



Par le passé, les établissements culturels avaient recours à **des hygromètres ou des hygrographes à cheveu** pour enregistrer les variations de température et d'humidité relative (HR). Peu réactifs aux fluctuations rapides et contraignants à utiliser, ces appareils mécaniques sont aujourd'hui délaissés **au profit de thermohygromètres électroniques enregistreurs** qui permettent des **mesures justes** et qui sont plus **facilement exploitables** pour une étude climatique.

Normes de référence

- NF EN 15758 (novembre 2010), Conservation des biens culturels - Méthodes et instruments de mesure de la température de l'air et de la surface des objets
- NF EN 16242 (juin 2013), Conservation des biens culturels - Modes opératoires et instruments de mesure de l'humidité de l'air et des échanges d'humidité entre l'air et les biens culturels

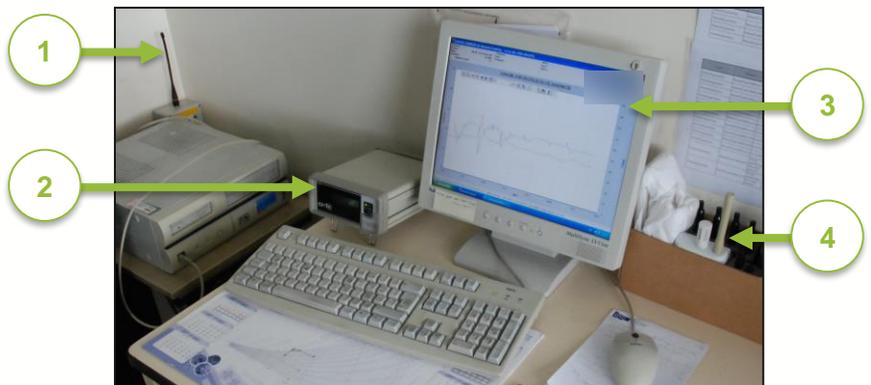
I/ Critères de choix relatifs au contexte d'utilisation

Les appareils de mesure thermohygrométrique permettent d'apprécier les **valeurs de température et d'humidité relative (HR)**, en fonction :

- d'un **objectif** : connaissance et surveillance des **conditions climatiques générales** (pour l'établissement ou pour une institution prêteuse qui exigerait en disposer), localisation des **microclimats** (courants d'air, zones confinées à l'air mal brassé), compréhension d'un **problème apparu** et identification de sa source (dysfonctionnement / panne / arrêt d'un appareil de régulation climatique, coupure d'électricité, pic d'humidité dû à une présence importante de publics ou d'un nettoyage à grandes eaux), identification des **mesures correctives à entreprendre** et estimation de leurs performances (écarts thermiques ou hygrométriques à compenser) ;
- d'un **cadre temporel** : **instant spécifique** dans le cas d'appareils à mesure ponctuelle (permettant de connaître une situation au moment de la prise de mesure), **période définie** dans le cas d'appareils enregistreurs (faisant état des variations climatiques à l'échelle de la journée / de la semaine / du mois / de l'année / de jour ou de nuit) ;
- d'un **espace** : **extérieur**, **salles** (salles d'exposition, réserve, espaces de transit ou d'étude, espace de préparation des collections, ateliers de restauration), **espace clos** (vitrine, boîte, tiroir, caisse de transport).

Capteurs enregistreurs pour l'étude des variations climatiques avec transmission des données à distance

1. Relais répéteur
2. Concentrateur
3. Ordinateur connecté Ethernet
4. Capteur avec antenne transmettrice



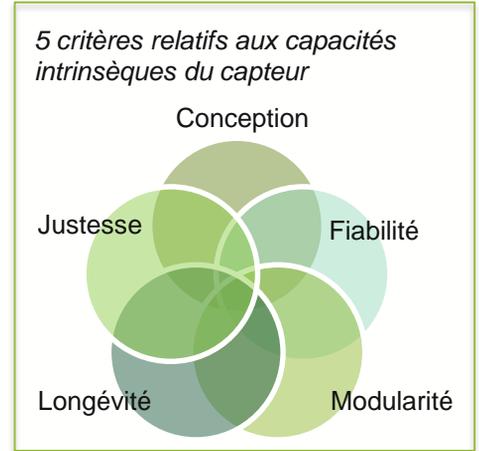
II/ Critères de choix relatifs aux capacités intrinsèques du capteur

II.1/ La conception du capteur

- Les capteurs sont de **dimensions réduites** (dizaine de centimètres de côté) pour être à la fois légers et mobiles (voire plus petits pour s'insérer dans un tiroir ou une caisse de transport).
- Pour contrer ou limiter l'**inertie thermique du boîtier**, la sonde doit être externe et l'épaisseur du boîtier doit être assez fine (sans pour autant contrevenir à sa solidité).

L'inertie thermique inhérente à la nature du boîtier induit deux phénomènes : d'une part, le capteur donne d'abord **ses valeurs**

thermohygrométriques intérieures en attendant de se mettre à l'équilibre avec l'environnement et d'autre part, le capteur perçoit difficilement les **fluctuations climatiques rapides**.



II.2/ La justesse de la sonde

- La justesse désigne la capacité d'un capteur à restituer au mieux la mesure/ Il doit être **représentatif de la réalité** (ne pas amortir le signal perçu) et **rapidement réceptif** aux variations du climat (ne devant pas déphaser le signal perçu, c'est-à-dire décaler dans le temps).
- La justesse repose sur deux paramètres :
 - la **gamme d'utilisation** qui correspond à la plage de mesures ;
 - la **précision** – également appelée écart maximal garanti « **EMG** » – qui rend compte de l'incertitude de la mesure. Cet EMG est indiqué par le fabricant pour une température entre 18°C et 28°C en laboratoire : plus on s'éloignera de ces conditions thermiques, plus la **précision déclinera** (en cas de températures trop faibles ou trop chaudes, l'EMG des capteurs sera moins performante).
- Une justesse trop grande **n'est pas indispensable** pour les institutions culturelles, contrairement à certains domaines - scientifiques ou industriels - qui requièrent des mesures très précises (leurs capteurs, basés sur des technologies complexes, sont plus onéreux).

II.3/ La fiabilité de la sonde

- La notion de fiabilité s'associe à l'entretien de l'appareil, un capteur fiable étant un **capteur résistant** et nécessitant un **réétalonnage peu fréquent**.
- Si le capteur est soumis en continue à un environnement **trop pollué** (milieu urbain ou marin), **trop chaud ou trop humide** (notamment pour les capteurs résistifs), il devient **moins fiable** et doit être réétalonné plus souvent, voire remplacé.

II.4/ La longévité

- Les capteurs électroniques ont une longévité de **plusieurs années**. Leurs piles sont généralement des **batteries lithium** d'une durée de vie de **5 ans** (celle-ci diminuant si l'intervalle de prise de mesures est trop intense).
- La mémoire interne doit être prise en compte. Pour les capteurs qui enregistrent les données sans transmission vers un serveur, ils doivent pouvoir stocker les données sur une longue période **supérieure à une année d'utilisation**. Pour les capteurs envoyant les données par ondes, leur mémoire interne permet de pallier d'éventuelles interruptions de la transmission des informations. Le concentrateur doit aussi avoir une autonomie de plusieurs heures en cas de **coupure du courant électrique**.
- Si les données ne sont pas transférées ou déchargées, elles peuvent être **perdues** car les nouvelles mesures peuvent **remplacer les anciennes**.

II.5/ La modularité (facultative)

- Certains capteurs sont conçus pour que la sonde puisse être **fichée dans le boîtier** afin de faciliter l'insertion d'une sonde déportée (pour des mesures en zone difficilement accessible) ou le retrait (pour l'entretien du capteur).
- Certains boîtiers peuvent accueillir une **seconde sonde supplémentaire**, impliquant un deuxième canal de prise de mesures.

III/ Critères relatifs au système d'exploitation capteur / ordinateur

Les critères suivants sont valables pour les capteurs enregistreurs. Ceux-ci doivent autant que possible être **privilegiés aux appareils à mesure ponctuelle** qui ne permettent pas un suivi et une gestion climatique efficaces et raisonnés.

III.1/ Les possibilités techniques

Les données climatiques peuvent être transmises par **voie filaire** (Ethernet) ou par **ondes** (basses fréquences – radio, Lo-Ra – ou hautes fréquences – Wi-Fi, réseaux de télécommunication). Elles sont alors versées et stockées soit sur un **serveur local** (consultable sur site ou à distance grâce à une connexion VPN), soit sur un **serveur Web** (Cloud). Les caractéristiques et contraintes techniques de ces solutions orientent quant au choix à mener [voir Annexe].

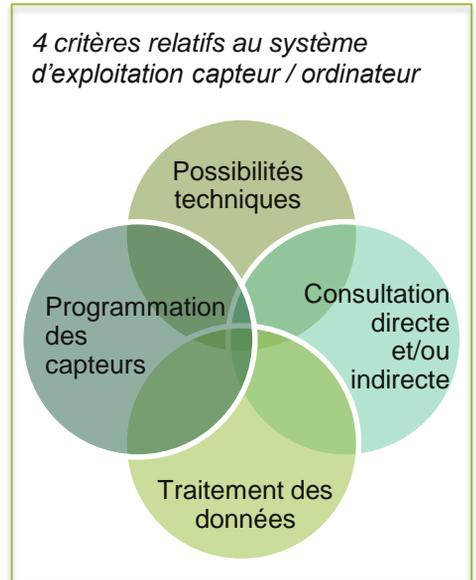
Toute acquisition d'un système connecté de collecte des données climatiques doit être étudiée **en concertation avec le service informatique** de l'institution pour expliquer les besoins des utilisateurs, pour identifier les contraintes techniques et pour déterminer les solutions palliatives le cas échéant.

- La sécurité des systèmes d'information (SSI) est souvent **réticente à une connexion au réseau Wi-Fi** du système climatique, craignant les interférences et le ralentissement de la bande passante par la circulation d'informations supplémentaires en continue.
- La SSI peut également être **réfractaire quant à un versement des données sur un serveur délocalisé / hébergé** pour des raisons de sécurité du réseau (la sécurisation dépendant du prestataire qui héberge les données). Elle recommande généralement l'installation d'un logiciel sur un serveur local, même s'il peut être plus pratique pour l'équipe de conservation de disposer des données via un portail internet pour un accès plus aisé aux données et simplifier la maintenance du système.

Dans le cas d'une institution s'étendant sur plusieurs sites, un **serveur hébergé** peut se révéler **indispensable** selon la situation :

- si ces sites sont reliés au **même réseau informatique** (peu importe la distance kilométrique entre eux), alors les données peuvent être versées sur un **serveur local**, consultable par tous (Ethernet ou par ondes, et VPN) ;
- si chaque site est indépendant et ne partage **pas de serveur local commun**, alors le **serveur hébergé** sur Internet s'impose pour que les équipes de conservation puissent visualiser les données à distance.
- Le logiciel affilié aux capteurs climatiques, s'il est installé sur un poste informatique dédié ou sur un serveur local pour un accès par plusieurs postes, doit être **compatible avec le système d'exploitation informatique** de l'institution (Windows, Linux, etc.).

Dans le cas d'un stockage des données sur un serveur délocalisé avec un accès via un navigateur Web, **aucune installation de logiciel** par le service informatique de l'institution n'est requise : les utilisateurs peuvent consulter les données grâce au navigateur Web depuis n'importe quel terminal (ordinateur, tablette, smartphone, etc.).



Possibilités techniques pour la transmission de données par des capteurs mobiles lors d'un transport

- Certaines fréquences sont **inadaptées pour des capteurs mobiles**.
- Le système **RFID** est très limité au sein d'une institution car les données ne sont pas consultables à distance à cause des nombreuses interférences : il est nécessaire de décharger les données en se rapprochant physiquement de chaque capteur RFID avec une unité de récupération mobile (voir *Mode de consultation c*).
Toutefois, dans le cadre d'un transport, des **tags RFID** ont été conçus pour se glisser **en caisse** afin d'enregistrer les données de **température**, d'**hygrométrie** et de **géolocalisation**, puis de les transférer vers un **serveur délocalisé** (Cloud) afin de les rendre accessibles instantanément à distance par un ordinateur ou un téléphone portable.
Cependant, la transmission peut être perturbée par la présence de **contenants métalliques** ou par des **interférences** générées par la présence d'autres tags RFID à proximité.
- De la même façon, la **télécommunication** (2G à 5G) est adaptée pour des capteurs mobiles.

III.2/ La programmation des capteurs enregistreurs

Plusieurs types de programmation doivent être disponibles.

- Le plus important concerne le **choix du pas de mesures** (parfois dénommé « pas d'enregistrement ») afin d'affiner la collecte des données climatiques selon les besoins. Un capteur saisit les données en continue ou à intervalles réguliers : le pas de mesures permet de moyenniser les valeurs prises dans un intervalle (*par exemple, pour un appareil captant une mesure climatique à un intervalle de chaque seconde, lui imposer un pas de mesure d'une heure revient à enregistrer la valeur moyenne de 3.600 valeurs puisque 60 mesures sont prises par minute*).

Il faut trouver un bon équilibre entre une **fréquence suffisamment régulière** pour disposer d'une bonne idée des variations climatiques, mais **pas trop intense** pour ne pas saturer la mémoire de l'appareil : un pas de mesure d'**une heure** est généralement le plus adapté.

De plus, une transmission en continue des données ou un pas de mesures trop fréquent sollicitent beaucoup **les batteries qui se déchargent** plus rapidement.

- Proposée en option, la programmation des **alertes** peut être conseillée, aussi bien pour le **contrôle des conditions climatiques** (franchissement de seuils thermo-hygrométriques prédéfinis) que pour la **gestion du système** (coupures de la transmission des données, panne de matériel, niveau de batterie – même si les alarmes de batterie sont généralement peu fiables). Ces alertes peuvent se manifester auprès des utilisateurs par des alarmes visuelles, sonores, par SMS ou par courriel.

III.3/ La consultation des mesures

- Les données peuvent être lues **directement sur l'écran d'affichage du capteur** (de façon individuelle, capteur par capteur) et/ou **indirectement sur un écran de terminal** (ordinateur, tablette, smartphone) qui réceptionne les données climatiques soit à l'aide d'un câble de déchargement, soit par ondes.
- Une lecture directe sur l'écran du capteur fournit une information ponctuelle : elle favorise une **surveillance** en salle ou en réserve (quotidienne ou hebdomadaire), **sensibilisant les gardiens de salle et les médiateurs** par cette occasion. Toutefois, elle ne permet pas de connaître les **variations climatiques**, au contraire d'une consultation indirecte qui repose sur l'enregistrement des données lisibles depuis un ordinateur équipé du logiciel *ad hoc* (facilitant l'élaboration de bilans climatiques). Cette consultation indirecte permet en outre de **comparer les conditions climatiques** de différents espaces.

Lecture directe sur écran d'affichage d'un capteur placé en sous-sol, sans courant électrique (phase de travaux)



- Idéalement, le **capteur enregistreur doit être doté d'un écran d'affichage** pour permettre à la fois une consultation directe (lecture sur l'écran) et une consultation indirecte (lecture sur l'ordinateur) afin de disposer d'une lecture des données climatiques en temps réel et ainsi d'être réactif en cas de désordre climatique.

III.4/ Le traitement des données collectées

Qu'il soit installé en monoposte, sur un serveur local ou accessible via un navigateur web, l'interface doit être **ergonomique** et **intuitive**, avec des fonctionnalités adaptées à l'utilisation de l'équipe de conservation, indiquées ci-après.

Visualisation des résultats

- En plus de la gestion des sauvegardes de données collectées sur un serveur, le logiciel doit pouvoir retranscrire automatiquement ces valeurs sous la forme de **courbes climatiques horodatées**, aisément lisibles et **superposables** pour comparer plusieurs espaces entre eux. D'autres graphiques peuvent être proposés, tels que des **histogrammes de répartition des valeurs** ou des **diagrammes circulaires relevant le pourcentage d'optimalité** (témoignant du respect simultané des consignes, à la fois pour les seuils de température et d'humidité relative).
- En outre, le logiciel doit permettre de **zoomer** sur une période précise du graphique et de remonter à une période antérieure à la date du jour, mais aussi de **naviguer avec le curseur** sur courbes pour obtenir une mesure précise à un instant.
- Il est également appréciable de matérialiser sur les graphiques les **seuils de température et d'humidité relative** à ne pas franchir, par un système de **cadre coloré**.
- En complément optionnel, certains logiciels proposent d'intégrer les **plans de l'établissement** afin de permettre de cartographier la localisation des capteurs : en cliquant sur l'icône du capteur disposé sur le plan, les courbes apparaissent.

Extraction des résultats

- Ce logiciel doit également permettre d'**exporter les données brutes** sous la forme d'un **fichier numérique** (ods, xls, csv ou txt) afin de pouvoir établir ultérieurement des études statistiques à l'aide de de l'application Cli-Matrice du C2RMF (<https://c2rmf.fr/le-climat>).
- Idéalement, il devrait être possible de choisir les **rubriques** à exporter et leur **ordonnancement** dans le fichier d'extraction, celui-ci les organisant en **colonnes distinctes** (plutôt qu'une colonne unique réunissant les informations). À défaut, le logiciel doit offrir la possibilité de « copier/coller » les données vers un tableur.
- Il doit par ailleurs pouvoir éditer un **rapport succinct imprimable**, intégrant un tableau synthétique qui récapitule pour les capteurs sélectionnés les valeurs thermohygrométriques minimales, maximales et moyennes, ainsi que leur écart type.

Vérification de la justesse d'un capteur à mesure ponctuelle et lecture directe à l'aide d'un second capteur portable neuf, pour déterminer la pertinence d'une opération de recalibration du premier capteur



IV/ Critères relatifs au coût

Une estimation du coût de l'installation doit être réfléchie à partir de trois séries de poste.

IV.1/ Le coût d'investissement

Il englobe l'achat de l'équipement (capteurs, concentrateur, relais) et de l'interface informatique (logiciel pour un serveur local, nombre de sessions).

IV.2/ Le coût d'exploitation

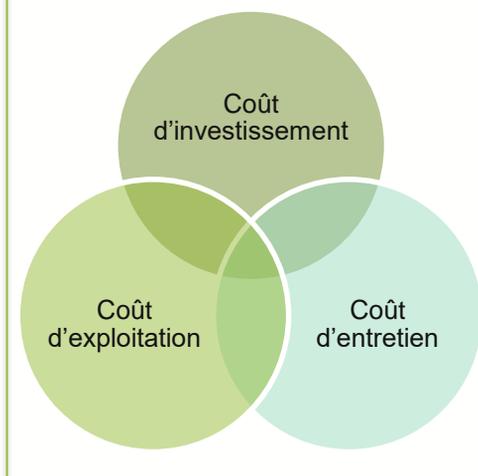
Il prend en compte les mises à jour du système (notamment du logiciel) et les abonnements éventuels (alarmes, télécommunication selon la nature du système, stockage des données sur le serveur privé Cloud du prestataire – maintenance, surveillance, rafraichissement des salles serveurs).

Dans le cas d'une sauvegarde sur le serveur local institutionnel, le coût annuel impute au service informatique car il relève de la maintenance du système informatique, tandis que pour un serveur hébergé, le coût de la prestation (mensualisé ou annualisé) incombe au service bénéficiaire, en l'occurrence celle en charge de la conservation.

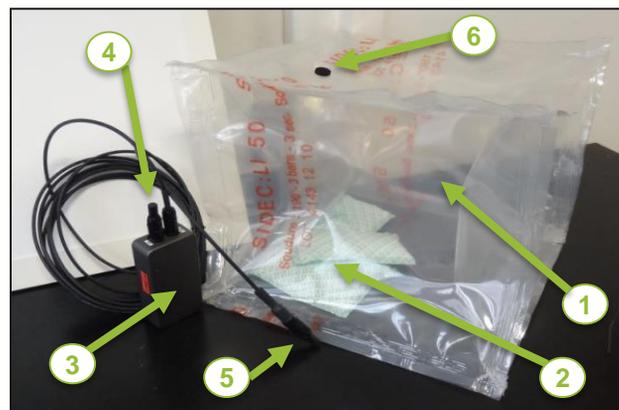
IV.3/ Le coût d'entretien

Il considère la recalibration des capteurs qui est parfois exclue du contrat d'entretien pouvant être souscrit. Le contrat d'entretien couvre le changement des piles ou le contrôle de la performance du système.

3 critères relatifs au coût



Capteur enregistreur à deux sondes pour l'étude de l'émission en vapeur d'eau par les absorbeurs d'oxygène dans une poche d'anoxie statique



1. Poche étanche
2. Absorbants d'oxygène
3. Boîtier du capteur climatique :
4. Sonde fixe mesurant l'ambiance climatique au sein de la pièce où se situe le boîtier
5. Sonde déportée s'insérant à l'intérieur de la poche
6. Septum pour l'entrée de la sonde déportée

L'acquisition de capteurs et de leur système d'exploitation doit être réfléchi. Selon leurs performances et leurs fonctionnalités, le suivi des conditions climatiques sera facilité pour l'équipe chargée de la conservation, aguerrie à l'étude des données climatiques.

Le système choisi doit permettre de connaître le climat, d'accompagner sa surveillance pour une meilleure réactivité en cas d'incident, de contrôler l'efficacité des solutions correctives mises en place (appareils de régulation pouvant être gérés par des sociétés externes) ou d'affiner les conditions imposées en cas de prêt.

Rédacteur, schémas

et crédit photographique :

Jocelyn Périllat-Mercerot

Relecteurs : Marie

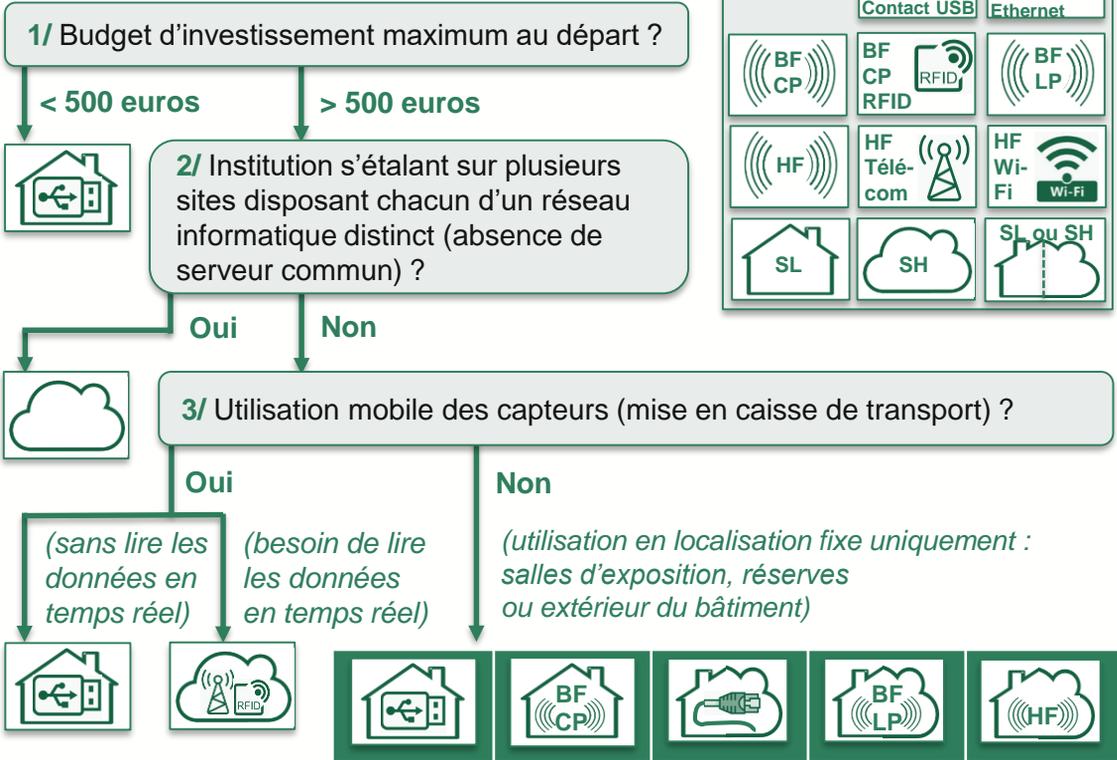
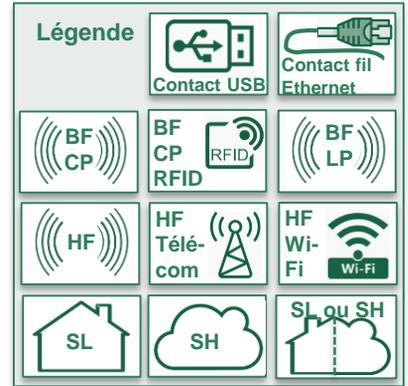
Courselaud, Juliette Rémy

C2RMF, 2023

Annexe – Arbre décisionnel pour le choix d'un système de consultation

Cet arbre permet d'orienter le choix le plus adapté d'un système de gestion climatique, selon les contraintes et l'usage. Cet arbre considère :

- la transmission des données manuelle par branchement du port **USB** / automatique par fil (**Ethernet**), par ondes basses fréquences de courte portée **BF-CP** (Bluetooth, NFC, RFID, etc.), par ondes basses fréquences de longue portée **BF-LP** (radio, Lo-Ra, etc.) ou par ondes hautes fréquences **HF** (Wi-Fi, télécommunication 2G à 5G) ;
- la consultation sur serveur local **SL** ou sur serveur hébergé **SH**.



	SL	BF CP	BF LP	HF
4/ Absence de connexion internet ou de Wi-Fi (ou interdiction de s'y raccorder) dans l'établissement ? Si oui →	+	+	++	++
5/ Présence d'interférences (murs épais, site étendu, éloignement des capteurs entre eux) ? Si oui →	+	+	++	+++
6/ Consultation des données sur tablettes ou sur smartphone ? Si oui →	⊘	⊘	Si serveur hébergé	Si serveur hébergé
7/ Nombre de capteurs enregistreurs envisagés	5 max		Possible dès 1 ; À privilégier si ≥ 5	