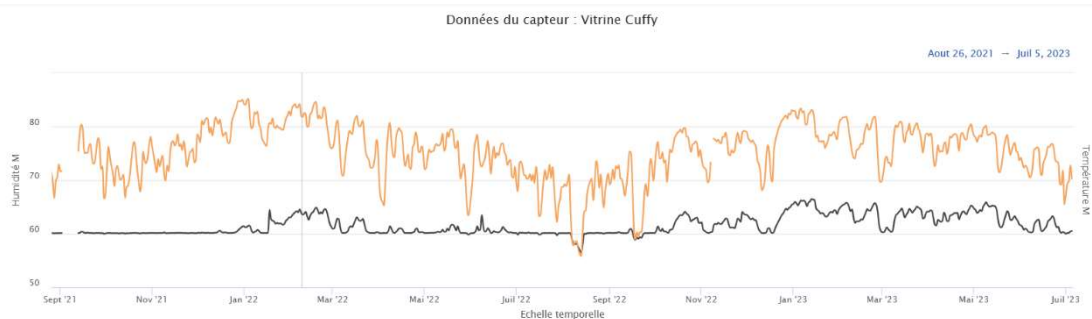


Nous observons ici que sur la période du 6 avril au 30 mai 2023, le système fonctionne en déshumidification pendant quasiment la totalité de la période. De plus, l'entièreté du système⁸⁴ a été vérifiée lorsque les performances ont été considérées comme non idéales.

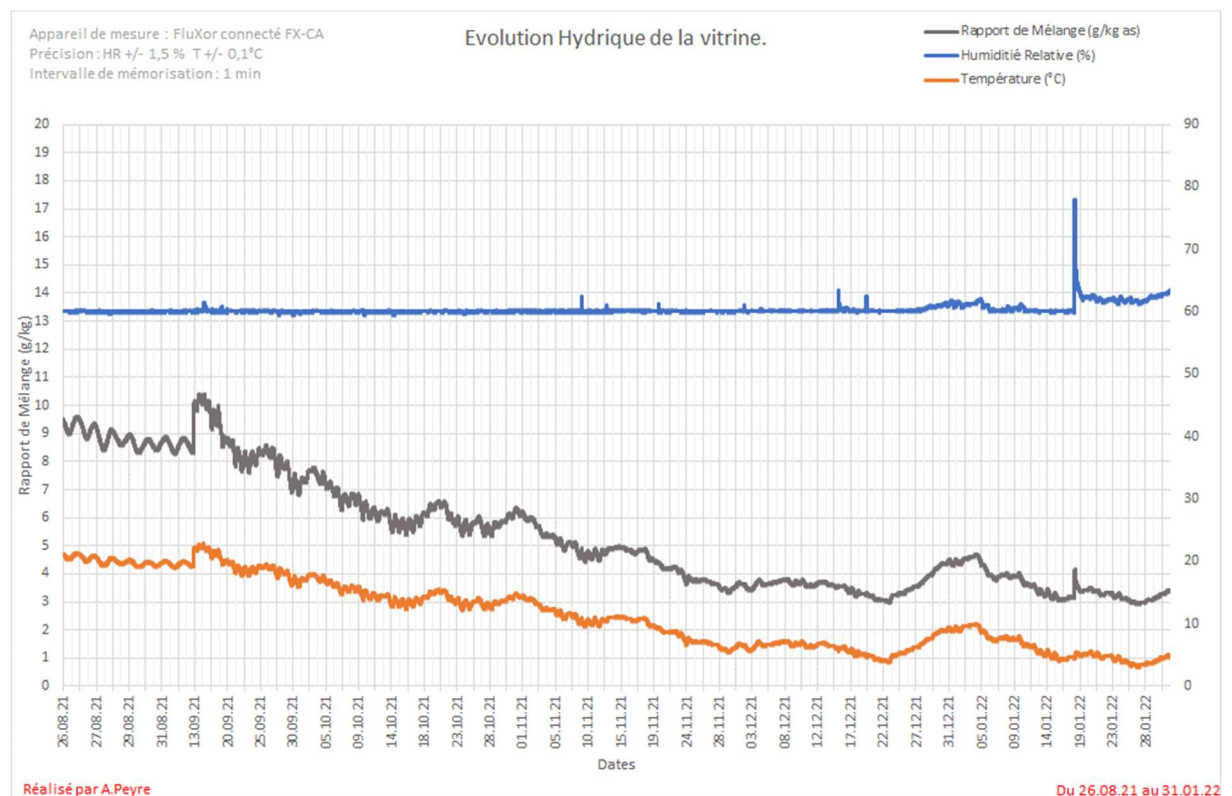
Il est donc fortement probable que cela soit dû à un apport d'humidité plus élevé que la quantité extraite par le système des 4 membranes mises en place.

⁸⁴ Il s'agit de l'ensemble des membranes, sondes, connectiques et du boîtier de contrôle mis en place dans cette installation.

Si l'on observe les données depuis qu'elles nous sont disponibles, nous remarquons que lors de la période initiale de mise en place du système, le comportement de la courbe d'humidité relative correspondait à l'exemple dit « idéal » d'un système PEM. La courbe en noir représente l'humidité relative de la vitrine, et en orange l'H.R. extérieure, en fonction du temps sur la période allant de septembre 2021 à juillet 2023.

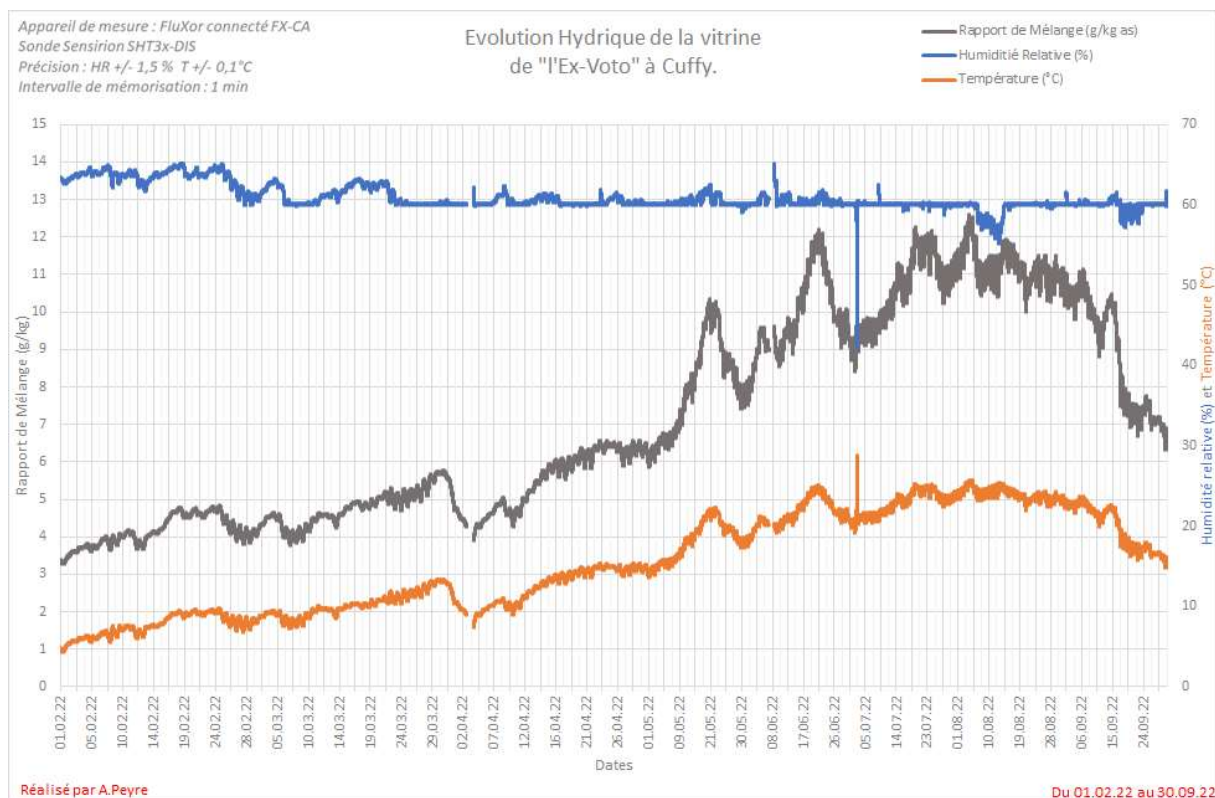


Nous observons que le système fonctionnait de façon satisfaisante jusqu'à janvier 2022. Le système n'ayant alors pas été modifié au-delà de l'ajout de ventilateurs de brassages, la raison de cette baisse de performance serait donc plus à rechercher du côté de l'étanchéité de la vitrine. Cela serait en corrélation avec le fait que l'apport en humidité ait augmenté au point de dépasser les capacités d'assèchement du système de régulation.



Si nous observons les graphiques de l'évolution hydrique de la vitrine entre la période du 26.08.21 au 28.01.22, nous observons que le rapport de mélange est en diminution ce qui coïncide avec un bon fonctionnement du système et un assèchement de ce dernier. Notons la présence d'une ouverture le 19.01.2022.

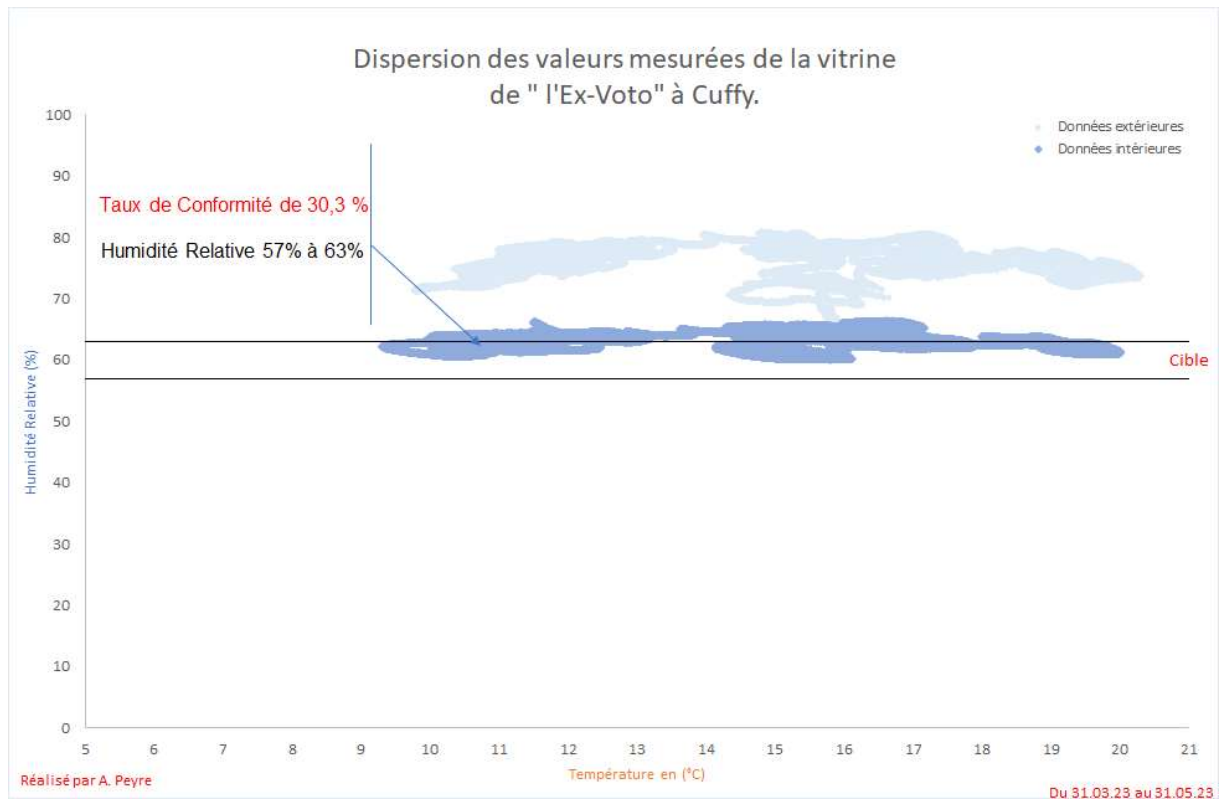
A l'inverse, sur la période allant du 01.02.2022 au 24.09.22 visible ci-dessous, nous observons un changement de comportement total du rapport de mélange qui augmente de façon rapide et instable.



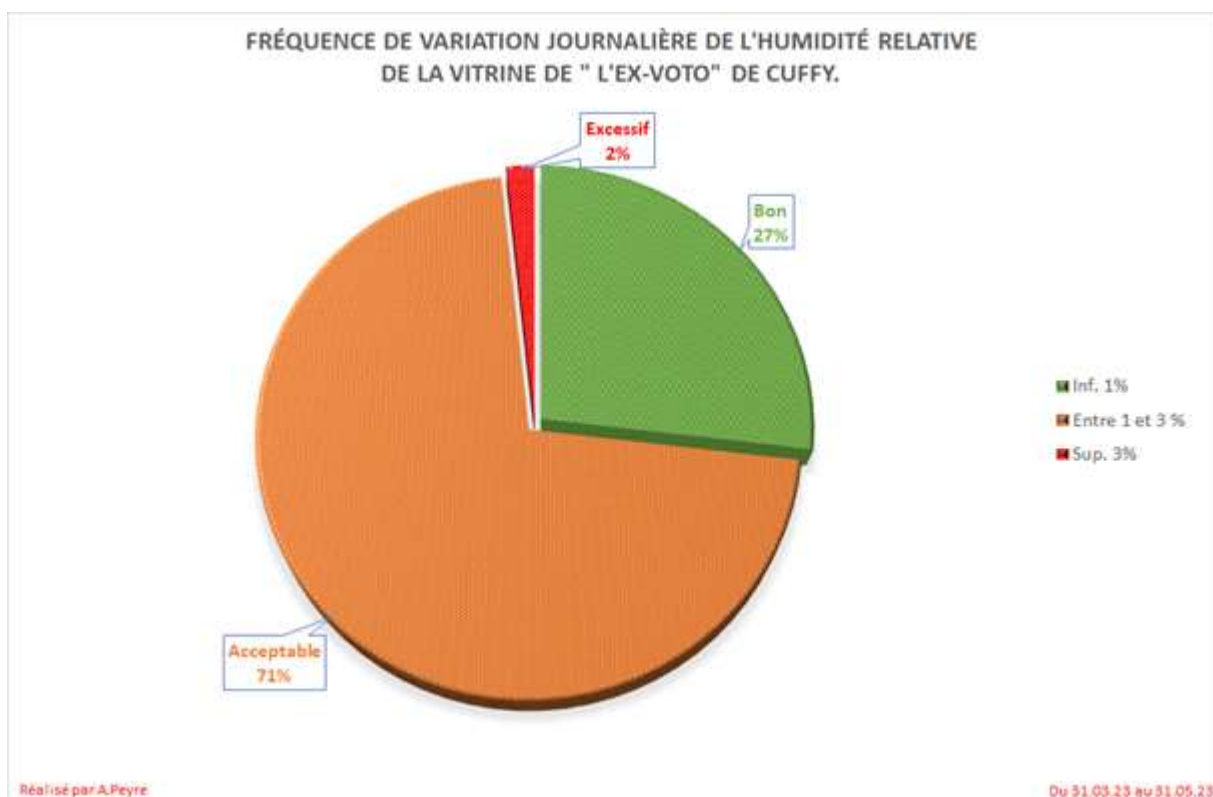
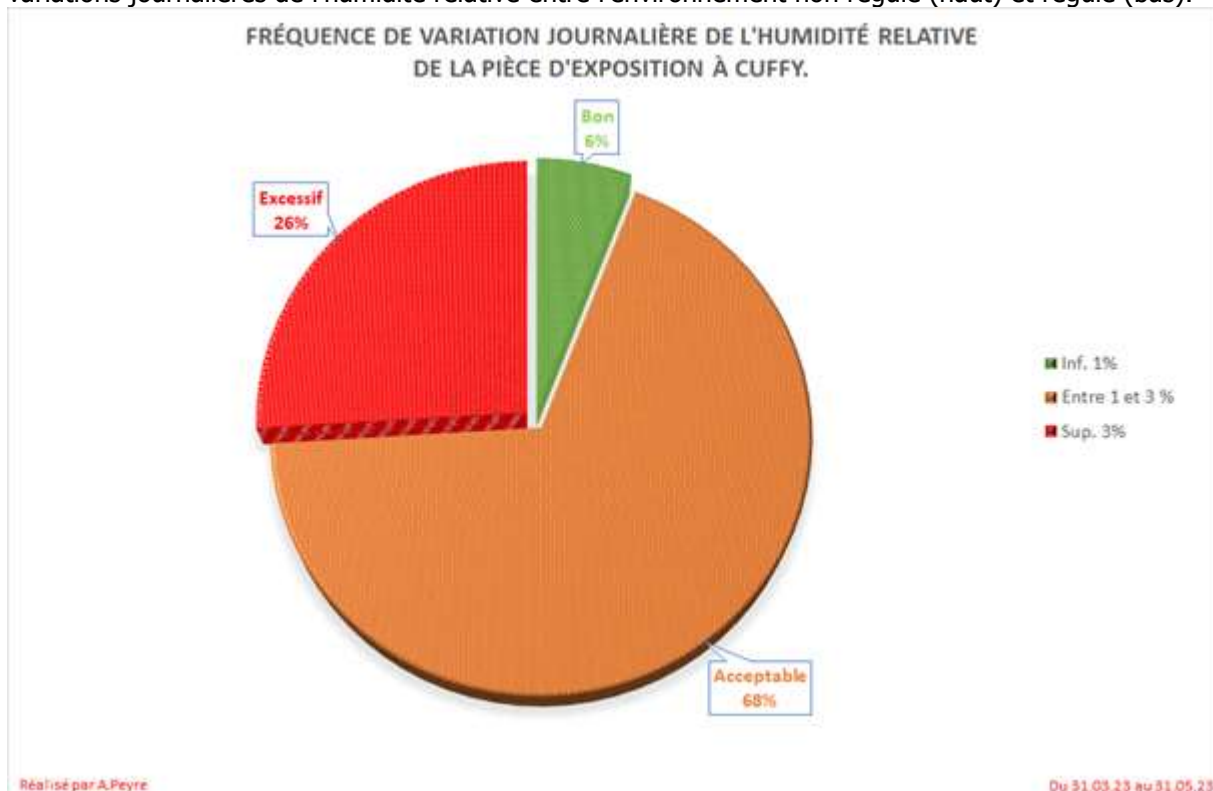
Cela semble favoriser l'hypothèse d'une perturbation liée à un apport d'humidité bien plus élevé dans la vitrine.

Notons également que le joint de l'élément ouvrable de cette vitrine étant un joint dit « coupé », c'est-à-dire que le joint a été coupé après polymérisation afin d'obtenir un assemblage mâle/femelle idéal. Ce dernier est reconnu pour présenter des soucis d'étanchéité dès lors qu'il y a un risque de réticulation de dudit joint. Quoi qu'il en soit, de nouveaux tests d'étanchéité par l'entreprise Promuseum®, fabricante de la vitrine, sont prévus dans le courant de l'été 2023 afin d'en avoir le cœur net.

Pour ce qui concerne les résultats de la période étudiée, la consigne d'H.R. recommandée pour la bonne conservation de cet Ex-Voto constitué de matériaux organiques est de 60 % d'H.R. Sur la période du 31.03.23 au 31.05.23, le taux de conformité à 60 % \pm 3 % est de 30,3 %.



Sur ces graphiques circulaires⁸⁵, nous pouvons à nouveau avoir une vision efficace de l'évolution des variations journalières de l'humidité relative entre l'environnement non régulé (haut) et régulé (bas).



⁸⁵ L'ensemble des graphiques sont disponibles en annexes pour une meilleure visibilité et lecture.

Il apparaît ici que le climat de l'espace d'exposition est moins instable que celui que l'on peut retrouver par exemple à Chartres. Cependant, malgré les suppositions de perte d'étanchéité, nous avons observé sur le premier graphique que les amplitudes de variations sont plus faibles à l'intérieur de la vitrine qu'à l'extérieur.

C'est ce que l'on retrouve ici avec un passage de 16 à 2 % de variations journalières d'humidité relative considérées comme excessives et une augmentation de 6 à 27 % des variations journalières d'H.R. considérées comme bonnes. La majorité des variations journalières est considérée comme acceptable dans les deux cas, environ 70 % des données enregistrées.

En conclusion, les objectifs que l'on peut attendre d'un tel système de régulation par PEM ne sont pas atteints par cette vitrine : le taux de conformité est bien trop faible. Cependant, nous observons que le système réussi tout de même à exercer une stabilisation suffisante pour que les biens situés dans la vitrine ne souffrent trop des variations de l'humidité relative. Le fait que les performances attendues aient été atteintes à la mise en place du système et que le système d'étanchéité choisi pour le pan ouvrable de la vitrine soit connu comme risquant de se dégrader par réticulation du polymère, il est probable que ces mauvais résultats soient dus à une perte d'étanchéité de la vitrine plutôt qu'à une défaillance du système de régulation.

Il semble prudent d'attendre les résultats du test d'étanchéité qui devrait être mené dans le courant de l'été pour affirmer que cela soit complètement corrélé.

La vitrine du reliquaire de St Caprais à St Vrain :

La vitrine du reliquaire de Saint Caprais est située sur le bas-côté nord de l'église situé au centre de la ville de Saint Vrain. Etant dans l'espace situé au nord, il est reconnu qu'il s'agit probablement d'un des espaces les plus humide et instable que l'on puisse retrouver dans ce lieu. Malheureusement, la sonde enregistrant les données climatiques de l'environnement proche de cette vitrine a cessé de fonctionner, nous n'avons donc pas ces données pour la période étudiée.

Cependant, étant donné que la vitrine est installée depuis 2008, nous avons les données correspondantes d'autres années ce qui nous permettra d'avoir une idée du comportement général de cette période de l'année et si une tendance y est observable.

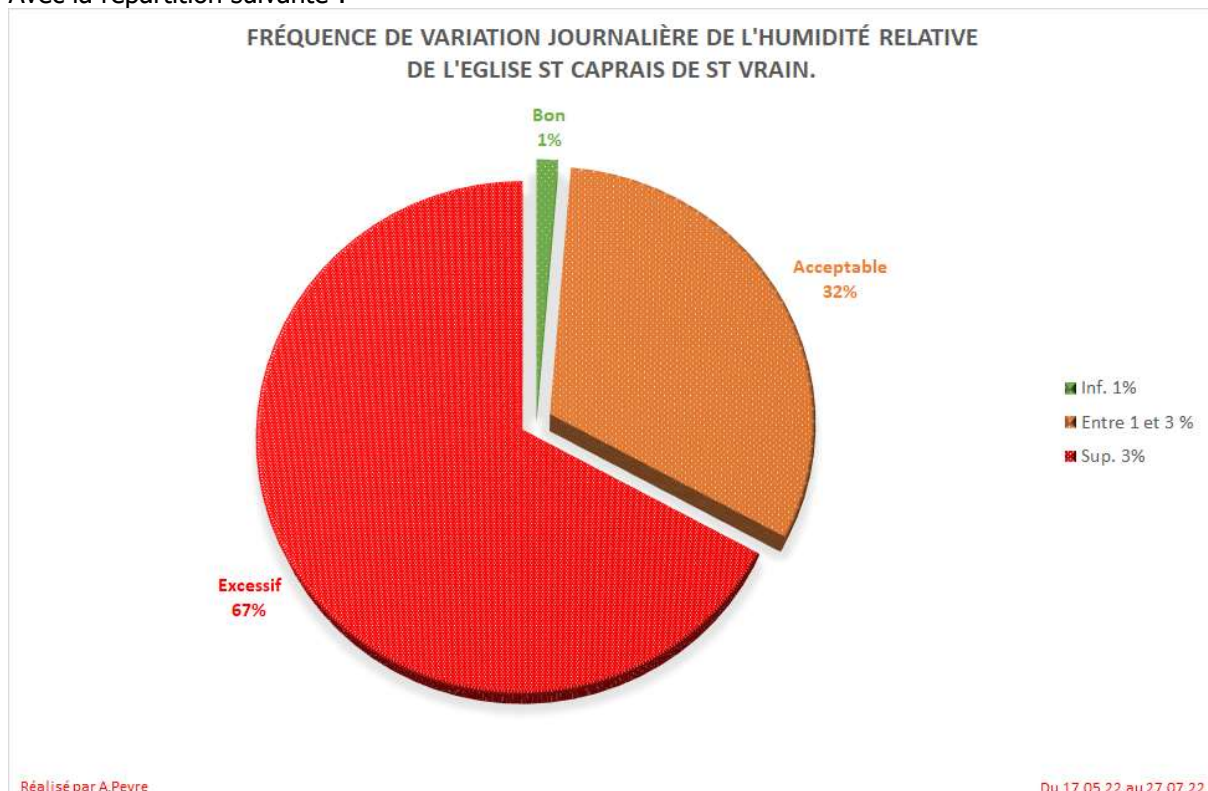
Si l'on remonte à la période allant du 09.02.2017 au 19.12.2017, les mesures de l'humidité relative oscillent entre 48 et 86 % d'H.R. avec une variation journalière pouvant atteindre les 17 %.

Également, sur la période du 24.12.2019 au 21.01.2020, l'H.R. oscille entre 71 et 89 % avec une variation journalière maximale de 9 %.

Sur la période du 30.07.20 au 21.11.20, l'H.R. oscille entre 44 et 69 % avec une variation journalière atteignant au maximum 18 %.

Du 17.05.22 au 17.07.22, l'humidité relative oscille cette fois entre 48 et 73 % et présente une variation journalière maximale de 13 %.

Avec la répartition suivante :

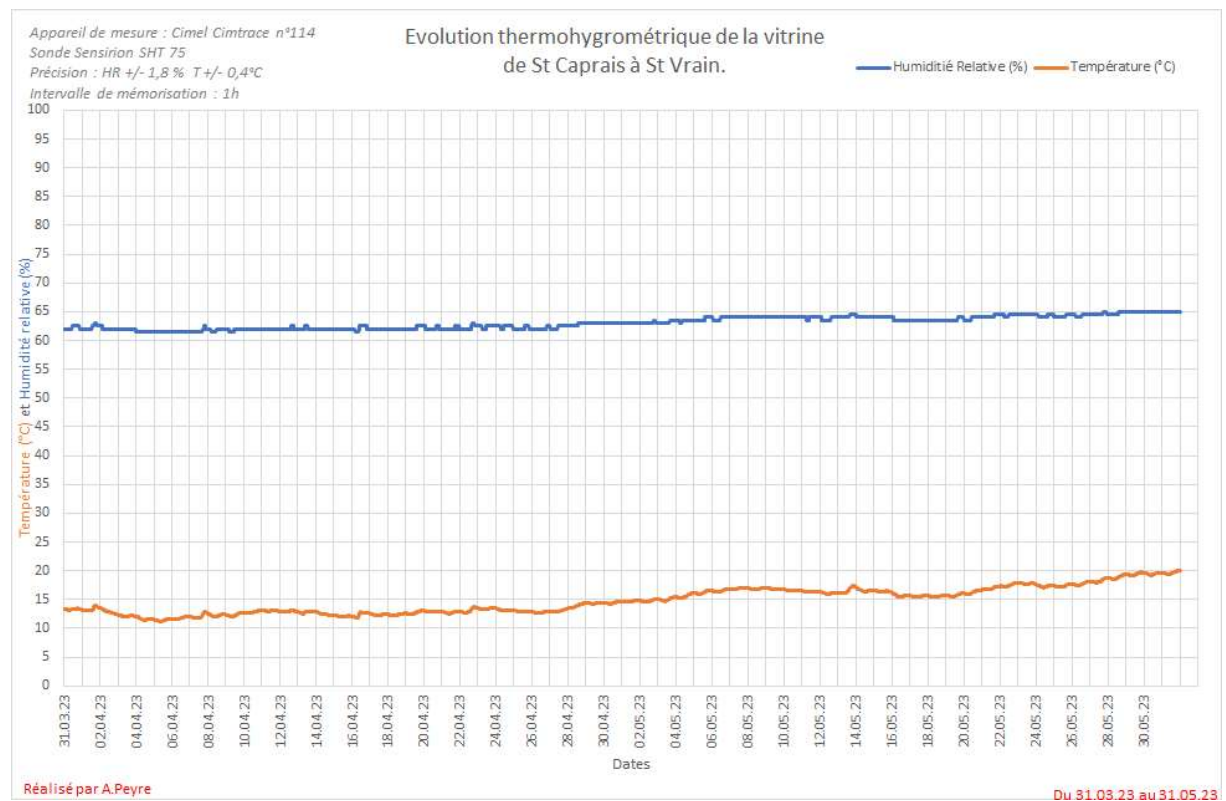


La consigne pour bonne conservation de ce reliquaire étant de $60 \% \pm 3 \%$, nous voyons que sur certaines périodes, cette valeur n'est même pas atteinte car l'environnement semble bien trop humide en hiver et trop sec en été. De plus, peu importe les périodes, les variations journalières maximales sont très élevées et sur la période du 17.05.22 au 27.07.22 (plus de deux mois), nous observons que la majorité (67 %) des mesures de variations journalières de l'humidité relative sont considérées comme excessives et seulement 1 % sont bonnes.

Il est donc acceptable de se dire que quoi qu'il en soit et bien que les données de la période étudiées ne soient pas disponibles, l'environnement du lieu d'exposition n'est absolument pas adapté à la bonne conservation de cette châsse.

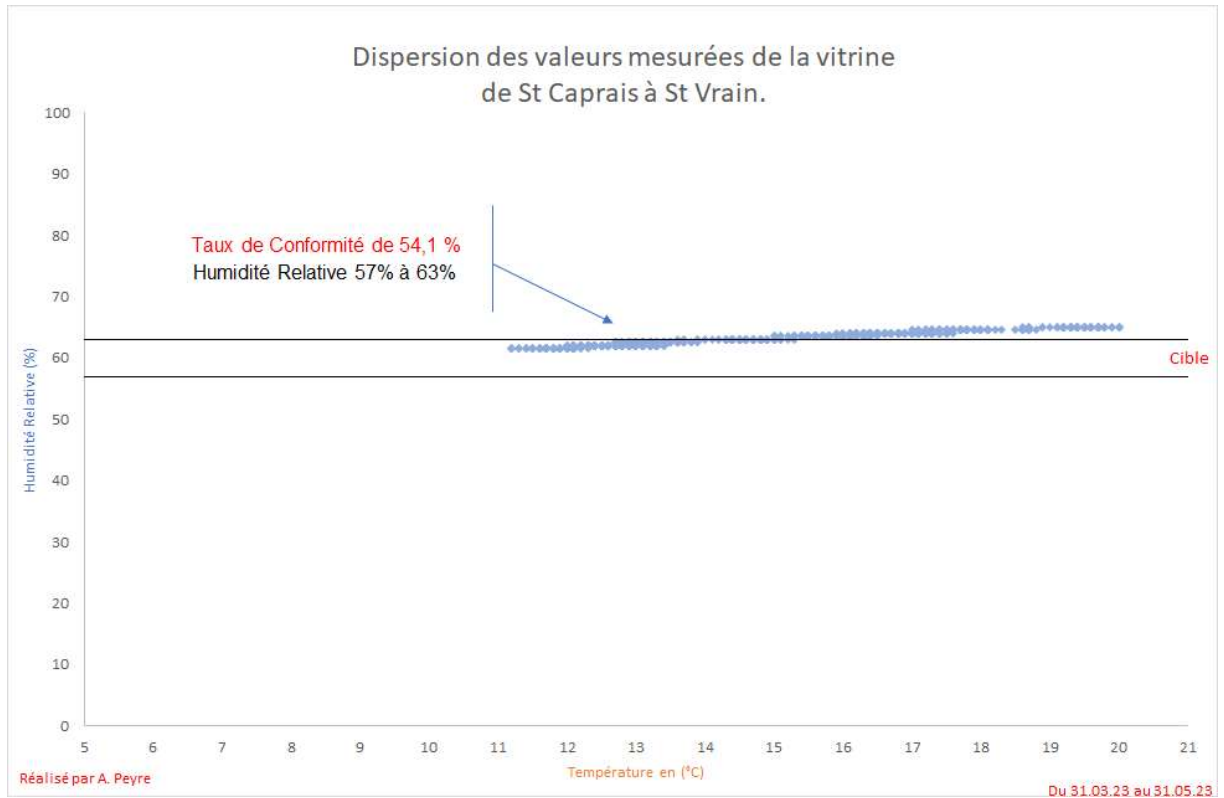
D'autant plus que nous savons que cette vitrine a été installée en 2008 pour lutter contre des développements de micro-organismes à la surface de cette dernière.

Les résultats du système de régulation de la vitrine sont les suivants :

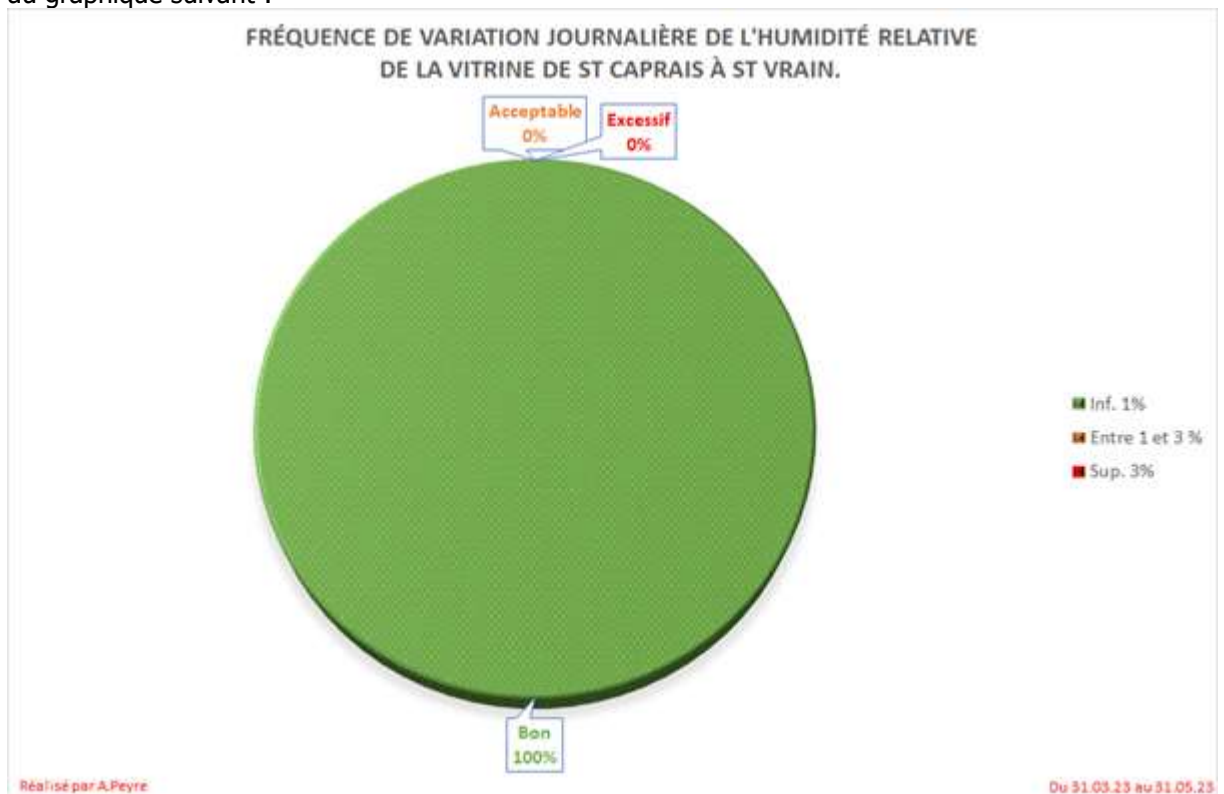


Nous retrouvons ici un comportement proche de ce qui est attendu d'un système PEM. La courbe est relativement plane mais semble progressivement s'éloigner de la consigne de 60 % d'H.R.

En effet, le taux de conformité est de 54,1 % comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous.



En revanche, en ce qui concerne la stabilisation, cette dernière est très satisfaisante car en ce qui concerne la période d'étude, la variation journalière maximale atteinte est de 1 %, ce qui nous amène au graphique suivant :



En conclusion, le système installé sur cette vitrine est très satisfaisant en termes de stabilisation, sur la période étudiée, la variation journalière maximum est de 1 % ce qui assure que l'ensemble des variations journalières de l'humidité relative sont considérées comme bonnes.

A l'inverse, le taux de conformité de 54,1 % à la consigne de 60 % d'H.R. est considéré comme décevant en regard des attentes pour un tel système.

De plus, si l'on se penche sur les autres périodes étudiées pour imaginer l'état d'instabilité de l'environnement proche, le taux de conformité est de 100 % pour une cible de 60 ± 3 % d'H.R.

Or le comportement de la courbe observable lors de notre période d'étude est une variation lente et progressive de 60 à environ 65 % d'H.R. Cela n'est pas comparable au comportement que l'on associe à une perte d'étanchéité comme à Cuffy, de plus la stabilisation reste très efficace.

Ce pourrait être symptomatique d'un vieillissement de matériel, il est cependant impossible en l'état actuel de déterminer l'élément à responsable de ce vieillissement.

Cela peut être lié au vieillissement de la sonde d'enregistrement ou de celle interne ordonnant l'action du boîtier FluXor.

Cela peut également être le boîtier de contrôle et ses connectiques ou encore les membranes en elles-mêmes.

Il serait nécessaire de retourner sur place et de tester tous les éléments matériels pour en avoir le cœur net.

Les vitrines des Boulogne-sur-Mer :

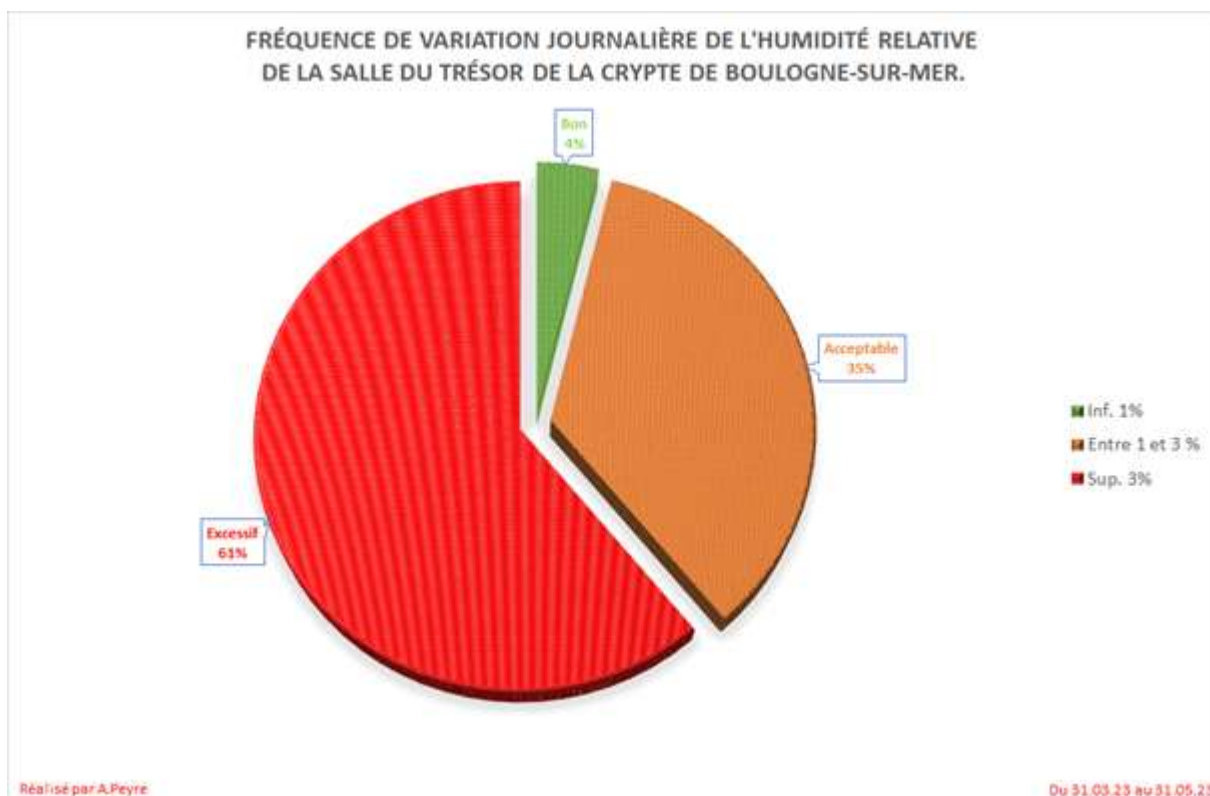
L'ensemble des cinq vitrines de la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer vont être traitées dans cette partie car elles sont toutes les cinq situées dans la même pièce.

L'environnement proche des vitrines :

La crypte est située dans les sous-sols de la basilique, elle-même située sur un éperon rocheux à environ trois kilomètres de la Manche. Le climat y est particulièrement humide et instable.

Sur la période d'étude, les données d'humidité relative enregistrées dans la salle d'art sacré de la crypte oscillent entre 56 et 83 % pour une moyenne à 76 % alors même qu'un déshumidificateur est mis en route dès que le seuil de 60 % d'H.R. est atteint. Rappelons que le seuil de 75 % d'H.R. est considéré comme le point de danger pour le départ de développement de micro-organismes de type moisissures.

Les variations journalières atteignent un maximum de 19 % d'H.R. et sont répartis de la façon suivante :



De plus les consignes pour bonne conservation des objets exposés sont situées entre 40 ± 3 et 50 ± 3 % d'H.R.

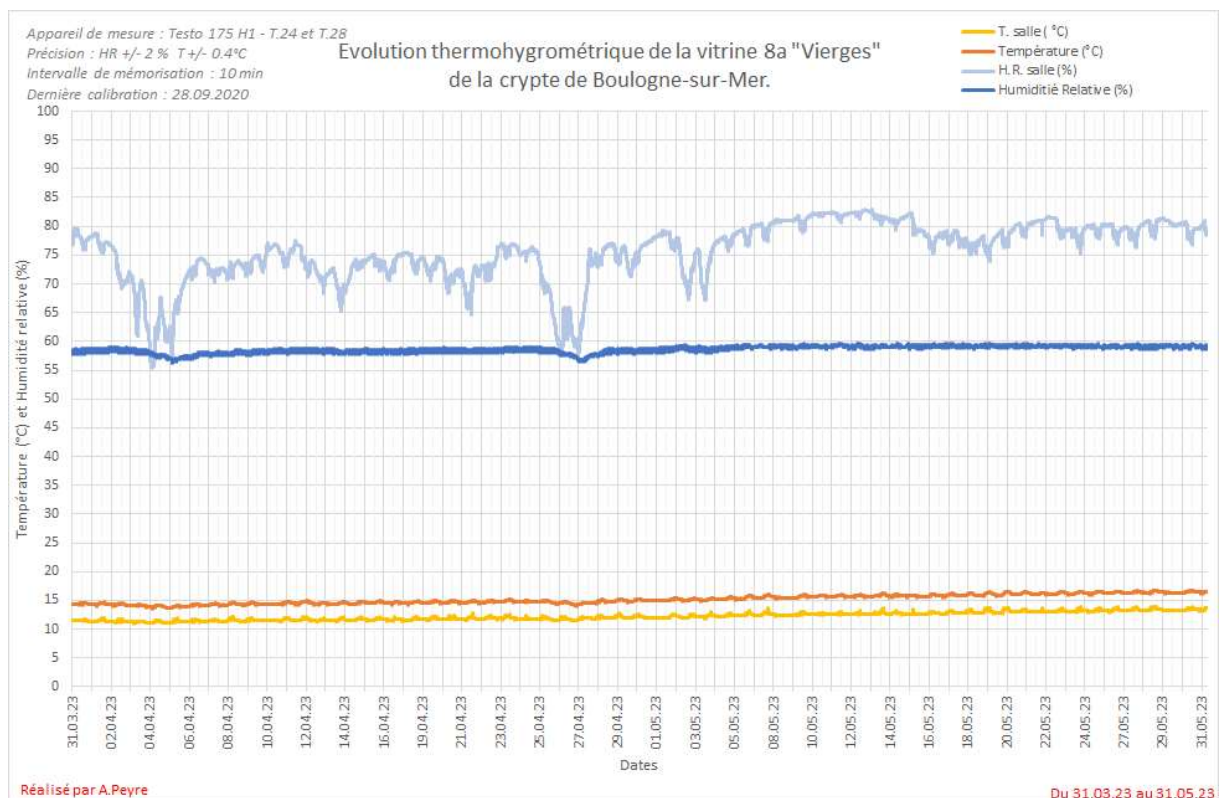
Ainsi le minimum enregistré étant supérieur à 53 %, cela n'est compatible avec aucune consigne recommandée. Ce climat est donc inadapté à la conservation des biens exposés ici, c'est pourquoi il semble nécessaire de mettre en place des systèmes de régulation du climat dans les vitrines d'exposition.

Les vitrines régulées via EBC 10® :

Les vitrines 8a et 8c présentent le même système de régulation, la solution EBC 10 de miniClima®.

Cependant les consignes sont différentes car les matériaux constitutifs des biens varient. Ainsi la vitrine 8a a une consigne de 50 ± 3 % et la vitrine 8c a une consigne de 45 ± 3 % d'H.R.

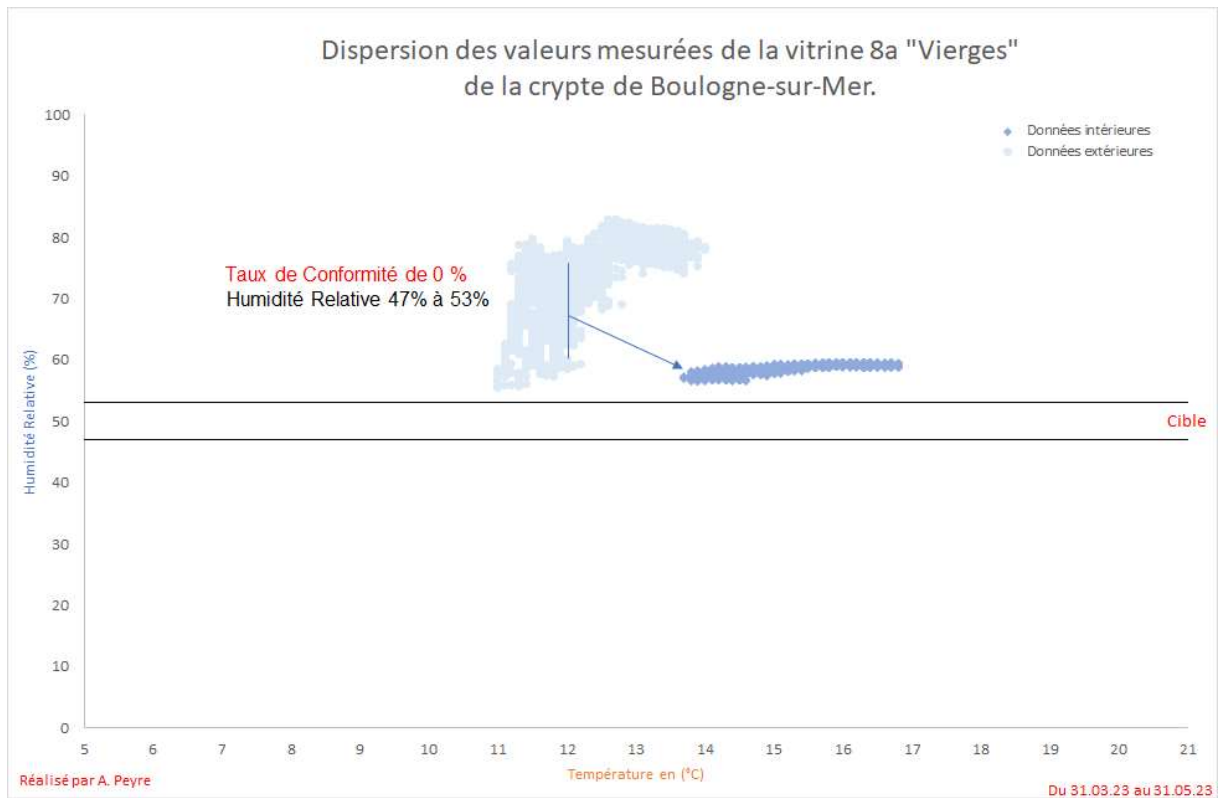
Pour ce qui est de la vitrine 8a, l'humidité relative oscille entre 57 et 60 % d'H.R. avec une moyenne à 59 %. La variation journalière maximale est de 1,6 % sur la période d'étude.



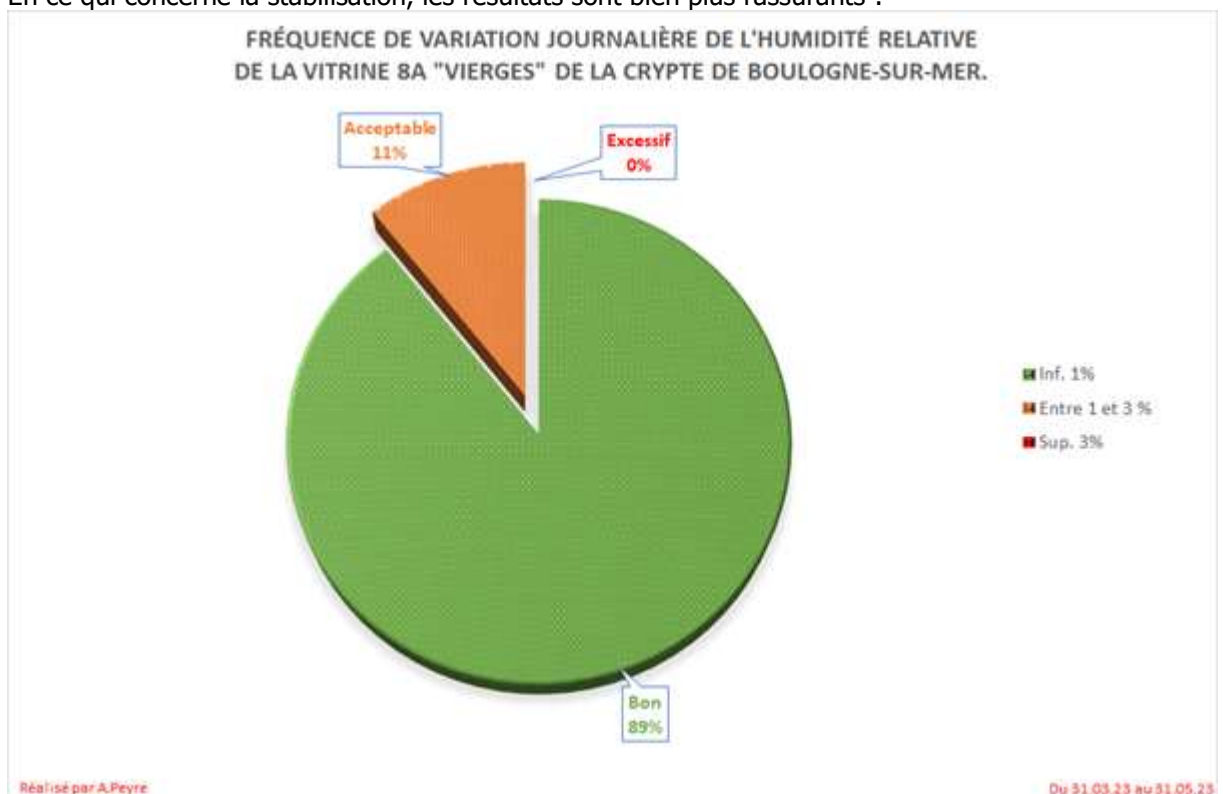
Le comportement de la courbe de l'humidité relative de la vitrine correspond à ce qui est attendu d'un système de régulation actif mécanisé, nous observons une correction permanente de l'H.R. et la courbe suit les variations importantes de l'extérieur en réduisant au maximum les amplitudes tels que l'on peut le voir autour des 4 et 6 avril et des 25 et 27 avril.

Notons également que ce système semble produire de la chaleur tel que l'on peut le voir avec l'écart de 5 °C entre les deux courbes de températures.

Cependant comme nous pouvons l'observer ci-dessous, le taux de conformité à la consigne est de 0 %. Cela n'est absolument pas satisfaisant. Cependant les mesures ne dépassent pas 60 % et nous restons donc à 15 points de la valeur limite de 75 % d'H.R. pour les risques de développement de micro-organismes, ce qui est rassurant.

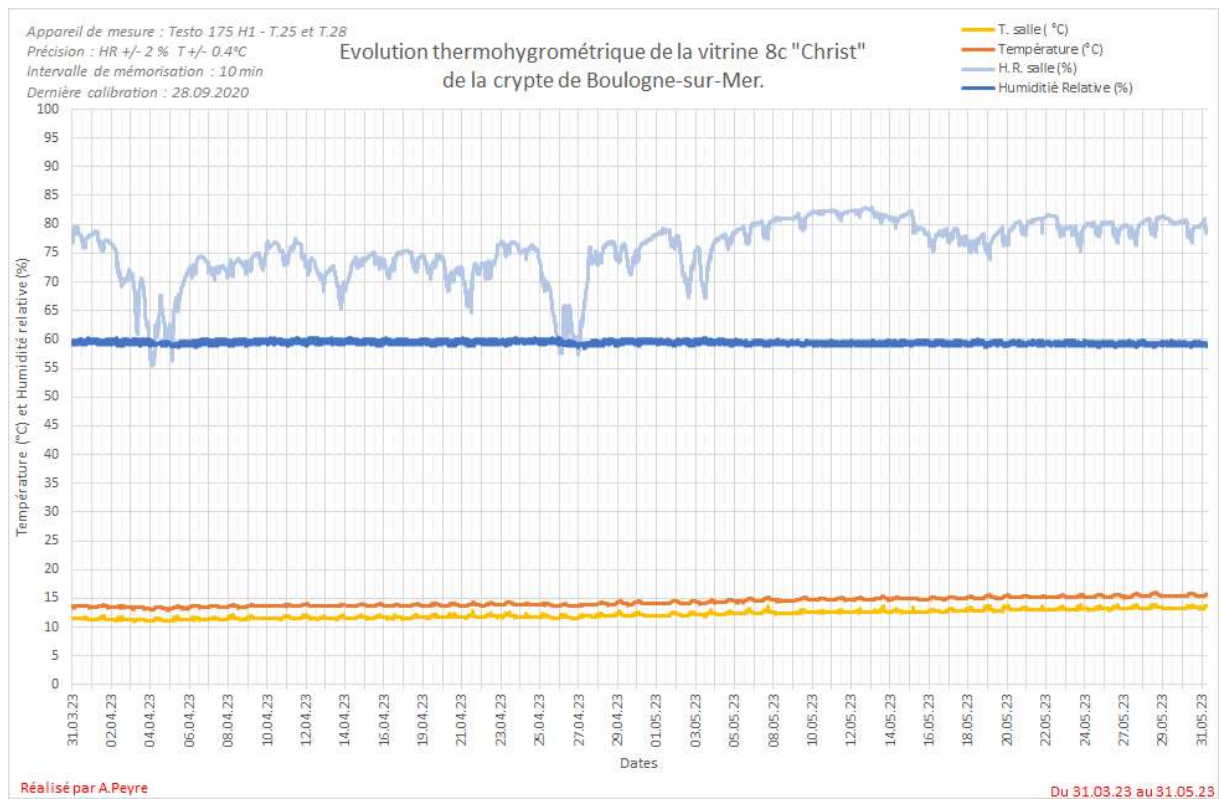


En ce qui concerne la stabilisation, les résultats sont bien plus rassurants :



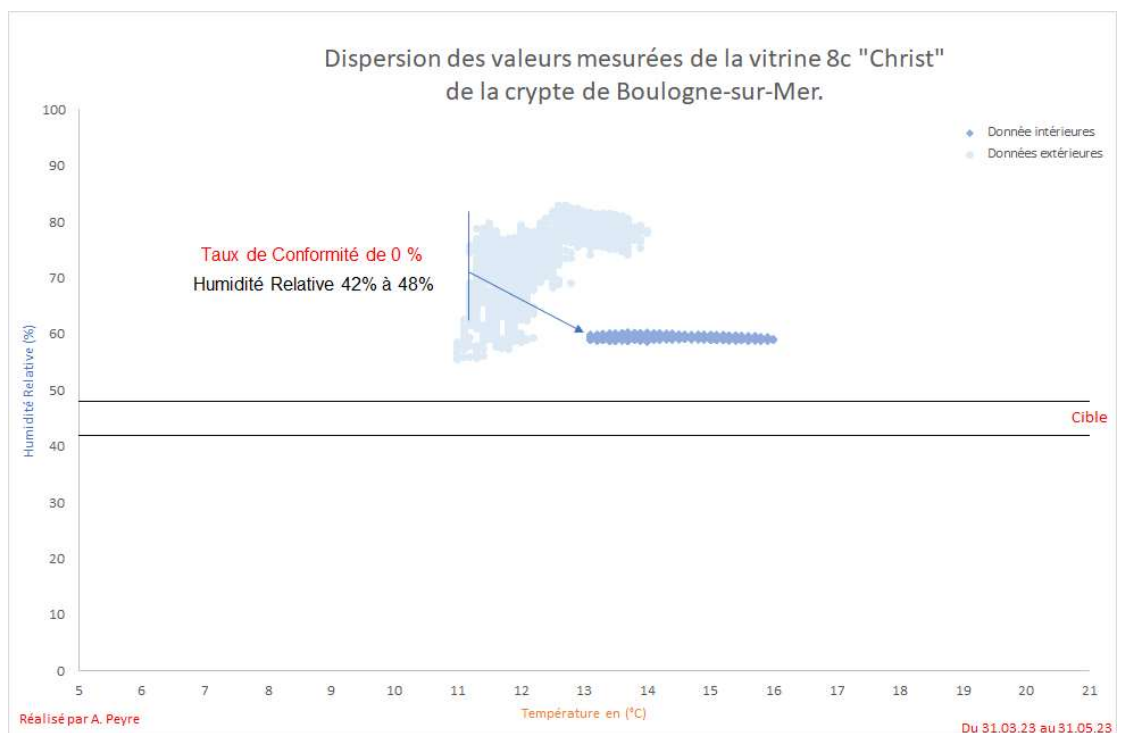
Ici, la totalité des variations journalières considérées comme excessives ont été corrigées et nous avons une majorité de 89 % des variations journalières d'H.R considérées comme bonnes

Pour ce qui est de la vitrine 8c, les mesures d'H.R. oscillent entre 59 et 60 % pour une de moyenne de 59 % d'H.R. La variation journalière maximale mesurée est de 1,4 %.

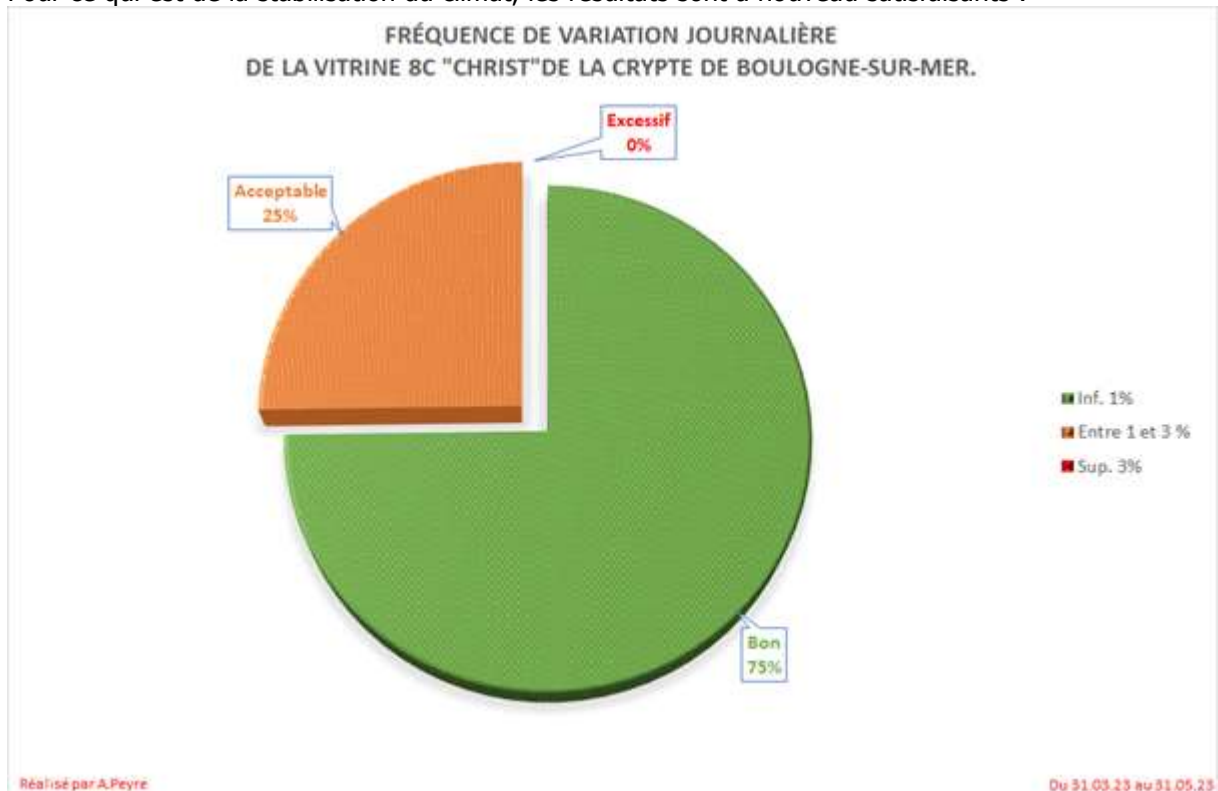


Le comportement de la courbe est tout à fait comparable à ce qui était attendu et à la courbe de la vitrine 8a, bien que les amplitudes soient encore plus faibles.

Le taux de conformité est également de 0 % pour une consigne de 45 ± 3 %, le maximum atteint étant de 60 %, nous sommes également à 15 points du seuil de 75 % d'H.R.



Pour ce qui est de la stabilisation du climat, les résultats sont à nouveau satisfaisants :



Les résultats sont comparables à ceux de la vitrine 8a, seule une proportion d'environ 14 % des variations journalières mesurées sont considérées comme acceptables au lieu de bonnes par rapport à la vitrine voisine.

En conclusion, le système de régulation de type EBC 10 utilisé pour réguler le climat des vitrines 8a et 8c de la crypte de la basilique de Boulogne-sur-Mer est décevant en ce qui concerne la capacité à atteindre la consigne. Cependant il est satisfaisant en ce qui concerne la stabilisation de l'environnement climatique et la réduction des amplitudes de variations.

Etant donné que nous n'avons d'autres données sur d'autres périodes il est difficile de savoir si l'atteinte de la consigne est freinée par une perte d'étanchéité ou simplement si ce système ne le permet pas dans ces conditions. Nous savons seulement que les joints de toutes les vitrines ont été changés en 2018, trois ans après la mise en place de ces dernières. Nous pouvons donc estimer que cinq ans plus tard, les joints aient également pu se dégrader et ainsi provoquer une perte d'étanchéité des vitrines.

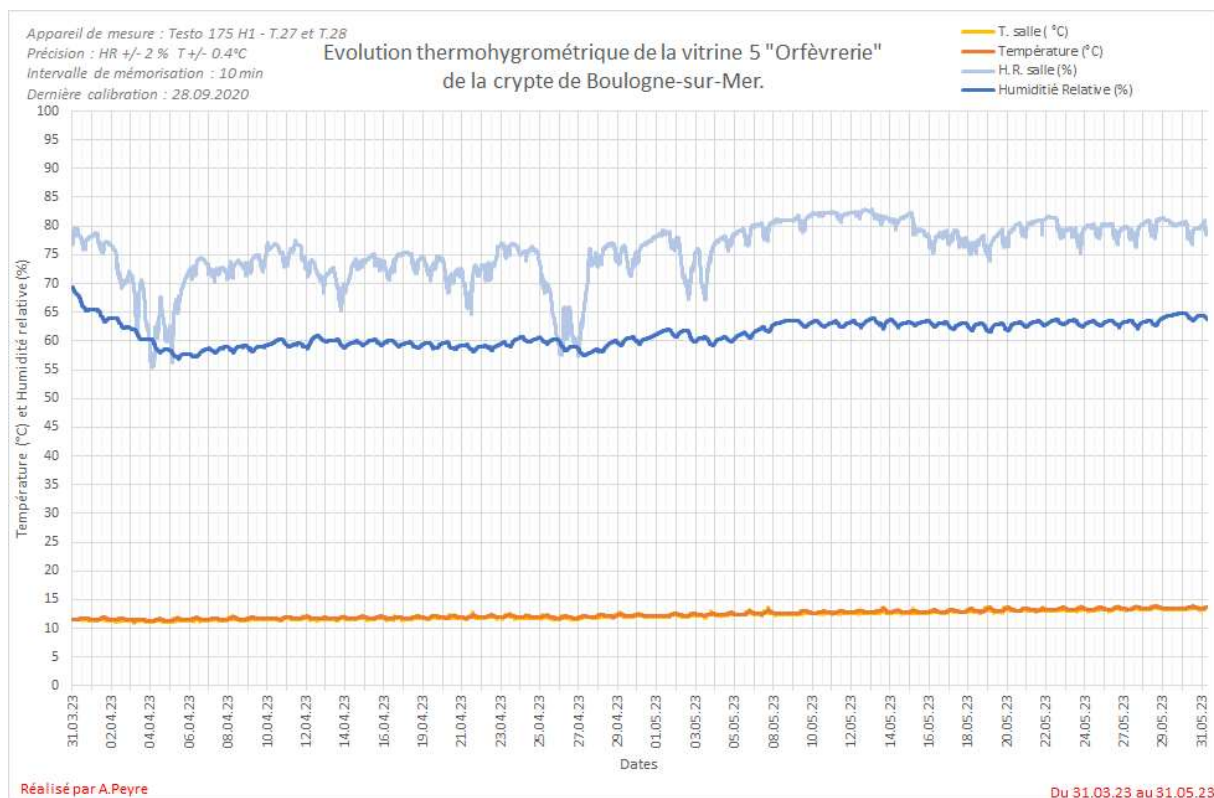
De plus une bonne stabilisation sans atteindre la consigne semble témoigner que le système fonctionne et assèche l'espace, mais que l'humidité retirée est inférieure ou équivalente à l'apport d'humidité une fois l'équilibre thermodynamique atteint.

Les vitrines régulées par cassettes de Prosorb® :

Les vitrines 5, 6 et 10 de la crypte sont régulées via cassettes de gel de silice, il s'agit de cassettes de 950g de type Prosorb®.

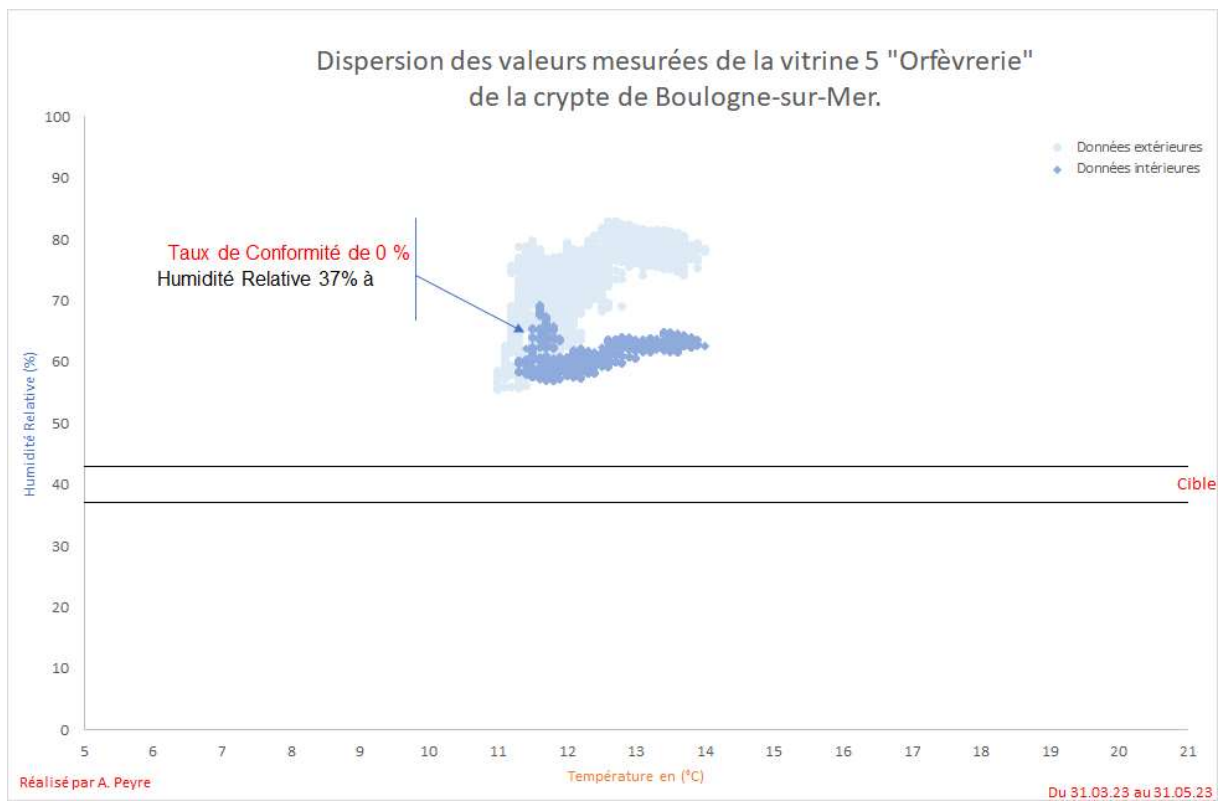
Pour ce qui est de la vitrine 5, la consigne est de 40 ± 3 % d'H.R. et elle est équipée de 5 cassettes pour réguler son volume plus imposant.

Les mesures d'humidité relative fluctuent entre 57 et 69 % avec une moyenne de 61 % d'H.R. La variation journalière maximale est de 4,1 %.

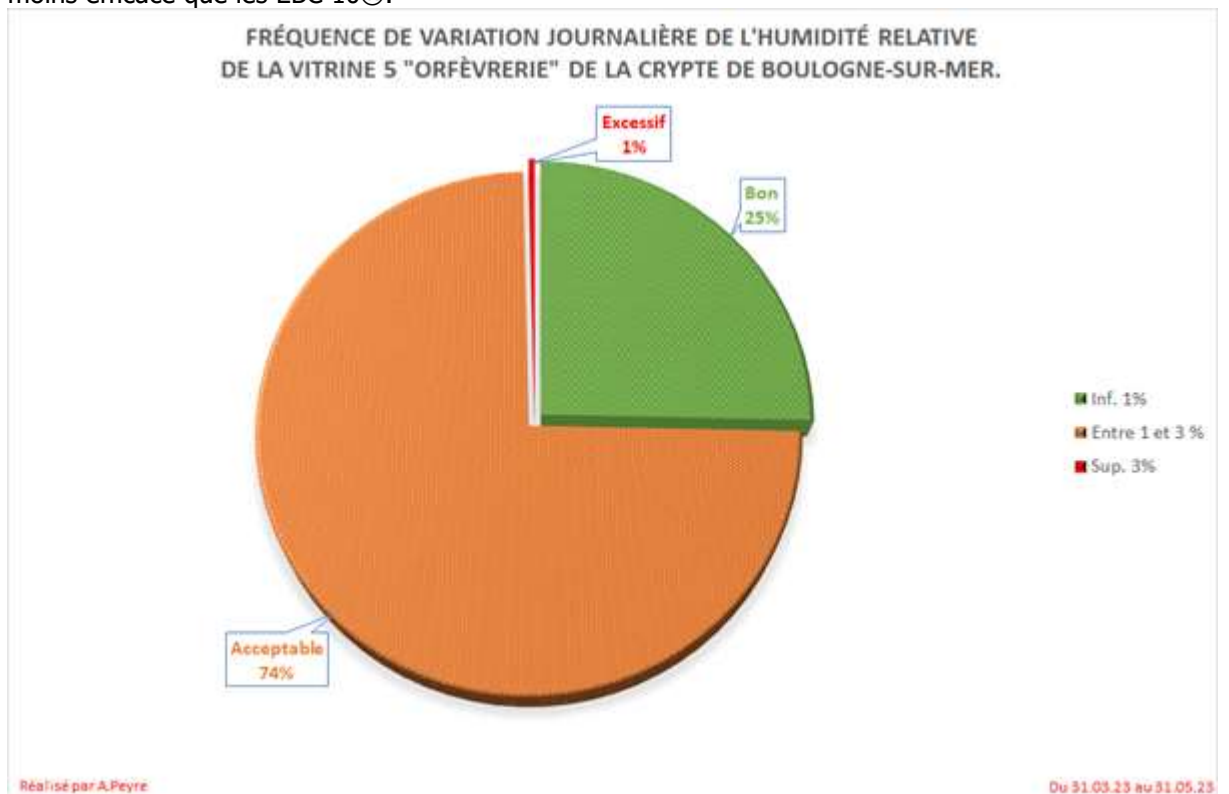


Le comportement de la courbe de l'humidité relative est telle qu'attendue, nous retrouvons toutes les variations d'humidité relative de l'environnement proche mais avec un léger décalage temporel et une forte baisse des amplitudes de variations. Remarquons la longue chute au départ, cette dernière est liée à l'ouverture de la vitrine pour positionner les capteurs ainsi que le temps nécessaire pour que l'équilibre thermodynamique soit instauré pour la stabilisation. De plus la courbe descend progressivement de 70 à 58 % pour tenter de se stabiliser à 60 %, cependant elle se stabilisera réellement à 64 % d'H.R. dans la seconde période de l'étude à partir du 08.05.23.

Ensuite, le taux de conformité est insatisfaisant car ce dernier est de 0 % pour une consigne de 40 ± 3 %. Cependant ici encore, le seuil des 75 % d'H.R. n'est pas atteint car la valeur maximale enregistrée est de 69 %. Si l'on fait abstraction de l'ouverture, la valeur de 64 % est souvent atteinte malgré la stabilisation, notons que 64 % d'H.R. peut tout de même être problématique pour la bonne conservation d'orfèvrerie tels qu'exposés dans cette vitrine et que des départs de corrosion semblent probables.

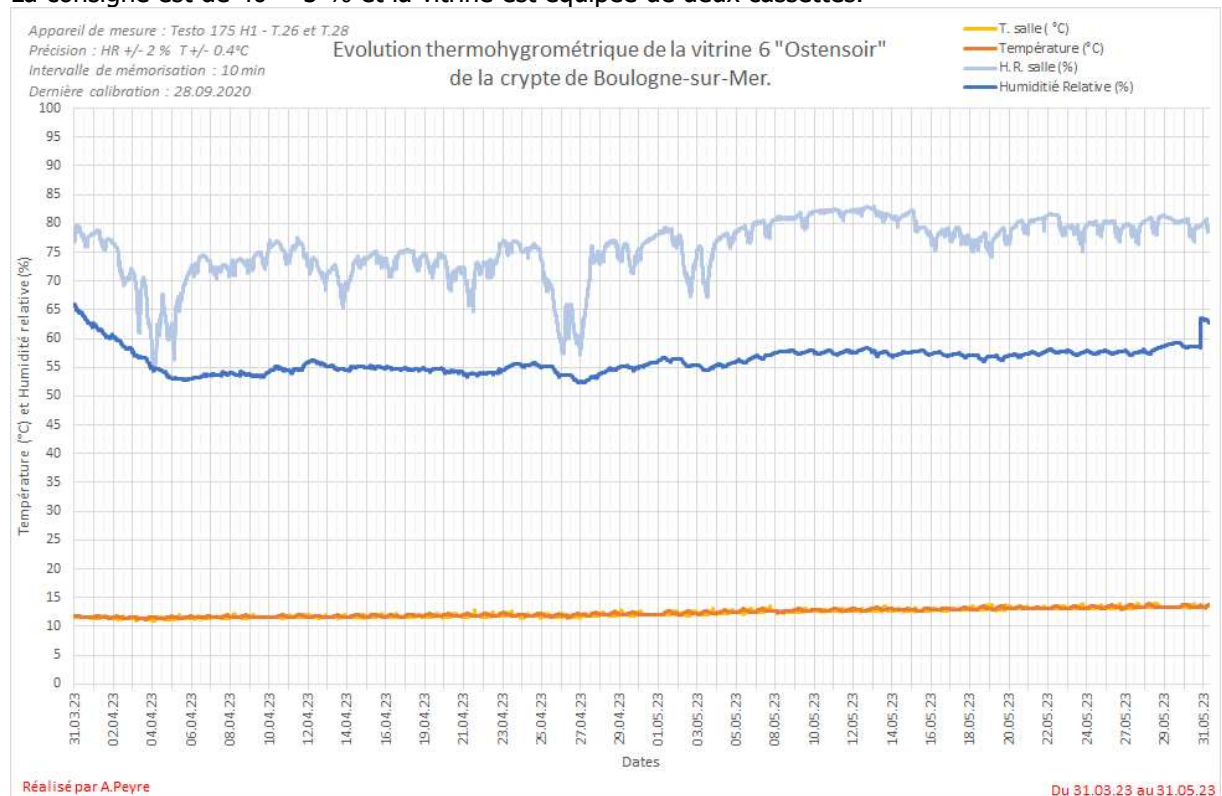


Pour ce qui est de la stabilisation, les résultats sont plutôt satisfaisants bien que le système semble moins efficace que les EBC 10®.

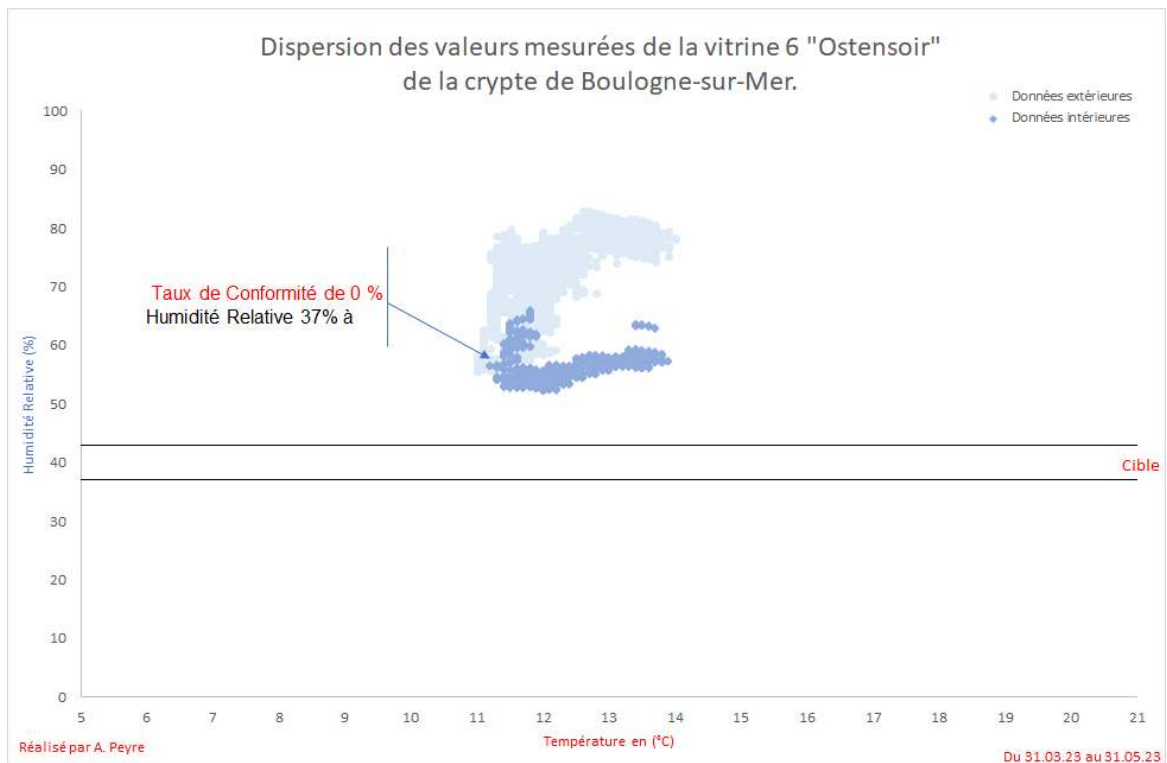


En effet, les proportions de variations journalières semblent inversées avec 74 % de variations considérées comme acceptables pour 25 % de variations bonnes. Les 1 % de variations excessives sont directement liés au temps nécessaire au retour à un équilibre thermodynamique après ouverture et sont donc négligeables.

Pour ce qui est de la vitrine 6, les résultats sont tout à fait similaires, les valeurs mesurées sont réparties entre un minimum de 52 et un maximum de 66 % pour une moyenne de 56,2 %. La variation journalière maximale est de 5,3 %. La consigne est de 40 ± 3 % et la vitrine est équipée de deux cassettes.



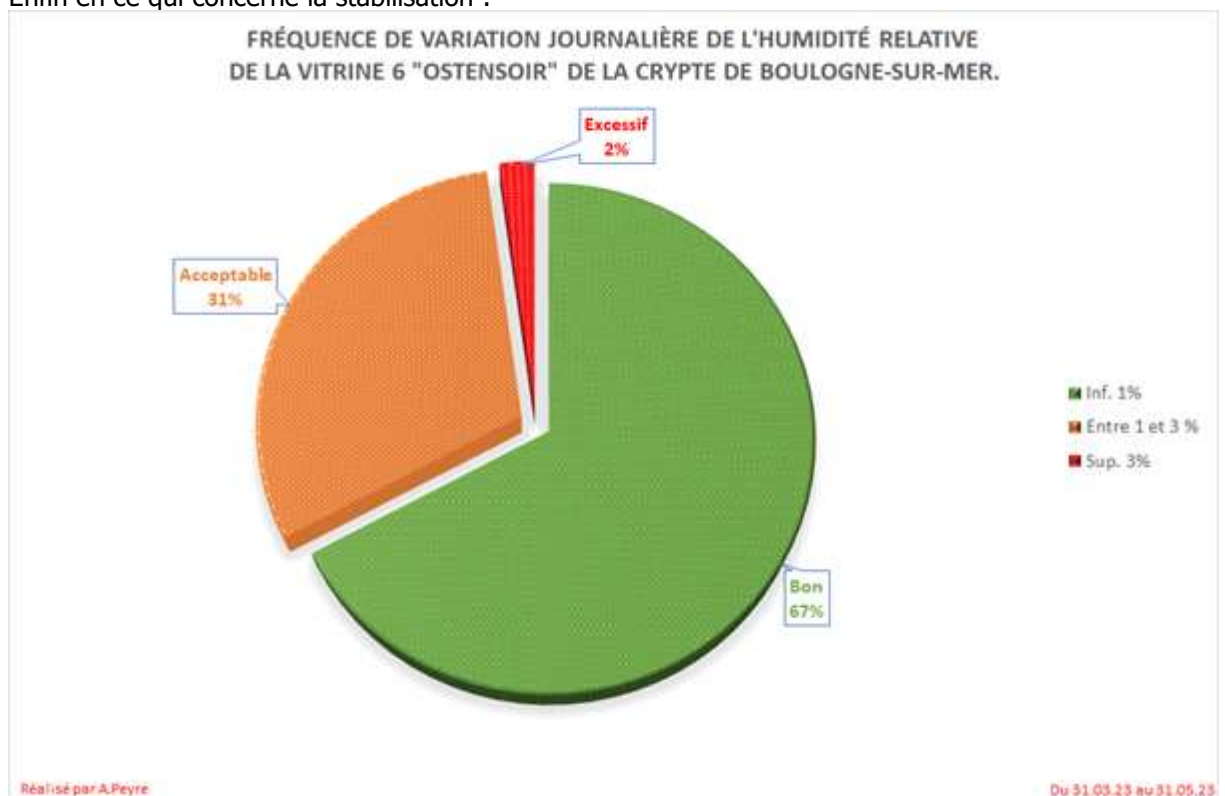
Le comportement de la courbe est comparable à la précédente bien qu'elle soit plus lissée, c'est-à-dire que les amplitudes soient encore plus réduites. Le pic final est relativement suspect est difficile à expliquer. La courbe descend et cherche à se stabiliser autour de 55 % pour finalement se stabiliser à 57, 58 % dans la seconde partie de la période.



Le taux de conformité est également de 0 % pour la consigne de 37 à '3 % d'H.R.

Si l'on fait abstraction du temps de mise en équilibre suite à l'ouverture de la vitrine et du pic final suspect, les valeurs ne semblent dépasser les 58 %, ce qui est bien préférables aux 64 % de la vitrine 5.

Enfin en ce qui concerne la stabilisation :



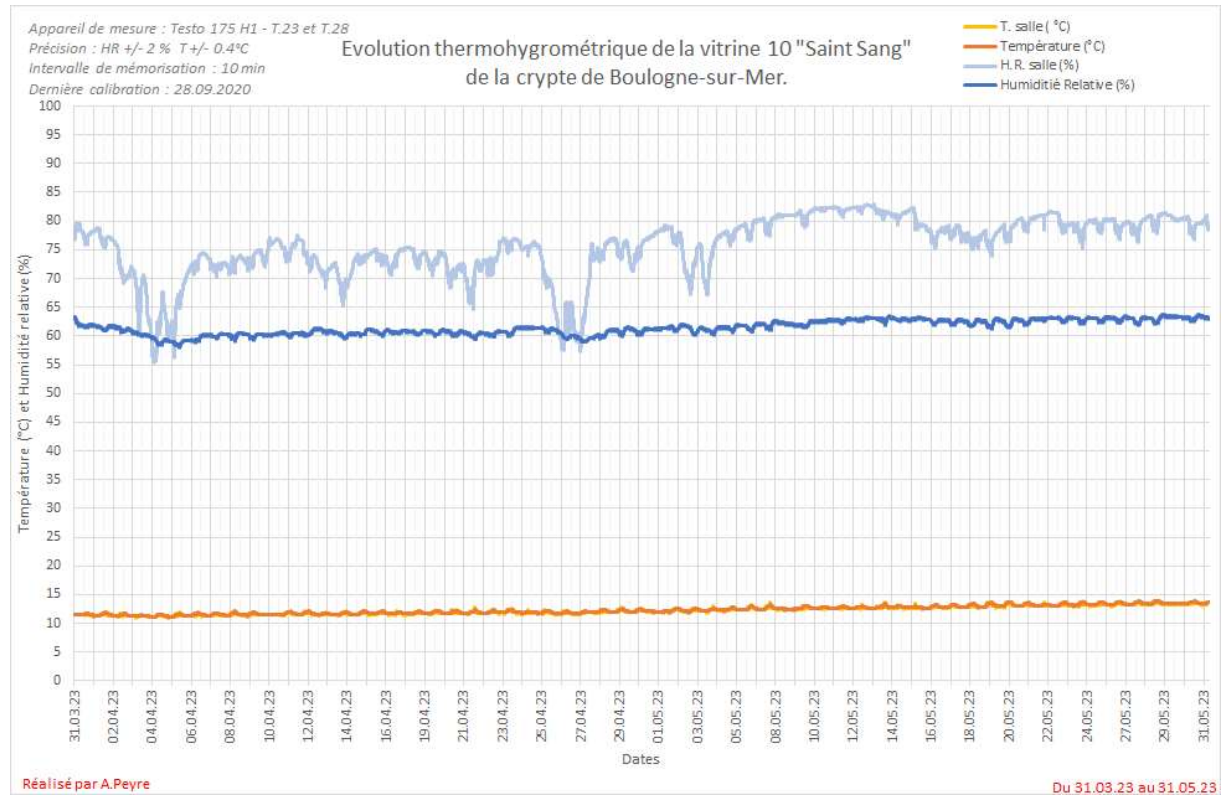
Les résultats sont bien meilleurs aux résultats de la vitrine 5 et comparables aux résultats de stabilisation d'un système EBC 10® tel que celui de la vitrine 8c qui présente 75 % de variations journalières bonnes et 25 % de variations journalières acceptables.

Ici les 2 % considérés comme excessif sont, à l'instar de la vitrine 5, à mettre au discrédit du temps de mise à l'équilibre de départ et au pic final.

Les résultats de stabilisation de ce système sont tout à fait acceptables également.

Enfin pour ce qui est de la vitrine 10, la consigne est de 40 ± 3 % d'H.R. et elle est également équipée de deux cassettes de Prosorb®.

Les valeurs enregistrées fluctuent entre 58 et 64 % pour une moyenne de 62 %. La variation journalière maximale est de 1,9 % d'H.R.

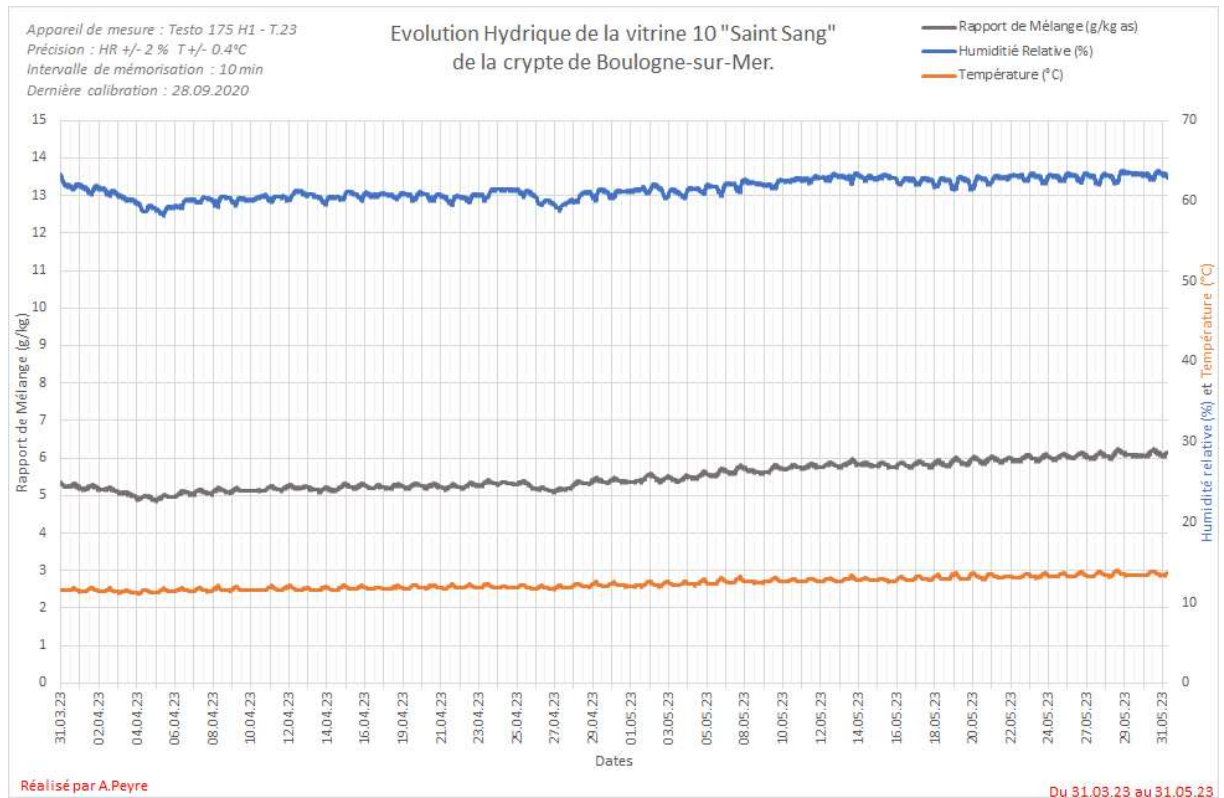


Le comportement de la courbe est tout à fait comparable à ce qui est attendu et au comportement des courbes des deux autres vitrines régulées par gel de silice.

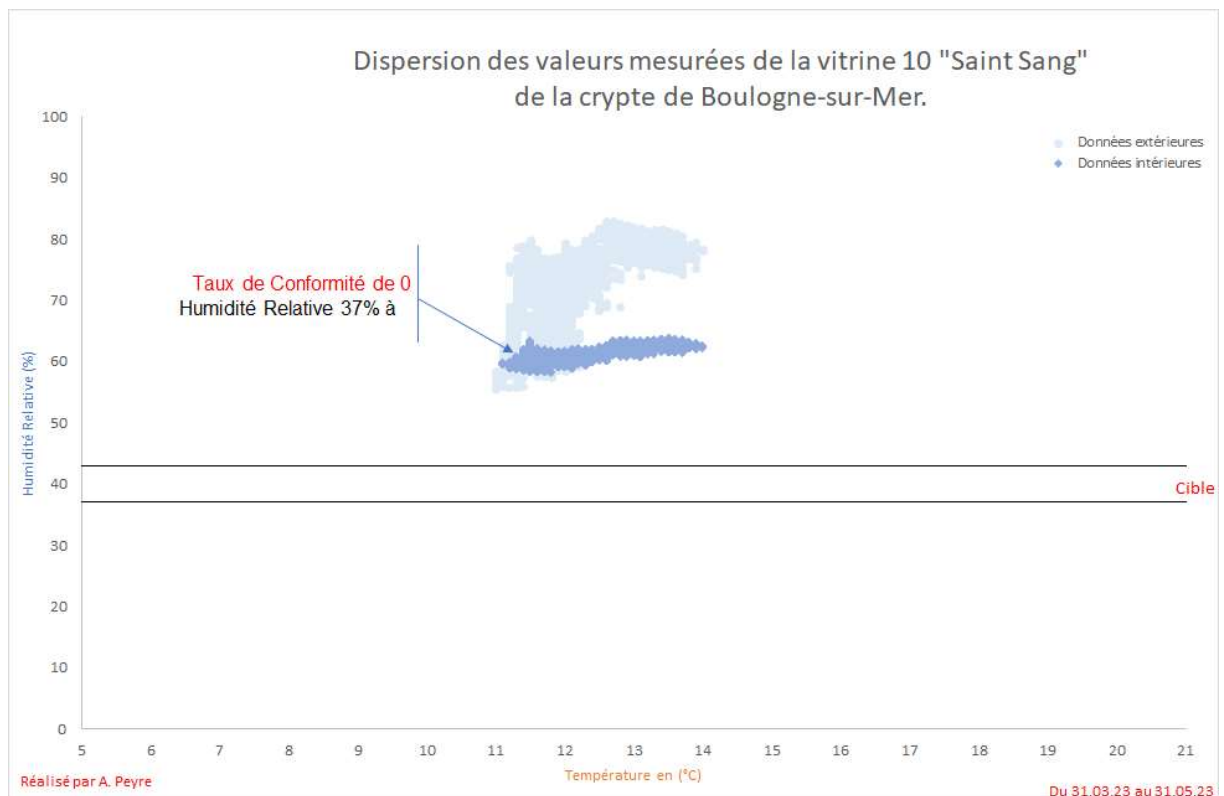
Le temps de mise en équilibre semble plus faible car l'équilibre se produit plutôt aux alentours de 60 %.

Nous retrouvons le même phénomène d'une tentative de stabilisation autour de 60 % à partir du 04.04.23 pour finalement se stabiliser à 64 % à partir du 08.05.23. Ce comportement laisse présager que l'assèchement de l'espace est difficile à maintenir et la remontée progressive de l'humidité relative laisse sous-entendre un apport d'humidité supérieur aux capacités des cassettes.

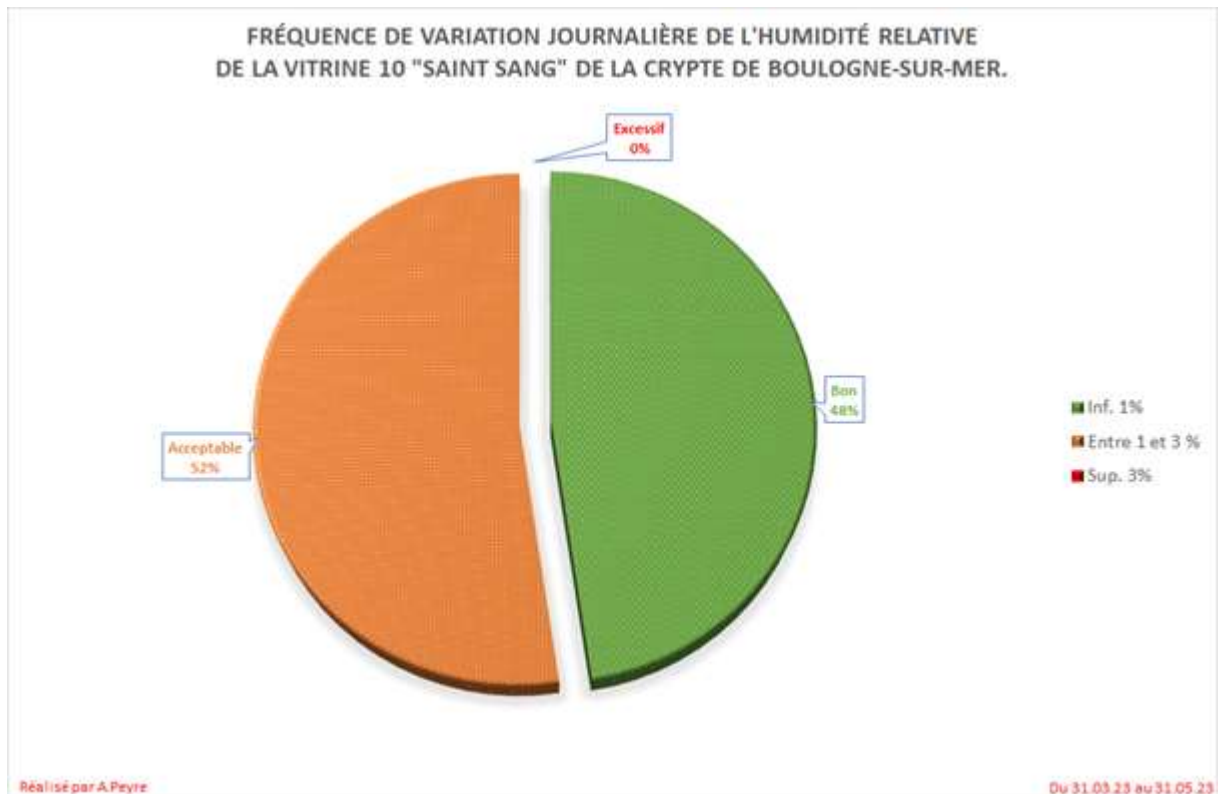
Si l'on observe l'évolution hydrique de la vitrine à travers le rapport de mélange, nous observons nettement une remontée de la quantité d'humidité dans la vitrine, cela semble tout droit coïncider avec le fait que l'étanchéité des vitrines de la crypte soit questionable du fait que les joints nécessitent une révision, que les consignes ne sont pas atteintes dans l'état des choses actuelles.



Le taux de conformité est également de 0 % par rapport à la consigne et si l'on fait abstraction du temps de mise en équilibre thermodynamique, l'humidité relative de la vitrine semble souvent atteindre les 64 % ce qui est à nouveau élevé pour la conservation de patrimoine métallique mais n'atteint pas le seuil de 75 % pour le développement de micro-organismes.



Pour ce qui est de la stabilisation :



Les résultats de cette vitrine sont tout à fait comparables à ceux de la vitrine 5, acceptables sans tout à fait être pleinement satisfaisants. Et ce bien que la part de variations journalières dites « bonnes » sont supérieures de 20 points, cela reste bien derrière les résultats de la vitrine 6.

En conclusion, les résultats de la régulation par gel de silice sont assez variables, si les valeurs consignées ne sont jamais atteintes dans les conditions de notre étude, la stabilisation est plutôt acceptable voir satisfaisante pour la vitrine 6.

Le comportement particulier de tentative de stabilisation de l'humidité relative du système avant remontée des valeurs semble mettre en évidence la perte d'étanchéité des vitrines. Si ce facteur a été modifié, cela expliquerait la difficulté à atteindre les valeurs de consigne que ce soient les systèmes via gel de silice ainsi que EBC 10® car les réglages devraient alors être adaptés.

Comme il n'existe pas de données enregistrées antérieurement pour ces vitrines, la seule solution pour en avoir le cœur net serait de réaliser des tests d'étanchéité et dans l'idéal avant et après changement des joints par l'entreprise fabricante Goppion SA®.