



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

RAPPORT

**PERFORMANCES DES PUITES
CLIMATIQUES**

SUIVIS INSTRUMENTÉS ET SIMULATIONS

AOÛT 2014

ÉDITO

Le Grenelle Environnement a fixé pour les bâtiments neufs et existants des objectifs ambitieux en matière d'économie et de production d'énergie. Le secteur du bâtiment est engagé dans une mutation de très grande ampleur qui l'oblige à une qualité de réalisation fondée sur de nouvelles règles de construction.

Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a pour mission, à la demande des Pouvoirs Publics, d'accompagner les quelque 370 000 entreprises et artisans du secteur du bâtiment et l'ensemble des acteurs de la filière dans la réalisation de ces objectifs.

Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF SUEZ (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation.

Le succès du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » repose sur un vaste effort de formation initiale et continue afin de renforcer la compétence des entreprises et artisans sur ces nouvelles techniques et ces nouvelles façons de faire. Dotées des outils nécessaires, les organisations professionnelles auront à cœur d'aider et d'inciter à la formation de tous.

Les professionnels ont besoin rapidement de ces outils et « règles du jeu » pour « réussir » le Grenelle Environnement.

Alain MAUGARD

Président du Comité de pilotage du Programme
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
Président de QUALIBAT



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

AVANT-PROPOS

Afin de répondre au besoin d'accompagnement des professionnels du bâtiment pour atteindre les objectifs ambitieux du Grenelle Environnement, le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a prévu d'élaborer les documents suivants :

Les Recommandations Professionnelles « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques de référence, préfigurant un avant-projet NF DTU, sur une solution technique clé améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur vocation est d'alimenter soit la révision d'un NF DTU aujourd'hui en vigueur, soit la rédaction d'un nouveau NF DTU. Ces nouveaux textes de référence seront reconnus par les assureurs dès leur approbation.

Les Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter.

Les Calepins de chantier « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des mémentos destinés aux personnels de chantier, qui illustrent les bonnes pratiques d'exécution et les dispositions essentielles des Recommandations Professionnelles et des Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 ».

Les Rapports « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » présentent les résultats soit d'une étude conduite dans le cadre du programme, soit d'essais réalisés pour mener à bien la rédaction de Recommandations Professionnelles ou de Guides.

Les Recommandations Pédagogiques « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents destinés à alimenter la révision des référentiels de formation continue et initiale. Elles se basent sur les éléments nouveaux et/ou essentiels contenus dans les Recommandations Professionnelles ou Guides produits par le programme.

L'ensemble des productions du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » est mis gratuitement à disposition des acteurs de la filière sur le site Internet du programme : <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr>



Sommaire

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 5 |
| 1 - SUIVIS INSTRUMENTÉS DE TROIS INSTALLATIONS | 6 |
| 1.1. • Caractéristiques techniques des installations étudiées..... | 6 |
| 1.2. • Instrumentation | 7 |
| 1.3. • Performances du puits climatique en période hivernale | 8 |
| 1.3.1. • Installation tertiaire (EHPAD) | 8 |
| 1.3.2. • Installation tertiaire (centre communal) | 9 |
| 1.4. • Performances du puits climatique en période estivale..... | 10 |
| 1.4.1. • Installation tertiaire (EHPAD) | 10 |
| 1.4.2. • Installation tertiaire (centre communal)..... | 12 |
| 1.5. • Enseignements des suivis | 14 |
| 1.5.1. • Incidence d'un arrêt de l'installation aéraulique sur les performances du puits climatique..... | 14 |
| 1.5.2. • Bypass du puits climatique | 14 |
| 1.5.3. • Conception de l'installation aéraulique raccordée au puits climatique .. | 19 |
| 1.6. • Synthèse des suivis..... | 20 |
| 2 - INFLUENCE DE PARAMÈTRES SUR LA PERFORMANCE D'UN Puits CLIMATIQUE | 22 |
| 2.1. • Zone géographique..... | 23 |
| 2.2. • Nature du sol..... | 24 |
| 2.3. • Conductivité thermique du tube..... | 24 |
| 2.4. • Longueur du tube | 25 |
| 2.5. • Profondeur d'enfouissement du tube | 26 |
| 3 - BYPASS DU Puits CLIMATIQUE | 28 |
| 3.1. • Hypothèses de calcul | 29 |
| 3.2. • Fonctionnement continu ou fonctionnement avec bypass | 29 |
| 3.2.1. • Période de chauffage | 29 |
| 3.2.2. • Période de non chauffage | 31 |
| 3.3. • Étanchéité du registre de bypass du puits..... | 32 |
| 3.4. • Couplage du puits climatique avec une centrale de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur..... | 33 |
| 3.5. • Synthèse | 34 |

INTRODUCTION



La technique du puits climatique s'est développée ces dernières années. Paradoxalement, le retour d'expériences sur ces systèmes est encore faible. Certains points techniques restent peu documentés et diverses interrogations peuvent persister concernant par exemple :

- l'impact de paramètres sur les performances du puits climatique ;
- la pertinence à bypasser un puits.

La démarche adoptée dans cette étude pour apporter des éléments de réponse à ces questions a consisté à mener deux actions complémentaires :

- des suivis instrumentés sur trois installations de puits climatiques ;
- des simulations permettant d'étudier différentes configurations du puits et de son environnement en vue de dégager les paramètres clés et leur influence.

Cette synthèse présente les principaux résultats de ces études expérimentales et numériques.

Cette étude a été réalisée par le COSTIC (Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques).



SUIVIS INSTRUMENTÉS DE TROIS INSTALLATIONS

1



1.1. • Caractéristiques techniques des installations étudiées

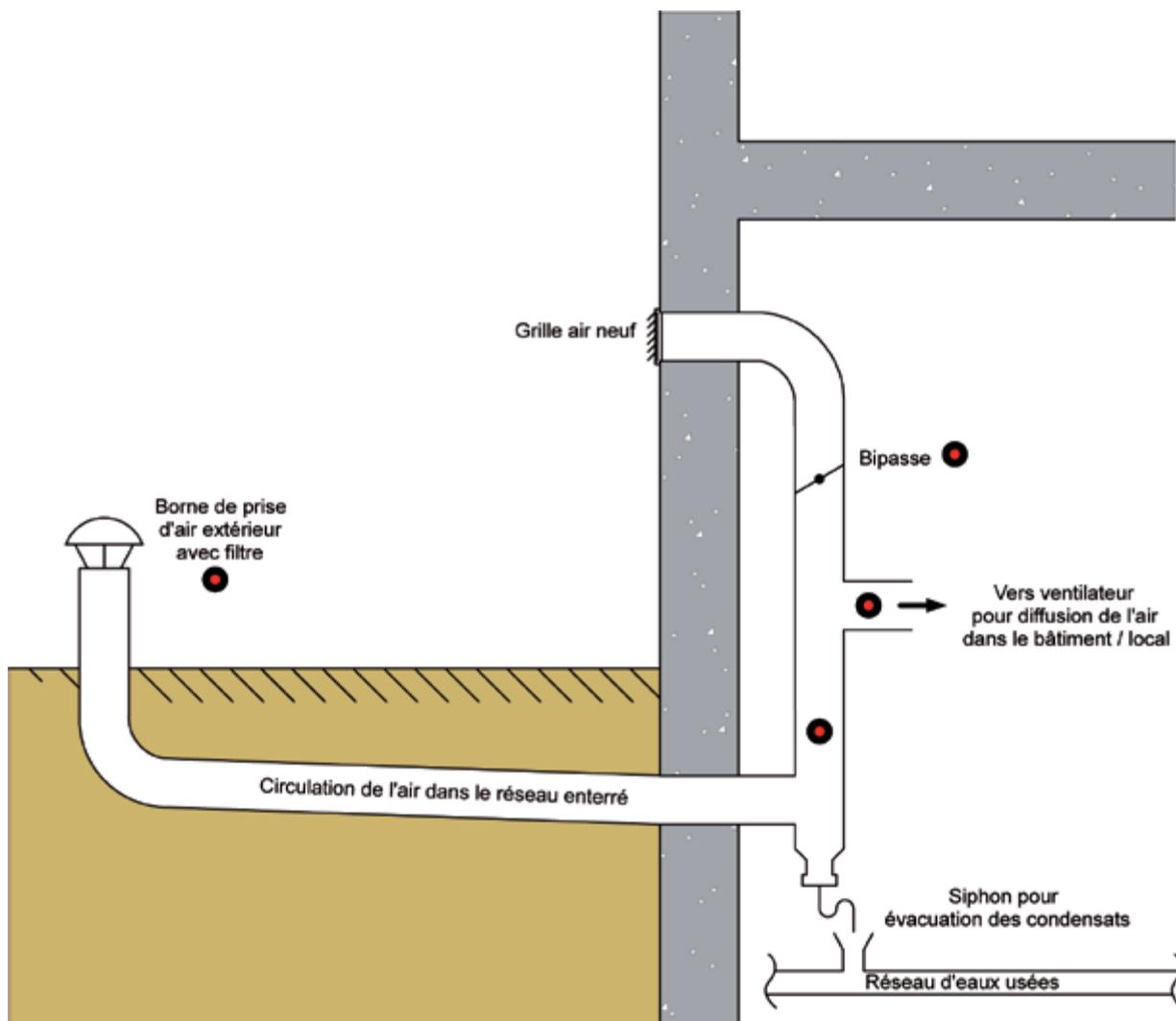
Trois installations de puits climatiques sont étudiées. Les principales caractéristiques de ces installations sont synthétisées à la (Figure 1).

| | Installation N°1 | Installation N°2 | Installation N°3 |
|--|---|---|---|
| Type de bâtiment | Tertiaire (EHPAD) | Résidentiel | Tertiaire (Centre communal) |
| Département | 50 | 13 | 64 |
| Débit d'air véhiculé dans le puits (m ³ /h) | 1500 | 160 (variable selon la vitesse du ventilateur) | 3530 |
| Configuration du puits climatique | Réseau « Boucle de Tichelmann » (6 tubes sur un seul niveau) | Réseau monotube | Réseau « Boucle de Tichelmann » (8 tubes sur un seul niveau) |
| Nature des tubes | Synthétique | Synthétique | Synthétique |
| Longueur des tubes (m) | 50 m/tube | 70 m | 36 m/tube |
| Diamètre intérieur des tubes (m) | 0,174 | 0,174 | 0,253 |
| Dispositif de bypass du puits climatique | Oui, entre 15 et 22°C de température extérieure | Oui, entre 12 et 21°C de température extérieure | Oui (absence de données complémentaires) |
| Couplage du puits avec un équipement technique | Couplage avec deux centrales de traitement d'air identiques composées d'un récupérateur de chaleur et d'une batterie chaude | Couplage avec un caisson de ventilation double flux avec récupérateur statique de chaleur | Couplage avec une centrale de traitement d'air composée d'un récupérateur de chaleur et d'une batterie chaude |

▲ Figure 1 : Caractéristiques principales des trois installations de puits climatiques étudiées

1.2. • Instrumentation

Le suivi expérimental des trois installations de puits climatiques est basé sur des mesures ponctuelles ou continues. Les paramètres mesurés pour caractériser les performances techniques du puits climatique sont présentés sur les (Figure 2) et (Figure 3).



▲ Figure 2 : Représentation schématique d'un puits climatique et de son raccordement à des éléments connexes avec repérage des points de mesure

Les périodes de suivi sont :

- de 5 mois, entre juillet et novembre 2013, pour l'installation N°1 ;
- de 10 jours en novembre 2013 pour l'installation N°2 ;
- de deux fois 1 mois, en août 2012 et en décembre 2012, pour l'installation N°3.

Les performances du puits climatique sont définies à partir des mesures de débit d'air véhiculé et de l'écart de température entre l'air extérieur et l'air en sortie de puits. Les gains énergétiques sont estimés à partir de ces valeurs et pour un temps de fonctionnement donné du système.



| Paramètres mesurés (en continu ou ponctuellement selon les installations, les accessibilités) | Localisation | Objectifs |
|--|---|---|
| Température d'air | Air extérieur à proximité de la prise d'air du puits | |
| | Air en sortie de puits | Analyser les performances thermiques liées au puits climatique. |
| | Air en amont de la centrale de ventilation ou de traitement d'air | Analyser le fonctionnement du bypass. Analyser l'étanchéité du registre assurant le bypass. |
| | Air soufflé dans local (en aval de la centrale de traitement d'air) | |
| | Air ambiant | Évaluer le confort intérieur. |
| Débit d'air (ou vitesse d'air) | Air en sortie de puits | Connaître le débit traité par le puits climatique. Une mesure ponctuelle est considérée suffisante en présence d'un ventilateur à vitesse constante. |
| | Air en amont ou en aval de la centrale de traitement d'air | Connaître la répartition des débits entre le débit transitant par le puits climatique et le débit d'air provenant de la prise d'air extérieur directe. Connaître le débit d'air total circulant dans la centrale de traitement d'air. |
| Consommation électrique du ventilateur | | Quantifier la consommation électrique du ventilateur dédié au puits climatique. |
| Bypass (puits climatique / air extérieur) | | Analyser la logique de régulation. Définir les périodes de bypass et de non bypass du puits climatique. |

▲ Figure 3 : Ensemble des paramètres mesurés

1.3. • Performances du puits climatique en période hivernale

En période hivernale, les gains énergétiques donnés correspondent à l'énergie utile, c'est-à-dire à l'énergie effectivement utilisée pour assurer le préchauffage. L'énergie fournie pour un refroidissement non désiré de l'air extérieur par le puits n'est pas considérée.

Les installations N°1 et 3 sont traitées dans ce chapitre.

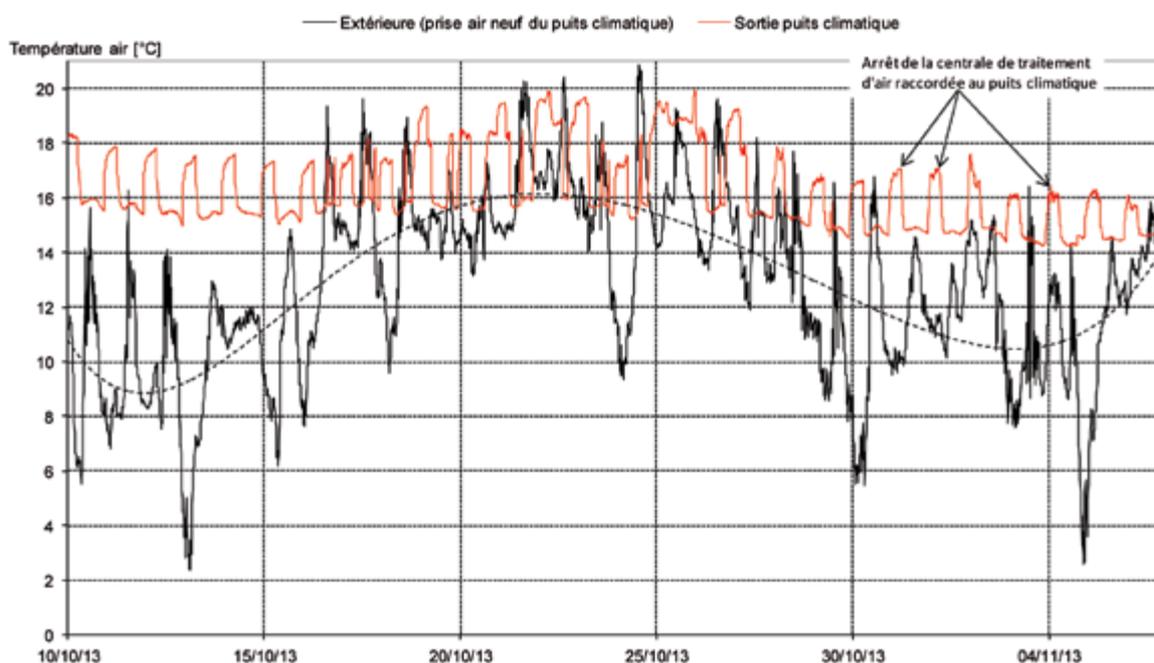
1.3.1. • Installation tertiaire (EHPAD)

L'installation N°1 présente un fonctionnement de 15h/jour avec une période d'arrêt, entre 22h et 7h. Pendant ces périodes d'arrêt, la température d'air en sortie de puits augmente rapidement en raison de l'absence de circulation d'air (Figure 4).

Pendant la période de fonctionnement de la centrale de traitement d'air, la température mesurée en sortie du puits climatique est

constante, de l'ordre de 15°C à ± 1 . Cette température est relativement importante ce qui est bénéfique en période hivernale où le puits climatique est destiné au préchauffage. Durant la même période, la température d'air extérieur présente une amplitude plus importante et varie entre 2,5 et 20,5°C. Le profil de la température en sortie de puits ne suit pas le profil de la température d'air extérieur ce qui montre un fonctionnement correct du système.

L'énergie apportée dans ces conditions est de 490 kWh pour une période de 1 mois avec un fonctionnement de 15h/jour (soit une puissance moyenne d'environ 1100 W). À titre informatif, la consommation électrique totale des deux ventilateurs assurant la circulation de l'air dans le puits climatique s'élève à 440 kWh pour la même période de fonctionnement.



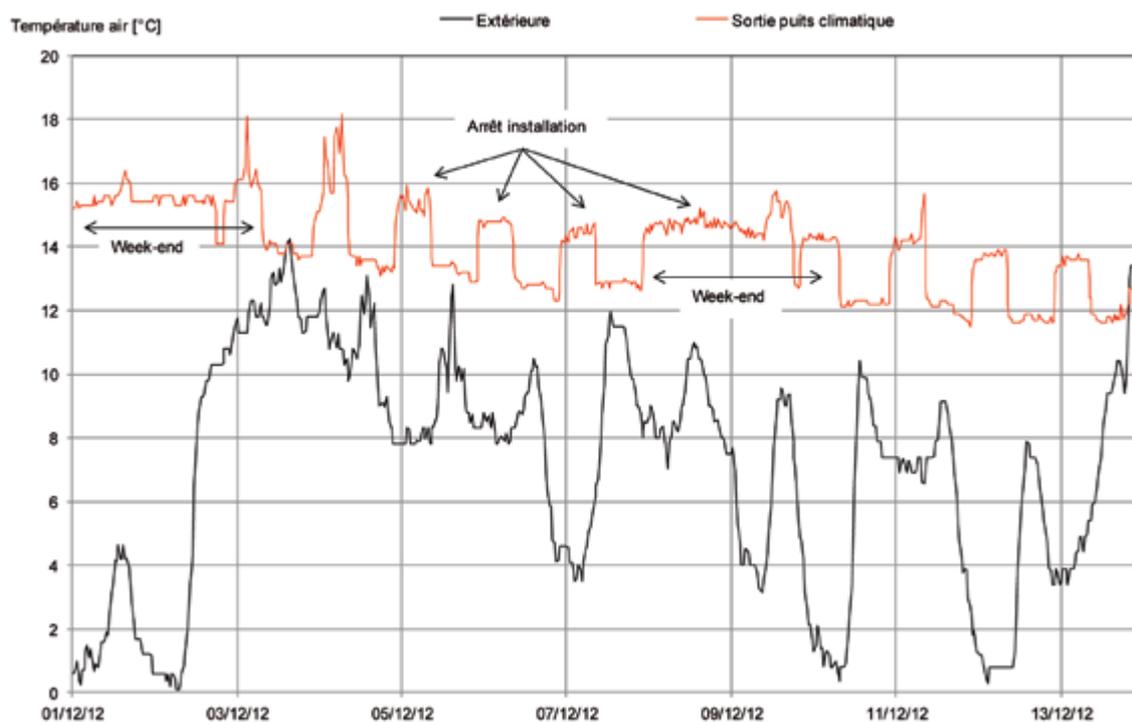
▲ Figure 4 : Évolution des températures d'air extérieur et de sortie de puits climatique entre octobre et novembre (installation N°1)

1.3.2. • Installation tertiaire (centre communal)

L'installation N°3 se caractérise par un arrêt de la centrale de traitement en période nocturne et le week-end comme illustré sur la (Figure 5). Pendant le fonctionnement de la centrale, la température mesurée en sortie de puits varie peu, entre 12 et 14°C. Sur la période complète, la variation de la température extérieure est beaucoup plus fluctuante puisque comprise entre 0,5 et 14°C.

La température d'air en sortie de puits est largement positive. L'écart de température entre la sortie du puits et la température extérieure est de 11 K maximum. En moyenne, la température de sortie de puits est supérieure de 5°C à la température extérieure.

L'énergie apportée par le puits climatique de l'installation N°3 est de 510 kWh pour une période de 8,5 jours de décembre avec un fonctionnement de 13h/jour (soit une puissance moyenne d'environ 4600 W).



▲ Figure 5 : Évolution des températures d'air extérieur et en sortie de puits climatique en décembre (installation N°3)

1.4. • Performances du puits climatique en période estivale

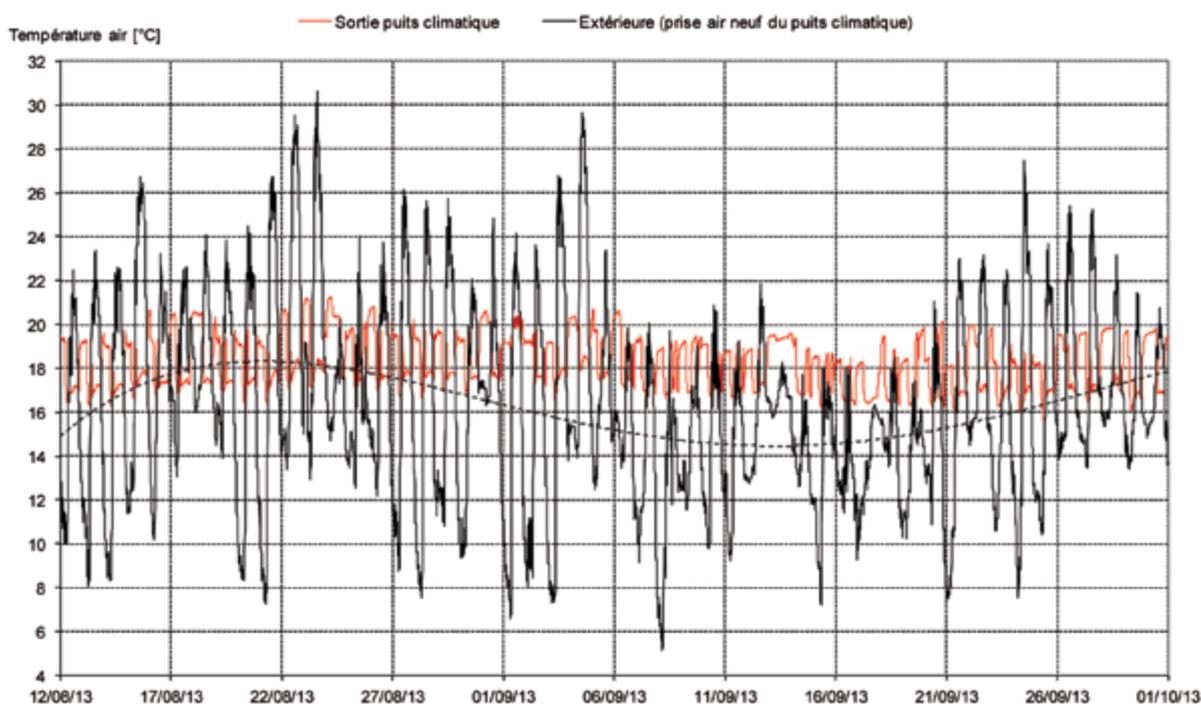
En période estivale, les performances du puits sont estimées à partir des écarts de température et d'humidité relative entre l'air extérieur et l'air en sortie de puits.

L'influence du puits sur le confort d'été est caractérisée par un nombre d'heures d'inconfort correspondant au nombre d'heures où la température intérieure est supérieure à 26°C.

Les installations N°1 et 3 sont traitées dans ce chapitre.

1.4.1. • Installation tertiaire (EHPAD)

La température mesurée en sortie de puits climatique, pendant le fonctionnement de la centrale aéraulique, est située entre 16 et 18°C. La température extérieure varie entre 6 et 30°C (Figure 6). La température d'air en sortie de puits est fortement atténuée par rapport aux variations observées sur la température extérieure.



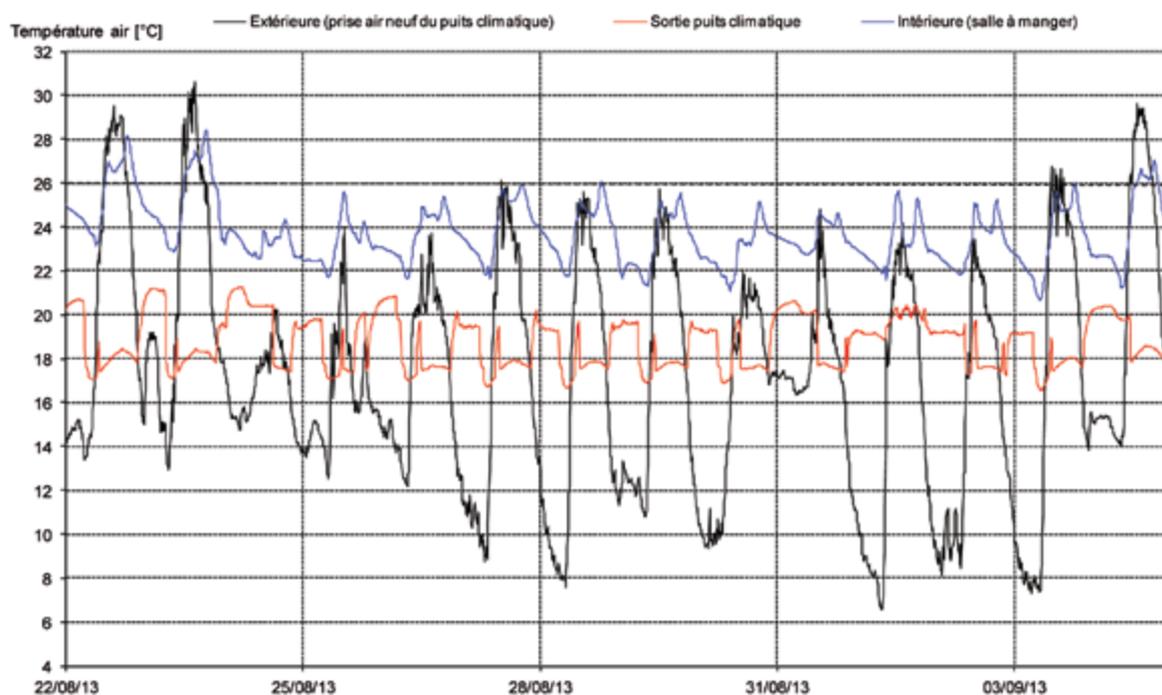
▲ Figure 6 : Évolution des températures d'air extérieur et de sortie du puits climatique en période estivale (installation N°1)

Les deux semaines de mesure illustrées sur la (Figure 7) montrent :

- une évolution de la température extérieure entre 7 et 30°C ;
- une température de sortie de puits entre 17 et 18°C pendant le fonctionnement de la centrale ;
- une température intérieure comprise entre 21 et 28°C.

Sur ces deux semaines de mesure, la température intérieure est supérieure à 26°C pendant 7% du temps (Figure 7).

Sur la période de deux mois, entre août et septembre, un phénomène de condensation a pu se produire. Il est déduit des mesures de température et humidité relative en extérieur et en sortie de puits climatique. Il est considéré un phénomène de condensation dès lors que l'humidité spécifique en sortie de puits est inférieure à l'humidité spécifique en extérieur. À partir de ces données et en considérant un débit d'air constant de 1500 m³/h, la quantité de condensats est estimée à 120 litres pour les deux mois.



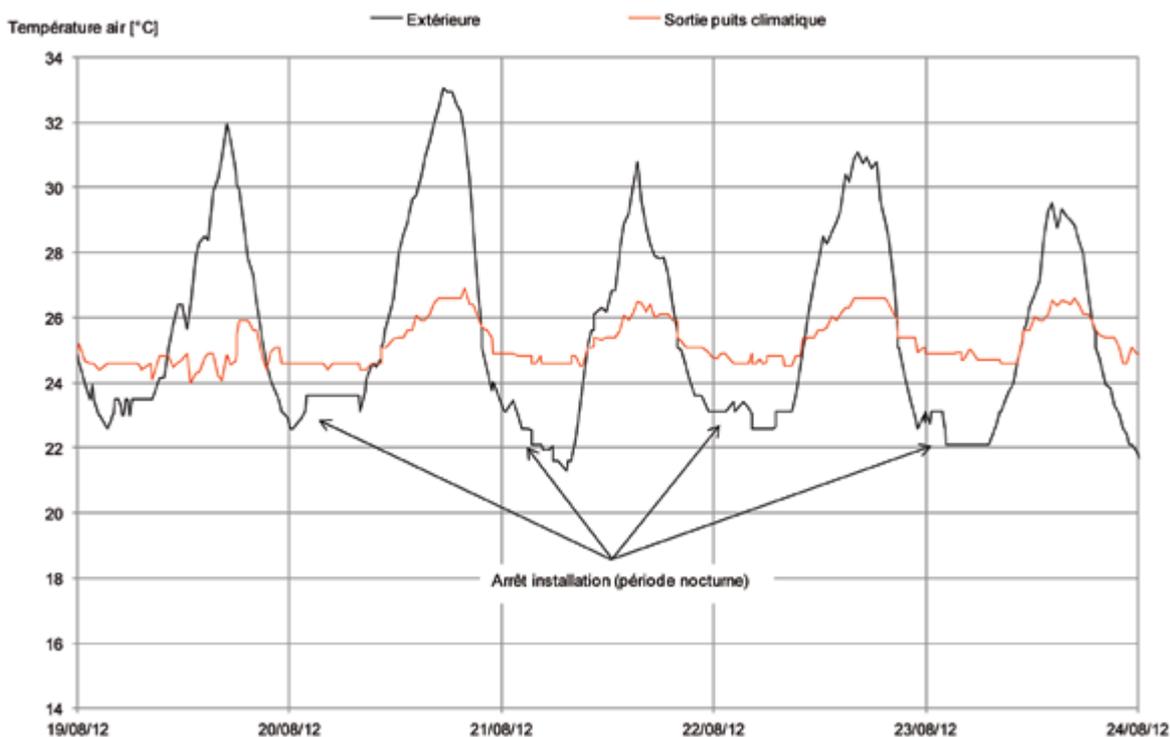
▲ Figure 7 : Évolution des températures d'air sur une période estivale de deux semaines (installation N°1)

1.4.2. • Installation tertiaire (centre communal)

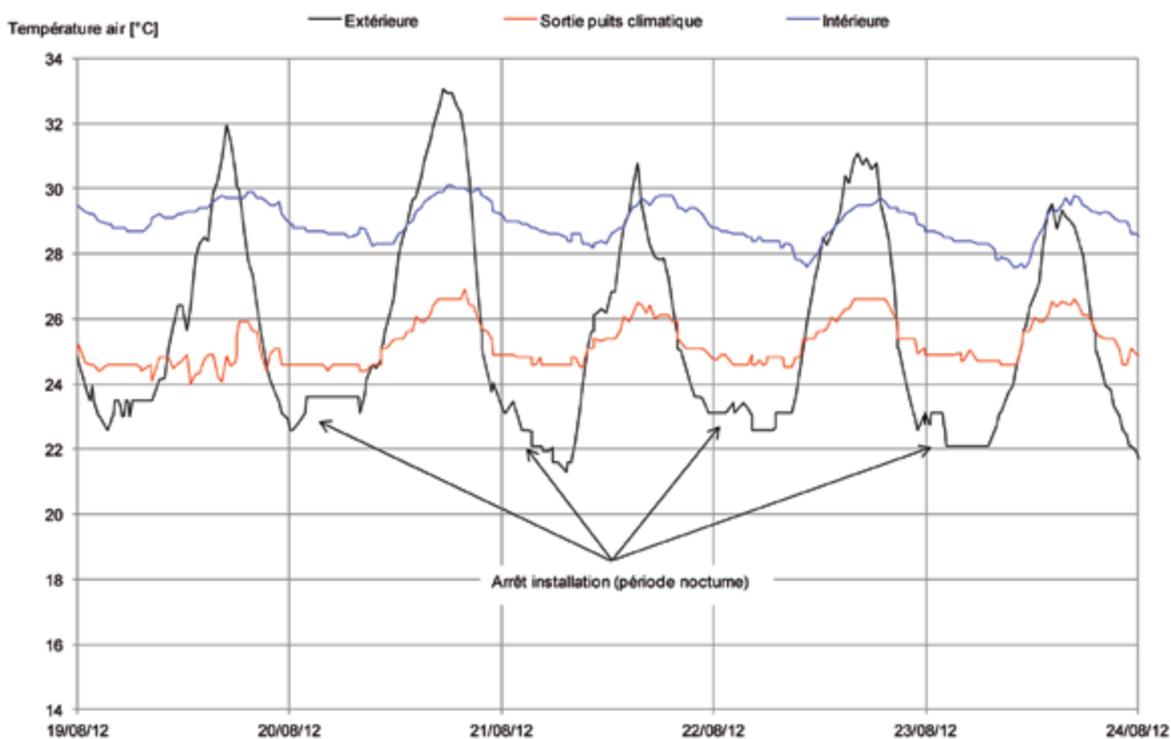
Les évolutions de température pour l'installation N°3 sont représentées sur la (Figure 8).

En période diurne, la température d'air extérieur est supérieure à 30°C avec un maximum enregistré à 33°C. Dans le même temps, la température en sortie de puits varie de 25 à 26°C. L'écart de température entre l'extérieur et la sortie du puits climatique est compris entre 3 et 7 K.

La température intérieure mesurée est importante, entre 28 et 30°C sur la période illustrée en (Figure 9). Il est ainsi noté une faible amplitude de la température intérieure entre la journée et la nuit, de l'ordre de 2°C. La température intérieure nocturne ne baisse pas suffisamment pour assurer en journée un confort intérieur satisfaisant. Ceci est lié en partie à l'arrêt de la centrale de traitement d'air. Une meilleure gestion des flux d'air est indispensable pour assurer un confort thermique satisfaisant. Il s'agit d'assurer une surventilation nocturne pour rafraîchir le bâtiment avant le matin et ce, avec ou sans recours au puits climatique.



▲ Figure 8 : Évolution des températures d'air en extérieur et en sortie de puits climatique (installation N°3 – période estivale)



▲ Figure 9 : Évolution des températures sur une période d'été (installation N°3)



1.5. • Enseignements des suivis

1.5.1. • Incidence d'un arrêt de l'installation aéraulique sur les performances du puits climatique

En tertiaire, une installation aéraulique peut être arrêtée pendant les périodes d'inoccupation des locaux conformément à l'article 64.1 du RSDT (Circulaire du 9 août 1978 modifiée). Cette disposition est rencontrée dans les deux installations tertiaires étudiées. Les installations sont arrêtées environ 40% du temps, pendant la période nocturne.

Pour rappel, l'énergie apportée par le puits sur l'installation N°1 est de 490 kWh pour une période de 1 mois avec un fonctionnement de 15h/jour. Il est supérieur de 12% à la consommation électrique des deux ventilateurs.

Si l'installation avait fonctionné en continu pendant 1 mois, en considérant une température de sortie de puits de 15°C, l'énergie apportée par le puits aurait été de 1000 kWh pour une consommation électrique des ventilateurs de 700 kWh. Ces données sont reprises en (Figure 10).

L'arrêt de l'installation réduit l'énergie apportée par le puits de 50%.

| Période de mesure : 10 octobre au 7 novembre (29 jours) | Consommation électrique des ventilateurs (kWh) | Energie apportée par le puits climatique (kWh) |
|--|--|--|
| Fonctionnement CTA 15h/jour (arrêt entre 22h et 7h) Fonctionnement réel | 440 | 490 |
| Fonctionnement continu (24h/jour) Fonctionnement estimé | 700 | 1000 |

▲ Figure 10 : Récapitulatif des gains et consommations obtenus selon le fonctionnement de la centrale de traitement d'air

A retenir

Une installation aéraulique arrêtée pendant la période nocturne, période où la température extérieure est très inférieure à la température de sortie de puits, réduit le potentiel du puits climatique et donc son intérêt.

Les applications avec un fonctionnement continu de l'installation aéraulique (avec ou sans réduit) sont celles pour lesquelles le puits climatique présente les meilleures performances.

1.5.2. • Bypass du puits climatique

Lorsque la température en sortie de puits risque d'entraîner un rafraîchissement ou un préchauffage non désiré dans le bâtiment, le puits climatique est bypassé. Dans ce cas, l'air est prélevé directement à l'extérieur. Les suivis instrumentés mettent en exergue divers dysfonctionnements du bypass.

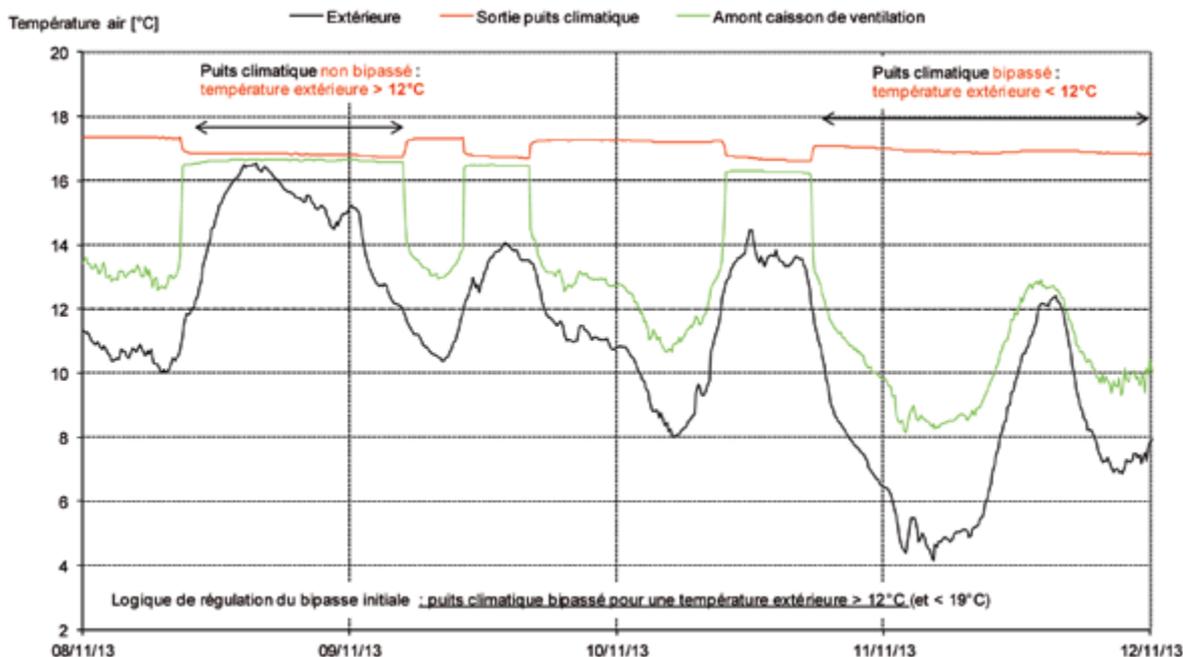
Logique de régulation du bypass

La plage de température sur laquelle le puits climatique est bypassé est adaptée à la configuration du bâtiment ainsi qu'aux apports internes et externes. Elle est variable selon les configurations comme suit :

- installation N°1 : bypass du puits entre 15 et 22°C de température extérieure ;
- installation N°2 : bypass du puits entre 12 et 21°C de température extérieure.

Les logiques de régulation annoncées sont généralement respectées.

Toutefois, une seconde série de mesures réalisée sur l'installation N°2 a montré une gestion inversée du bypass. En période hivernale, ce problème se caractérise par le bypass du puits climatique alors que la température en sortie de celui-ci est supérieure à la température extérieure et permettrait d'assurer une fonction de préchauffage. La (Figure 11) met en évidence le bypass du puits lorsque la température extérieure est inférieure à 12°C. Dans ces conditions, l'air neuf entrant dans la centrale de ventilation provient directement de l'extérieur alors que la température en sortie de puits est mesurée entre 16 et 17°C. Ce problème de régulation du bypass annihile les performances thermiques du puits.



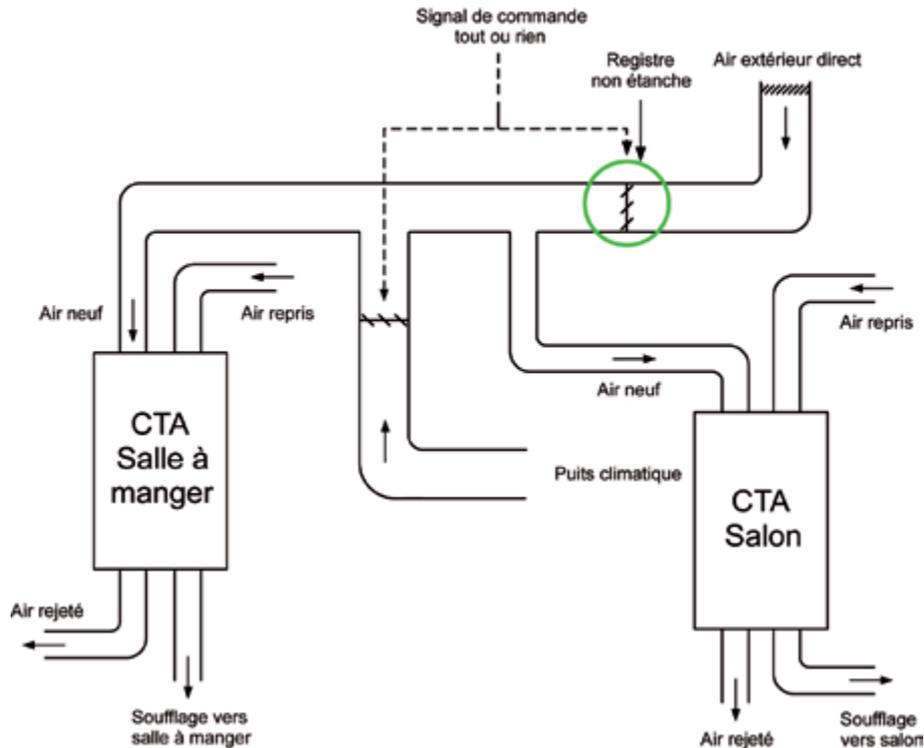
▲ Figure 11 : Inversion de la logique de régulation

Étanchéité du registre assurant le bypass

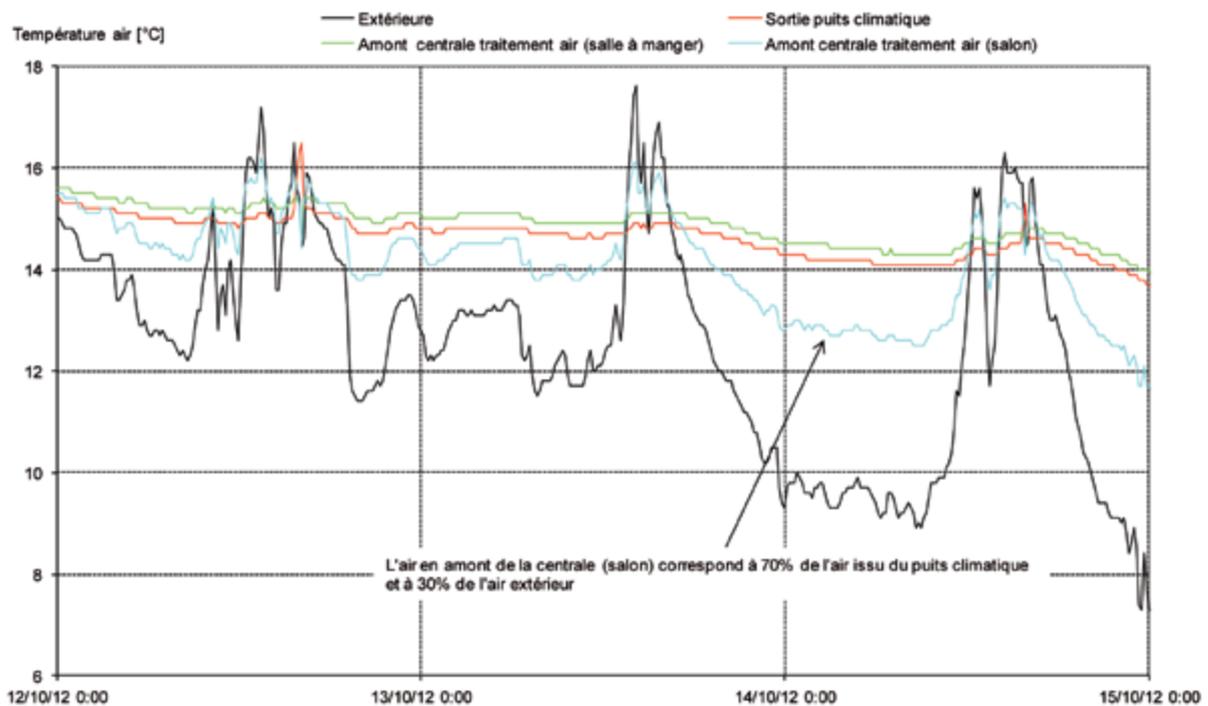
Lorsque le puits climatique n'est pas bypassé, il est essentiel que la totalité du débit d'air transite dans le puits climatique afin de profiter au mieux des conditions du puits. Dans le cas contraire, les performances thermiques sont réduites.



L'absence d'étanchéité du registre observée sur l'installation N°1 implique une « dégradation » de la température en amont de la centrale de traitement d'air dédiée au salon. Au vu des évolutions de températures, la température en amont de la centrale du salon est un mélange de 30% d'air extérieur et de 70% d'air provenant du puits (Figure 13). La température en entrée de centrale est donc plus basse que celle en sortie de puits ce qui réduit l'énergie récupérée par celui-ci.



▲ Figure 12 : Représentation des réseaux aérauliques de l'installation N°1



▲ Figure 13 : Évolution des températures d'air en période de non bipasse du puits climatique

Incidence du bipasse sur la perte de charge du réseau

La perte de charge du réseau aéraulique en amont de la centrale de traitement est différente selon que le puits climatique soit bypassé ou non. Une modification de la perte de charge du réseau entraîne une modification du point de fonctionnement du système. La (Figure 14) illustre ce cas pour l'installation N°2 avec une variation du débit comme suit :

- débit total insufflé de 155 m³/h lorsque l'air transite par le puits climatique ;
- débit total insufflé de 195 m³/h lorsque l'air ne transite pas par le puits climatique.

Le débit d'air insufflé dans le bâtiment est ainsi augmenté de 26% lorsque le puits climatique est bypassé.



▲ Figure 14 : Incidence du bipasse sur le débit d'air total insufflé

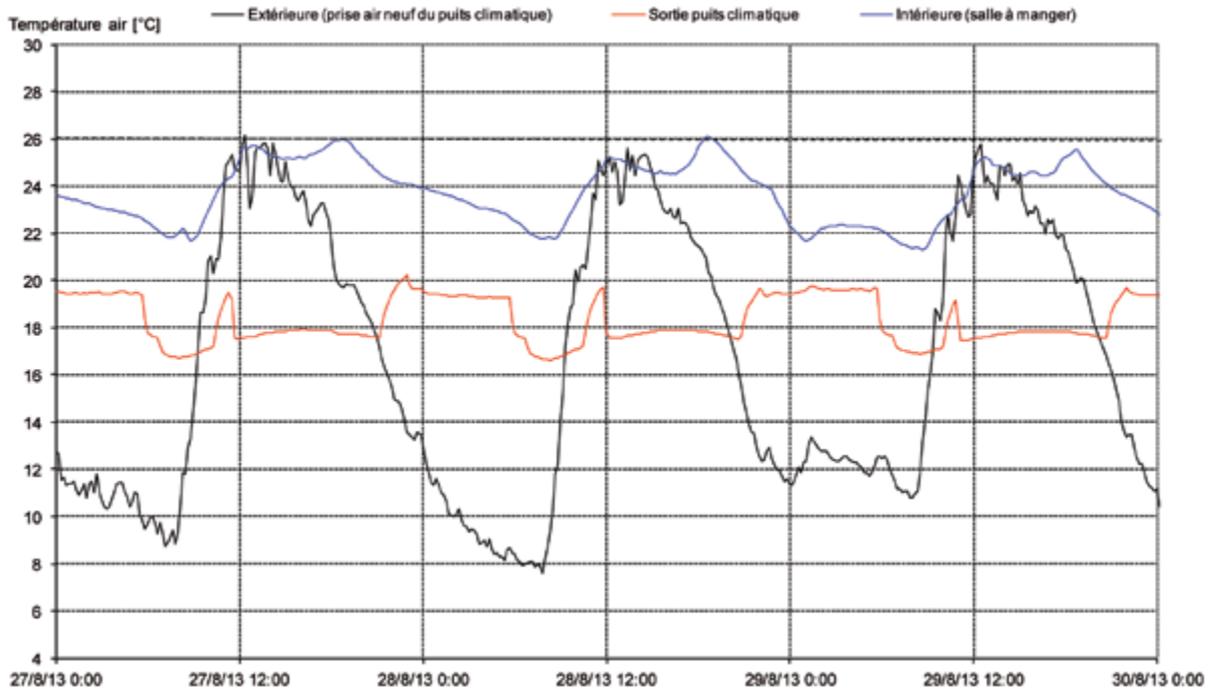
Incidence du bipasse sur l'inconfort thermique

Les (Figure 15) et (Figure 16) représentent l'évolution des températures intérieures respectivement en période de fonctionnement du puits climatique et en période de bipasse du puits pour l'installation N°1. Sur ces deux séquences d'août 2013, la température intérieure ne descend pas en dessous de 21°C. Lorsque le puits climatique n'est pas bypassé, la température intérieure maximale est inférieure à 26°C, pour des valeurs de température extérieure comprises entre 24 et 26°C (Figure 15). En revanche, lorsque le puits climatique est bypassé, la température intérieure excède 26°C, pour des valeurs similaires de température extérieure entre 24 et 26°C (Figure 16).

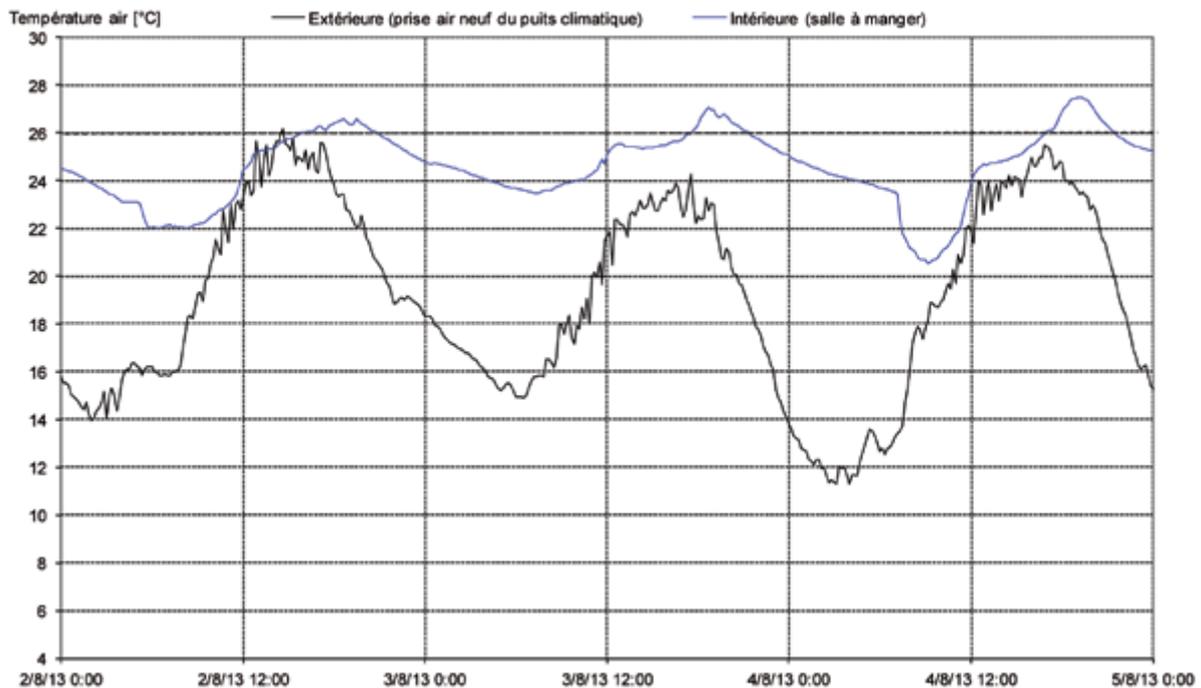


A retenir

Faire transiter l'air par le puits climatique en période estivale peut contribuer à améliorer le confort thermique intérieur en réduisant la fréquence d'apparition de température intérieure supérieure à 26°C.



▲ Figure 15 : Évolution des températures lors du fonctionnement du puits climatique (période estivale – installation N°1)



▲ Figure 16 : Évolution des températures lors du bipasse du puits climatique (période estivale – installation N°1)

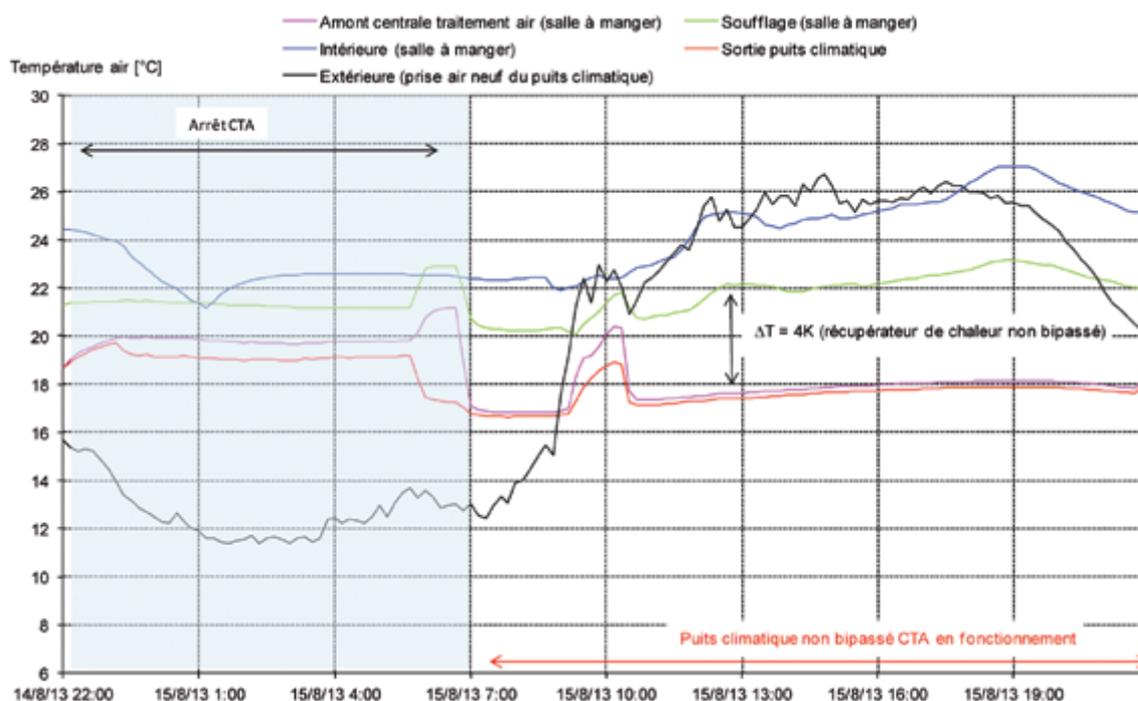
1.5.3. • Conception de l'installation aéraulique raccordée au puits climatique

Le puits climatique est généralement raccordé à une centrale de traitement d'air équipée ou non d'un récupérateur de chaleur statique.

En période estivale, le récupérateur de chaleur doit être bypassé afin d'éviter le transfert d'énergie entre l'air extrait du bâtiment et l'air entrant.

Pour l'installation N°1, la (Figure 17) met en évidence l'absence de bypass du récupérateur de chaleur entraînant une augmentation de la température de soufflage de 4 K : l'air est insufflé dans le bâtiment à une température de 22°C au lieu de 18°C (température mesurée en sortie de puits).

Le potentiel de rafraîchissement du puits climatique existe mais est diminué par la récupération de chaleur au niveau de la centrale de traitement d'air.



▲ Figure 17 : Évolution des températures en période estivale (installation N°1)

A retenir

La performance thermique du puits climatique peut être sous-évaluée par un défaut de fonctionnement de l'installation aéraulique qu'il alimente.



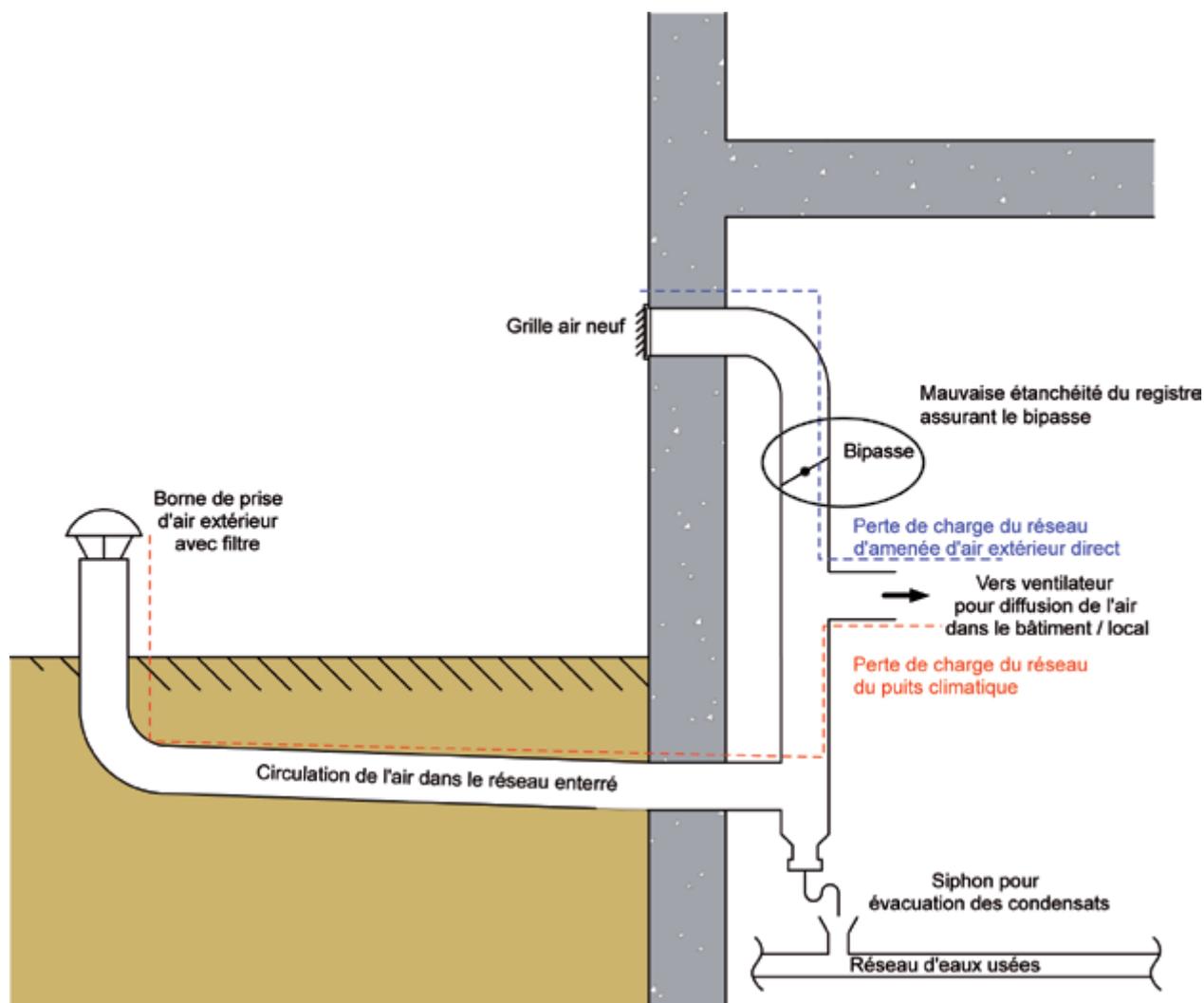
1.6. • Synthèse des suivis

Pour les trois installations, les suivis montrent une évolution de la température d'air en sortie de puits climatique conforme aux attentes. Indépendamment de la période de l'année, la température d'air mesurée en sortie de puits est stable à $\pm 1^\circ\text{C}$ près. Le profil de température en sortie de puits est très différent du profil de température extérieure ce qui traduit un fonctionnement correct du puits.

Malgré ce bon fonctionnement, les performances énergétiques obtenues sont inférieures à la capacité réelle du puits car l'installation aéraulique est arrêtée 40% du temps. Les périodes d'arrêt correspondent aux périodes nocturnes, périodes où le potentiel du puits climatique est le plus important, notamment en hiver. De ce fait, l'arrêt du système de ventilation entraîne une diminution du gain énergétique apporté par le puits jusqu'à 50% par rapport à un fonctionnement continu.

À cela s'ajoute un fonctionnement non optimal du puits climatique. Pour optimiser ses performances, il est généralement mis en place un bipasse du puits climatique sur une plage de température extérieure prédéfinie. Le bipasse est obtenu à partir d'un registre installé sur le réseau d'amenée d'air extérieur direct. Théoriquement, cela permet de s'affranchir de tout rafraîchissement non désiré du bâtiment en court-circuitant ou non le puits climatique selon les températures de sortie de puits et d'air extérieur. Or, paradoxalement, ce bipasse peut accentuer l'inconfort et réduire les performances du puits climatique. C'est ce que les suivis ont mis en exergue avec les problèmes suivants (Figure 18) :

- une logique de régulation inversée : en période hivernale, le puits climatique est bypassé alors que la température en sortie de puits est égale à 16°C et que la température extérieure varie entre 4 et 12°C ;
- une mauvaise étanchéité du registre ne permettant pas le bipasse total du réseau d'amenée d'air extérieur direct ;
- une modification de la perte de charge du réseau en amont de la centrale aéraulique impliquant une modification du point de fonctionnement du système avec, selon les cas, une réduction de près de 30% du débit d'air véhiculé.



▲ Figure 18 : Représentation du puits climatique et des problématiques liées au bypass



INFLUENCE DE PARAMETRES SUR LA PERFORMANCE D'UN PUIITS CLIMATIQUE

2



Plusieurs paramètres peuvent avoir une influence sur la performance d'un puits climatique. Une distinction est à faire entre les paramètres « fixes » liés aux caractéristiques du terrain et les paramètres variables liés aux caractéristiques du puits climatique.

Dans le cadre de la Réglementation Thermique RT2012, un modèle stationnaire monodimensionnel issu de la norme NF EN 15241 est utilisé pour évaluer les performances d'un puits climatique. Les formules décrivant ce modèle ont été utilisées afin d'effectuer une étude de sensibilité des principaux paramètres.

Cette étude paramétrique concerne uniquement le puits climatique. Aucune considération n'est faite sur le bâtiment.

Les caractéristiques retenues pour le puits climatique sont :

- longueur de tube de 50 m ;
- diamètre intérieur du tube de 0,186 m ;
- conductivité du tube de 0,28 W/m.K ;
- débit d'air véhiculé dans le tube de 150 m³/h.

L'étude paramétrique vise à évaluer l'incidence des paramètres suivants sur les performances attendues du puits :

- zone géographique ;
- nature du sol ;
- conductivité thermique du tube ;
- profondeur d'enfouissement du tube ;
- longueur du tube.



Les valeurs obtenues dans cette étude sont des ordres de grandeurs à considérer par comparaison et non pas comme des résultats absolus.

2.1. • Zone géographique

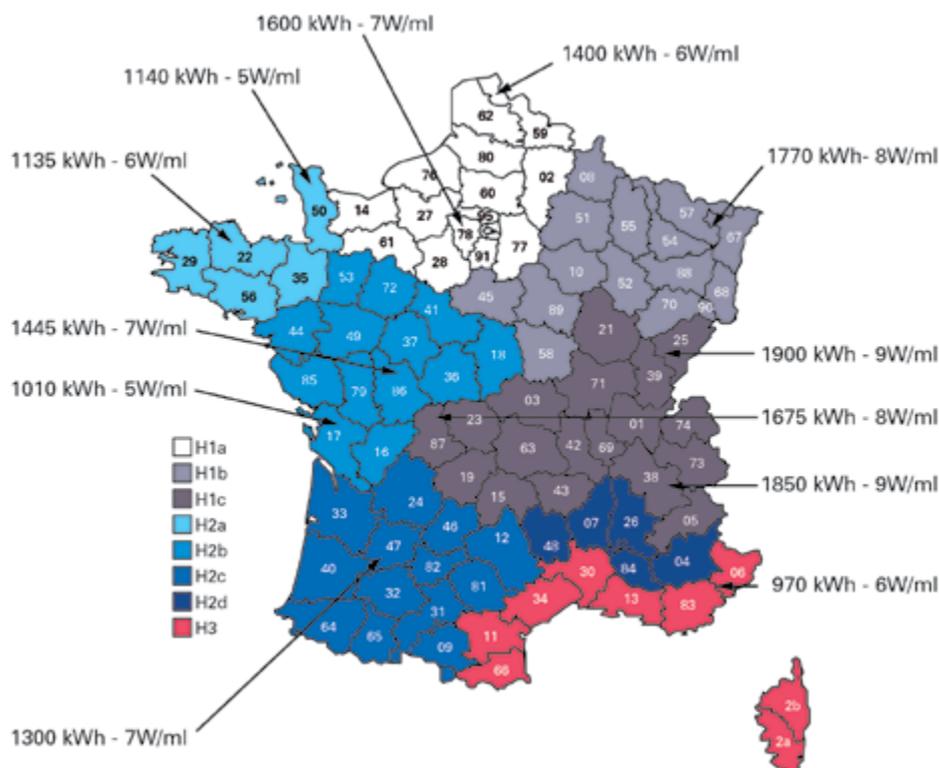
Chaque zone géographique se caractérise par une variation (journalière et saisonnière) plus ou moins importante de la température extérieure.

Les exemples suivants permettent d'établir un comparatif entre différents climats. Il est considéré un sol « argileux humide » de caractéristiques suivantes :

- une conductivité thermique de 1,45 W/m.K ;
- une capacité calorifique massique de 1340 J/kg.K ;
- une masse volumique de 1800 kg/m³.

La (Figure 19) présente, pour différentes zones géographiques, l'énergie utile récupérée (kWh) et la puissance thermique moyenne par mètre linéaire de tube (W/ml) sur la saison de chauffage. L'énergie utile correspond à l'énergie effectivement utilisée pour assurer un préchauffage de l'air.

Des différences de performances de 30 à 40% sont notées entre les zones géographiques. Les meilleures performances sont obtenues à l'est et au centre de la France. Indépendamment de la zone climatique, H1, H2 ou H3, les zones océaniques présentent des performances moindres.



▲ Figure 19 : Ordres de grandeurs estimés en termes de gains énergétiques utiles et puissances thermiques sur la saison de chauffage selon les zones géographiques définies dans la RT 2012



2.2. • Nature du sol

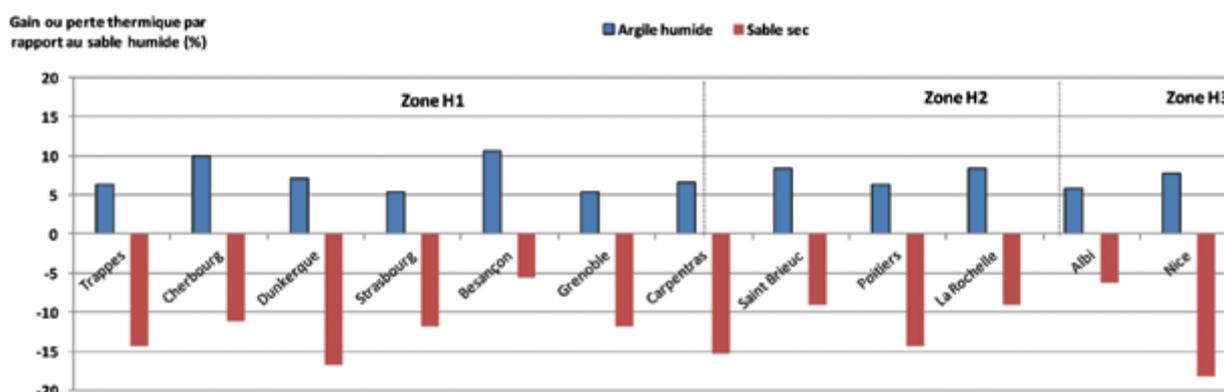
Les caractéristiques du sol sont essentielles pour garantir un parfait échange thermique avec l'air véhiculé dans le réseau. Plus que la composition du sol en elle-même (nature des éléments), c'est la teneur en eau qui peut avoir une influence certaine sur l'amélioration des performances (Figure 20). La teneur en eau du sol engendre une augmentation de la conductivité thermique. En présence d'un sol humide, la conductivité thermique du sol peut être supérieure à 1,3 W/m.K.

Les calculs mettent en évidence :

- une différence de 5 à 10% selon la composition du sol, argile ou sable ;
- une réduction de 5 à 15% des performances thermiques en présence d'un sol sec par rapport à un sol humide.

La présence ou l'absence d'eau au niveau du sol entraîne une variation significative des performances (Figure 20).

De façon générale, la nature du sol a une influence moins importante sur les performances thermiques que le climat (cf. 2.1).



▲ Figure 20 : Influence de la nature du sol (composition et teneur en eau) sur l'évolution des performances thermiques attendues (référence : sable humide)

2.3. • Conductivité thermique du tube

La conductivité thermique du tube est une donnée nécessaire pour déterminer le flux de chaleur transmis par conduction au travers de celui-ci. La conductivité diffère selon la nature du matériau dans une proportion très importante :

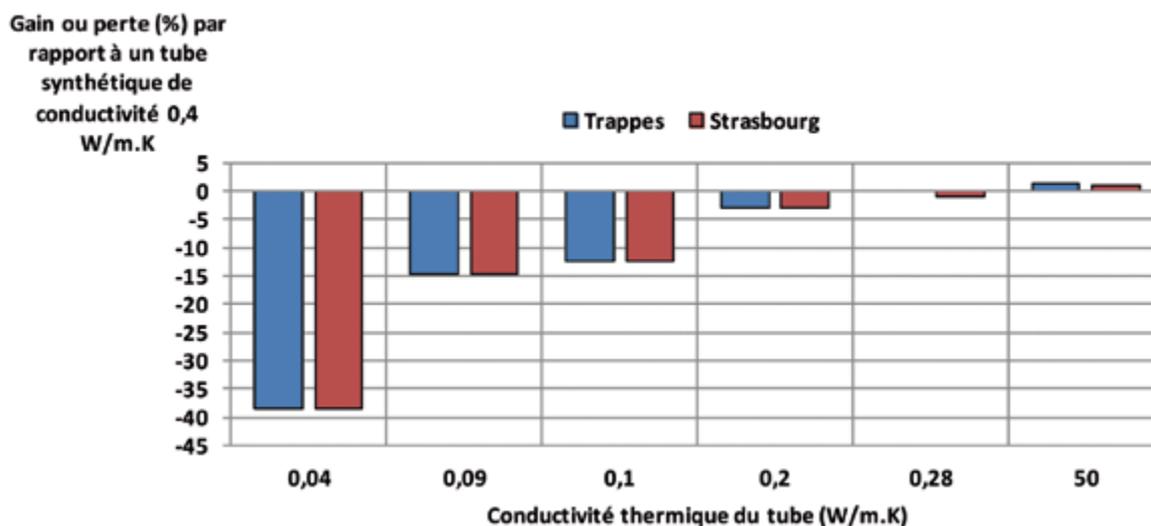
- les tubes synthétiques (polyéthylène haute densité, polypropylène) présentent une conductivité inférieure à 1 W/m.K., plutôt comprise entre 0,25 et 0,5 W/m.K ;
- les tubes métalliques (fonte ductile) présentent une conductivité de 50 W/m.K.

Une conductivité de 50 W/m.K offre les meilleures performances comme illustré sur la (Figure 21). Notons toutefois peu de différence pour les conductivités de 0,28, de 50 et de 0,4 W/m.K.

A retenir

Une conductivité inférieure ou égale à 0,1 W/m.K conduit à une réduction des performances de plus de 10%.

Le diamètre intérieur et la conductivité thermique du tube ont une influence d'autant plus importante sur les performances thermiques que la longueur de tube est faible (inférieure à 30 mètres).

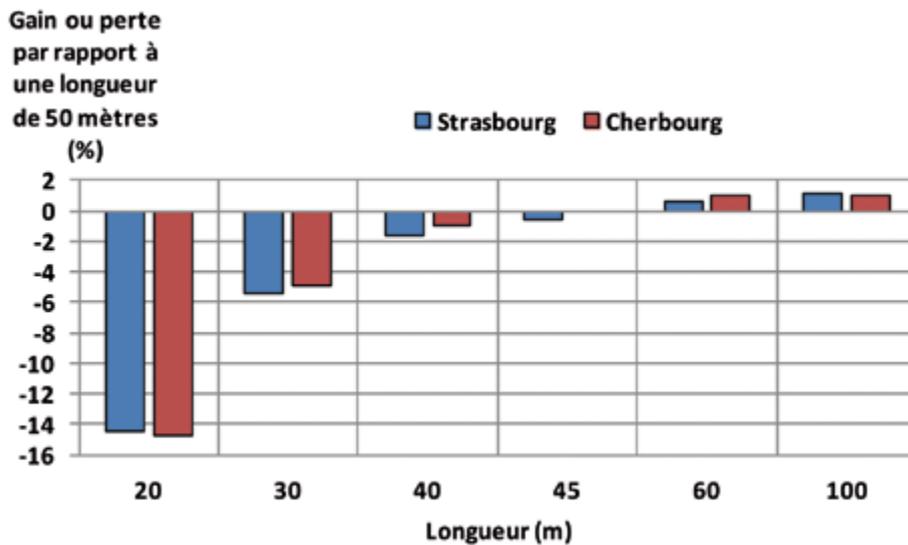


▲ Figure 21 : Incidence de la conductivité thermique du tube sur l'évolution des performances pour deux villes de zone climatique H1 (conductivité de référence choisie égale à 0,4 W/m.K)

2.4. • Longueur du tube

Au vu des résultats de la (Figure 22), il convient de privilégier une longueur du tube supérieure à 30 mètres. Globalement, les performances thermiques sont assez proches pour une longueur de tube comprise entre 30 et 100 mètres. Ces tendances restent similaires indépendamment de la zone géographique.

En dessous d'une longueur de 30 mètres, les performances thermiques estimées sont réduites de près de 15%.



▲ Figure 22 : Impact de la longueur du tube sur les performances thermiques (référence choisie : longueur de tube égale à 50 m)

2.5. • Profondeur d'enfouissement du tube

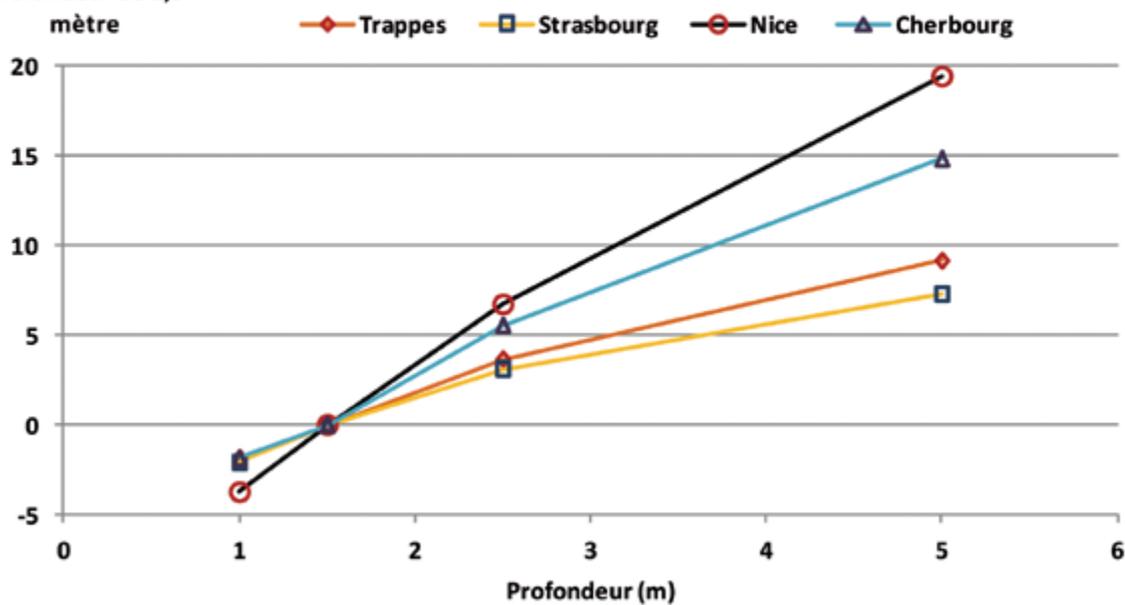
Plus la profondeur d'enfouissement est importante et plus les variations de température du sol sont faibles. Les profondeurs d'enfouissement des tubes classiquement retenues pour les projets sont comprises entre 1,50 et 2,50 m. Considérons ainsi une profondeur d'enfouissement de 1,50 m. La (Figure 23) met en évidence les gains ou les pertes de performances thermiques obtenues pour trois profondeurs supplémentaires : 1 m, 2,50 m et 5 m et quatre zones géographiques.

La puissance thermique récupérée augmente avec la profondeur d'enfouissement, quelle que soit la zone géographique. En revanche, le pourcentage de gain diffère selon la zone géographique (Figure 23). Passer d'une profondeur de 1,50 à 2,50 m permet un gain sur les performances thermiques de 3 à 7% selon la zone géographique. À une profondeur de 5 m, le gain thermique est compris entre 7% et 20% selon la zone géographique.

A retenir

Quelle que soit la zone géographique, la puissance thermique récupérée augmente avec la profondeur d'enfouissement des tubes. L'amélioration des performances liée à une plus grande profondeur d'enfouissement est plus sensible pour les zones côtières soumises à un climat océanique.

Gain ou perte (%)
par rapport à une
profondeur de 1,5
mètre



▲ Figure 23 : Incidence de la profondeur d'enfouissement sur la performance thermique attendue (référence choisie : profondeur d'enfouissement des tubes de 1,5 m)



BIPASSE DU PUIITS CLIMATIQUE

3



Bipasser le puits et amener de l'air directement de l'extérieur peut être une solution lorsque la température en sortie de puits risque d'entraîner un rafraîchissement (voire un préchauffage) non désiré du bâtiment. La (Figure 2) représente ces deux possibilités de circulation d'air en amont de la centrale.

Bipasser le puits climatique doit permettre d'optimiser le fonctionnement global de l'installation aéraulique en termes de consommation et d'inconfort. Cette solution est théoriquement intéressante. Toutefois, les résultats des suivis instrumentés décrits dans le chapitre 1 montrent plusieurs problématiques telles que (cf. 1) :

- une logique de régulation inversée ou non adaptée ;
- une mauvaise étanchéité du registre ;
- des températures intérieures importantes en période estivale.

L'étude de cas menée sous le logiciel de simulation thermique TRNSYS permet d'apporter des éléments complémentaires en vue d'étoffer cette analyse.

Trois points sont étudiés :

- le fonctionnement sans bipasse (c'est-à-dire en continu) ou le fonctionnement avec bipasse ;
- l'incidence d'une mauvaise étanchéité du registre ;
- le couplage du puits avec un système aéraulique double flux avec récupérateur de chaleur.

3.1. • Hypothèses de calcul

Le bâtiment modélisé sous TRNSYS est une maison individuelle de plain-pied avec une surface habitable de 100 m². Ce logement présente une inertie moyenne et un niveau d'isolation compatible avec la RT 2012.

Le modèle « puits climatique » modélisé sous TRNSYS présente les caractéristiques définies ci-après. Le puits climatique est raccordé au système de ventilation double flux de l'habitat. Le débit d'air insufflé pendant la période hivernale est de 105 m³/h. En période estivale, le débit de surventilation est de 210 m³/h.

Trois zones géographiques sont étudiées : Strasbourg (H1a), La Rochelle (H2b) et Nice (H3).

Le sol choisi est un sol argileux humide. Les caractéristiques retenues pour le puits climatique sont : 1 tube de 50 m de longueur situé à 2,50 m de profondeur. Les caractéristiques du tube sont :

- diamètre intérieur de 0,186 m ;
- conductivité de 0,4 W/m.K.

Quatre plages de réglage de consigne de température extérieure du bipasse du puits climatique sont retenues et simulées :

- bipasse du puits entre 12 et 19°C de température extérieure (plage courante) ;
- bipasse du puits entre 10 et 19°C de température extérieure ;
- bipasse du puits entre 15 et 19°C de température extérieure ;
- bipasse du puits entre 12 et 22°C de température extérieure.

Les résultats obtenus à l'issue de ces simulations sont exprimés différemment selon la période considérée :

- période de chauffage (période hivernale) : énergie utile fournie par le puits climatique et énergie fournie par le système de ventilation double flux ;
- période de non chauffage (période estivale) : nombre d'heures d'inconfort correspondant au nombre d'heures où la température intérieure est supérieure à 26°C.

3.2. • Fonctionnement continu ou fonctionnement avec bipasse

3.2.1. • Période de chauffage

En période de chauffage, le fonctionnement continu du puits climatique permet d'obtenir l'énergie maximale et ce, pour les trois zones géographiques considérées. L'énergie apportée d'une part, par un fonctionnement sans bipasse du puits et d'autre part, par un



fonctionnement du puits avec bipasse entre 12 et 19°C est donnée en (Figure 24). Le gain obtenu par le fonctionnement sans bipasse du puits est de 5 à 12% selon la zone.

Notons que 100% de l'air transite par le puits climatique lors de son fonctionnement.

L'énergie récupérée par le puits représente de 10 à 13% des besoins de chauffage de la maison.

| | Énergie apportée par le puits selon le fonctionnement (kWh) | | Gain énergétique lié au fonctionnement continu du puits (%) |
|-------------|---|---|---|
| | Fonctionnement sans bipasse du puits | Fonctionnement avec bipasse du puits entre 12 et 19°C | |
| Strasbourg | 881 | 843 | + 5% |
| La Rochelle | 456 | 405 | + 11% |
| Nice | 349 | 308 | + 12% |

▲ Figure 24 : Différences de gains énergétiques obtenus selon le fonctionnement du puits

Différentes plages de température extérieure de consigne de bipasse ont été simulées pour le climat de Strasbourg (Figure 25). Logiquement, plus la plage de bipasse est faible et plus les gains se rapprochent de ceux obtenus avec un fonctionnement continu du puits. Modifier la consigne inférieure de température du bipasse entre 12, 10 et 15°C entraîne effectivement une variation de l'énergie apportée par le puits. Ce n'est pas le cas lorsque la consigne supérieure passe de 19 à 22°C (Figure 25).

| | Énergie apportée par le puits pendant la période de chauffage (kWh) |
|--|---|
| Fonctionnement continu du puits | 881 (référence) |
| Bipasse du puits entre 12 et 19°C (plage courante) | 843 (-5% par rapport à référence) |
| Bipasse du puits entre 10 et 19°C | 802 (-9% par rapport à référence) |
| Bipasse du puits entre 15 et 19°C | 875 (<1% par rapport à référence) |
| Bipasse du puits entre 12 et 22°C | 843 (-5% par rapport à référence) |

▲ Figure 25 : Influence de la plage de température de bipasse sur l'énergie apportée par le puits (Strasbourg)

Les différences d'énergie récupérées par le puits en présence d'un bipasse sont liées à la consigne inférieure de température extérieure du bipasse et donc aux périodes de l'année où le puits est bippassé c'est-à-dire principalement au printemps et en automne.

Ces deux périodes se caractérisent généralement comme suit :

- printemps : température sortie puits < température extérieure
- automne : température sortie puits > température extérieure



Il s'agit, dans les deux cas, d'insuffler l'air à une température la plus élevée possible. Ainsi, au printemps, on cherche à court-circuiter le puits et en automne, à privilégier le passage d'air dans le puits. Ceci se traduit par une gestion différente de ces deux périodes :

- printemps : régler une consigne inférieure de température du bipasse la plus faible possible pour court-circuiter au maximum le puits climatique ;
- automne : régler une consigne inférieure de température du bipasse la plus forte possible de sorte à favoriser le passage de l'air dans le puits.

A retenir

La problématique des mi-saisons accentue la difficulté du réglage optimal de la plage de température pour laquelle le puits climatique est bipsé.

3.2.2. • Période de non chauffage

En période de non chauffage, le débit de surventilation considéré est de 210 m³/h.

Pour un même débit de ventilation, un fonctionnement du puits avec bipasse permet de réduire le nombre d'heures d'inconfort par rapport à un fonctionnement sans bipasse (Figure 26) et (Figure 27).

Toutefois, la réduction significative des heures d'inconfort est obtenue grâce à une surventilation et ce, indépendamment du type de fonctionnement du puits (Figure 26) et (Figure 27).

À condition d'avoir toujours une vitesse de l'air et un temps de contact dans le sol conformes au bon échange air/sol, il est opportun d'utiliser la surventilation pour améliorer le confort thermique d'été.

| Strasbourg | | |
|--|---|---|
| Nombre d'heures où la température est > 26°C pendant la période de non chauffage | Débit minimal réglementaire (105 m ³ /h) | Surventilation continue (210 m ³ /h) |
| Fonctionnement sans bipasse du puits climatique | 495 h (16% du temps) | 141 h (4% du temps) |
| Bipasse du puits entre 12 et 19°C | 373 h (12% du temps) | 76 h (2% du temps) |

▲ Figure 26 : Évolution du nombre d'heures d'inconfort en fonction du débit de ventilation (Strasbourg)



| Nice | | |
|--|---|---|
| Nombre d'heures où la température est > 26°C pendant la période de non chauffage | Débit minimal réglementaire (105 m ³ /h) | Surventilation continue (210 m ³ /h) |
| Fonctionnement sans bipasse du puits climatique | 1230 h (26% du temps) | 407 h (8% du temps) |
| Bipasse du puits entre 12 et 19°C | 1169 h (24% du temps) | 364 h (8% du temps) |

▲ Figure 27 : Évolution du nombre d'heures d'inconfort en fonction du débit de ventilation (Nice)

3.3. • Étanchéité du registre de bipasse du puits

Lors des périodes de fonctionnement du puits climatique, il est essentiel que la totalité du débit d'air traité transite par le puits climatique. Dans le cas contraire, il y a un risque de réduction des performances globales du puits climatique compte tenu, par exemple en période hivernale, de l'entrée d'un air plus froid.

Des calculs ont été menés en considérant un bipasse non étanche avec un débit d'air de 70% en provenance du puits et 30% en provenant de l'air extérieur.

Une dégradation notable des performances en période de chauffage et en période de non chauffage est observée lorsque le bipasse n'assure pas totalement son rôle de court-circuit étanche de l'entrée d'air neuf direct. Il est observé (Figure 28) :

- une réduction de 30% de l'énergie récupérée (en période de chauffage) ;
- une augmentation de 21% d'inconfort (en période de non chauffage).

| | Énergie apportée par le puits pendant la période de chauffage (kWh) | Nombre d'heures où la température est > 26°C pendant la période de non chauffage (avec un débit minimal réglementaire de 105 m ³ /h) |
|------------------------------|---|---|
| Bipasse étanche (0-100%) | 843 | 373 h |
| Bipasse non étanche (30-70%) | 592 (- 30% d'énergie par rapport à un bipasse étanche) | 452 h (+21% d'heures d'inconfort par rapport à un bipasse étanche) |

▲ Figure 28 : Influence de l'étanchéité du bipasse sur les performances du puits climatique (Strasbourg), pour un bipasse du puits entre 12 et 19°C

3.4. • Couplage du puits climatique avec une centrale de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur

L'association du puits climatique avec une installation aéraulique équipée d'un récupérateur de chaleur statique est une solution couramment rencontrée. L'intérêt de ce couplage est évalué en considérant différentes configurations de fonctionnement du puits et d'efficacité du récupérateur de chaleur.

Trois cas de couplage avec une ventilation double flux sont étudiés :

- sans récupérateur de chaleur ;
- avec un récupérateur de chaleur de 70% d'efficacité ;
- avec un récupérateur de chaleur de 85% d'efficacité.

Les calculs sont menés pour :

- un fonctionnement sans bypass du puits (fonctionnement continu) ;
- un bypass du puits entre 12 et 19°C.

La (Figure 29) montre que l'énergie apportée par l'échangeur de chaleur est d'autant plus importante que :

- l'efficacité de l'échangeur est élevée ;
- le fonctionnement du puits est continu (sans bypass).

L'amélioration des performances est observée pour les trois zones géographiques.

A retenir

L'association du puits climatique et d'un système de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur présente un intérêt dans le cas du fonctionnement sans bypass du puits. La période éventuelle de rafraîchissement non désiré (notamment au printemps) est « lissée » par la présence du double flux avec échangeur.



| Couplage du puits climatique avec une ventilation double flux | | Énergie apportée par le puits (kWh) | Énergie apportée par la ventilation double flux (kWh) | % des besoins couverts par le puits climatique (%) | % des besoins couverts par le double flux (%) |
|---|------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|
| Fonctionnement sans bipasse du puits climatique | Sans récupérateur | 881 | - | 11% | - |
| | 70 % efficacité récupérateur | | 1666 | | 20% |
| | 85 % efficacité récupérateur | | 2024 | | 25% |
| Bipasse du puits entre 12 et 19°C de température extérieure | Sans récupérateur | 843 | - | 11% | - |
| | 70 % efficacité récupérateur | | 1458 | | 19% |
| | 85 % efficacité récupérateur | | 1771 | | 23% |

▲ Figure 29 : Énergie apportée par le puits climatique et par le récupérateur de chaleur pendant la période de chauffage (Strasbourg)

3.5. • Synthèse

Les points mis en évidence par les simulations :

- le choix et l'optimisation de la plage de température extérieure de bipasse ne sont pas simples à considérer car dépendants de la zone géographique, des conditions ambiantes, des saisons ;
- le fonctionnement sans bipasse du puits permet d'obtenir l'énergie maximale pour le préchauffage du bâtiment ;
- le couplage du puits climatique avec un système de ventilation avec récupérateur de chaleur permet de privilégier un fonctionnement sans bipasse du puits sans être pénalisé par un éventuel rafraîchissement non désiré puisque les températures sont lissées par le récupérateur de chaleur ;
- le recours à une surventilation en période estivale réduit les périodes d'inconfort thermique.

A retenir

Un fonctionnement simplifié du puits climatique est à privilégier. Ainsi, un fonctionnement continu où l'on s'affranchit de la mise en place d'un bipasse apparaît être un bon compromis en termes de performances obtenues et de contraintes techniques. En effet, au vu des suivis menés, chercher à optimiser le fonctionnement de ce système est plutôt à l'origine de dysfonctionnements, voire de contre-performances.

PARTENAIRES du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Association des industries de produits de construction (AIMCC) ;
- Agence qualité construction (AQC) ;
- Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) ;
- Confédération des organismes indépendants de prévention, de contrôle et d'inspection (COPREC Construction) ;
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- Électricité de France (EDF) ;
- Fédération des entreprises publiques locales (EPL) ;
- Fédération française du bâtiment (FFB) ;
- Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) ;
- Fédération des promoteurs immobiliers de France (FPI) ;
- Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (Fédération CINOV) ;
- GDF SUEZ ;
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ;
- Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement ;
- Plan Bâtiment Durable ;
- SYNTEC Ingénierie ;
- Union nationale des syndicats français d'architectes (UNSAFA) ;
- Union nationale des économistes de la construction (UNTEC) ;
- Union sociale pour l'habitat (USH).

Les productions du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.



PERFORMANCES DES PUIITS
CLIMATIQUES

SUIVIS INSTRUMENTÉS
ET SIMULATIONS

AOÛT 2014

Ce rapport d'étude présente les résultats de suivis instrumentés et de simulations sur des puits climatiques afin de déterminer leurs performances et l'impact de différents paramètres sur ces performances.

La technique du puits climatique s'est développée ces dernières années. Paradoxalement, le retour d'expériences sur ces systèmes est encore faible. Également, certains points techniques restent peu documentés et diverses interrogations peuvent persister concernant par exemple :

- l'impact de paramètres sur les performances du puits climatique ;
- la pertinence à bipasser un puits.

L'approche adoptée dans cette étude pour apporter des éléments de réponses à ces questions a consisté à réaliser des suivis instrumentés et des simulations numériques.



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

