

# LE TUFFEAU : MAITRISER SES POINTS FAIBLES, VALORISER SES POINTS FORTS

*Rénovations énergétiques pérennes  
des Bâtiments en Tuffeau*



**Michel NEDELEC - CETE de L'OUEST  
Unité Bâtiment Thermique – LRA**

**23 septembre 2011**



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat Développement durable  
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent  
pour  
l'avenir

Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement  
de l'Ouest

[www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr)

# SOMMAIRE

- MESURER ET MODELISER POUR MIEUX COMPRENDRE : PRESENTATION DE L'ACTION EN COURS
- LES PRINCIPALES PROPRIETES DES PAROIS EN TUFFEAU
- COMMENT VALORISER LEURS QUALITES ET MAITRISER LEURS DEFAUTS
- PROCHAINES ETAPES DE L'ACTION TUFFEAU

# MESURER ET MODELISER POUR MIEUX COMPRENDRE

PRESENTATION DE L'ACTION TUFFEAU  
EN COURS AU CETE O

# OBJECTIFS DE L'ACTION TUFFEAU

- Identifier les particularités du comportement énergétique et du confort hygrothermique des bâtiments en tuffeau « dans leur jus » ou réhabilités
- Identifier diverses techniques de réhabilitation utilisées...
- ... et évaluer leur performance au regard de quatre critères principaux :
  - **Consommation d'énergie**
  - **Confort hygrothermique**
  - **Pérennité du bâti**
  - **Conservation architecturale**

**Afin de constituer un référentiel technique de bonnes pratiques de réhabilitation thermique pérenne du bâti ancien en tuffeau à destination des particuliers, élus, artisans, maîtrise d'œuvre...**

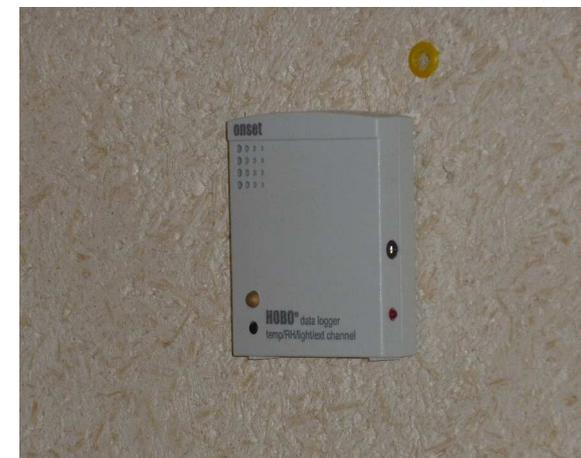
# LES PRINCIPALES ACTIONS ENGAGEES

- Retour d'expériences via la visite de chantiers innovants et la participation à des tables rondes
- Instrumentation et suivi de bâtiments « dans leur jus » ou réhabilités
  - Instrumentation d'été
  - Instrumentation d'hiver
- Projet de création d'une plateforme tuffeau aux Ponts de Cé
- Caractérisation d'échantillons de tuffeau en laboratoire
- Modélisation des phénomènes hygrothermiques dans des logiciels spécialisés

**Via 2 thèses en région (2011-2014) sur la question de la réhabilitation du bâti ancien en calcaire**

# UNE DES ACTIONS : INSTRUMENTATION DE 6 MAISONS EN TUFFEAU CET D'ÉTÉ

- Instrumentation **légère** d'un panel de 6 maisons représentatives du parc bâti en tuffeau en région de juin à octobre 2011
- Mesure des paramètres de confort dans quelques pièces des bâtiments (rez-de-chaussée, étage, expositions différentes,...)
- Mesures des conditions météorologiques (température et humidité)
- Mesure de l'humidité et de la température dans certaines parois



# PRÉSENTATION DU PANEL DE BATIMENTS INSTRUMENTES

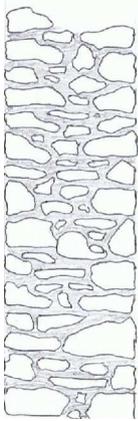


# LES PAROIS EN TUFFEAU

## LEURS PRINCIPALES PROPRIETES

# UNE CAPACITE ISOLANTE FAIBLE

La résistance thermique R d'une paroi caractérise sa capacité à isoler. Plus R est grand, plus la paroi est isolante.



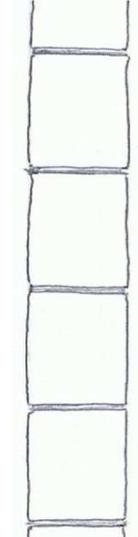
Mur large en moellons appareillés  
( $\approx 50$  cm) - Lerné

$$R \approx 0,7 \text{ m}^2.\text{K/W}$$



Mur mince en simple parement ( $\approx 22$  cm) - Chevigné

$$R \approx 0,3 \text{ m}^2.\text{K/W}$$



Résistance thermique conventionnelle en maison BBC :  $5 \text{ m}^2.\text{K/W}$

**CONTRAIREMENT À UNE IDÉE REÇUE, L'ISOLATION  
DES PAROIS EN TUFFEAU EST À PRIVILEGIER**

# MAITRISER LE PHENOMENE DE PAROI FROIDE

L'effusivité thermique  $b$  caractérise la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories.

**Plus  $b$  est grand, plus le matériau est « froid » et risque de créer un phénomène de paroi froide**



Tuffeau apparent - Ligné  
 $b \approx 18,6 \text{ W.h}^{0.5}/\text{m}^2.\text{K}$



Tuffeau enduit en chaux-  
chanvre - Chevigné

$$b \approx 8,3 \text{ W.h}^{0.5}/\text{m}^2.\text{K}$$



Tuffeau enduit en terre et  
paille au Nord - Ligné

$$b \approx 3,9 \text{ W.h}^{0.5}/\text{m}^2.\text{K}$$

**PRIVILEGIER LE TUFFEAU APPARENT SUR LES REFENDS OU PAROIS MITOYENNES**

# UN PATRIMOINE ARCHITECTURAL A CONSERVER



- Isolation par l'intérieur à privilégier
- Utilisation d'enduits clairs à la chaux naturelle



# COEFFICIENT DE CAPILLARITÉ ET D'ABSORPTION ÉLEVÉ

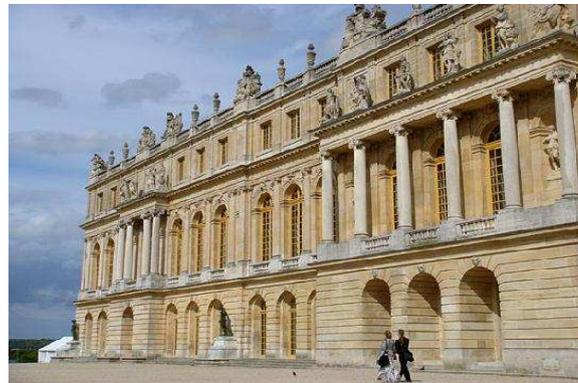
Plus le coefficient de capillarité  $C_{//}$  et la porosité  $N_{48}$  sont élevés, plus le matériau absorbe rapidement de l'eau et en grande quantité.



**Tuffeau de Touraine\***

$$C_{//} = 42,7 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$$

$$N_{48} = 42.6\%$$



**Calcaire de Saint Leu \***

$$C_{//} = 6,2 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$$

$$N_{48} = 17.6\%$$



**Pierre de Richemont \***

$$C_{//} = 13,9 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$$

$$N_{48} = 24.6\%$$

**LES PAROIS EN TUFFEAU SONT DES EPONGES QUI PEUVENT STOCKER ET DESTOCKER DES GRANDES QUANTITES D'EAU**



Source : Guide méthodologique de sélection des pierres des monuments (BRGM – dec 2000)

# MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE DE DESTOCKAGE EN ETE



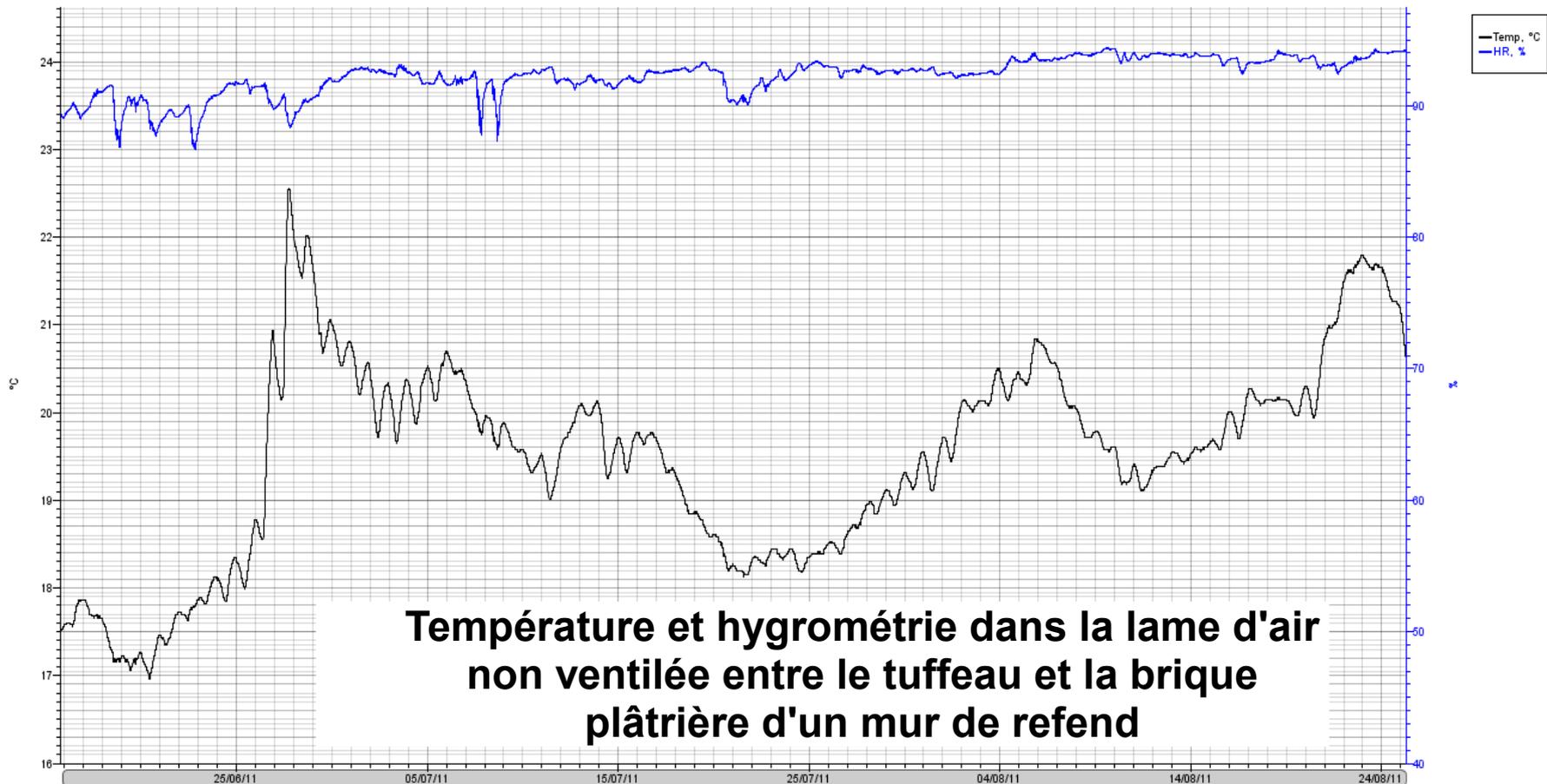
*Gizeux*



# MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE DE DESTOCKAGE EN ETE

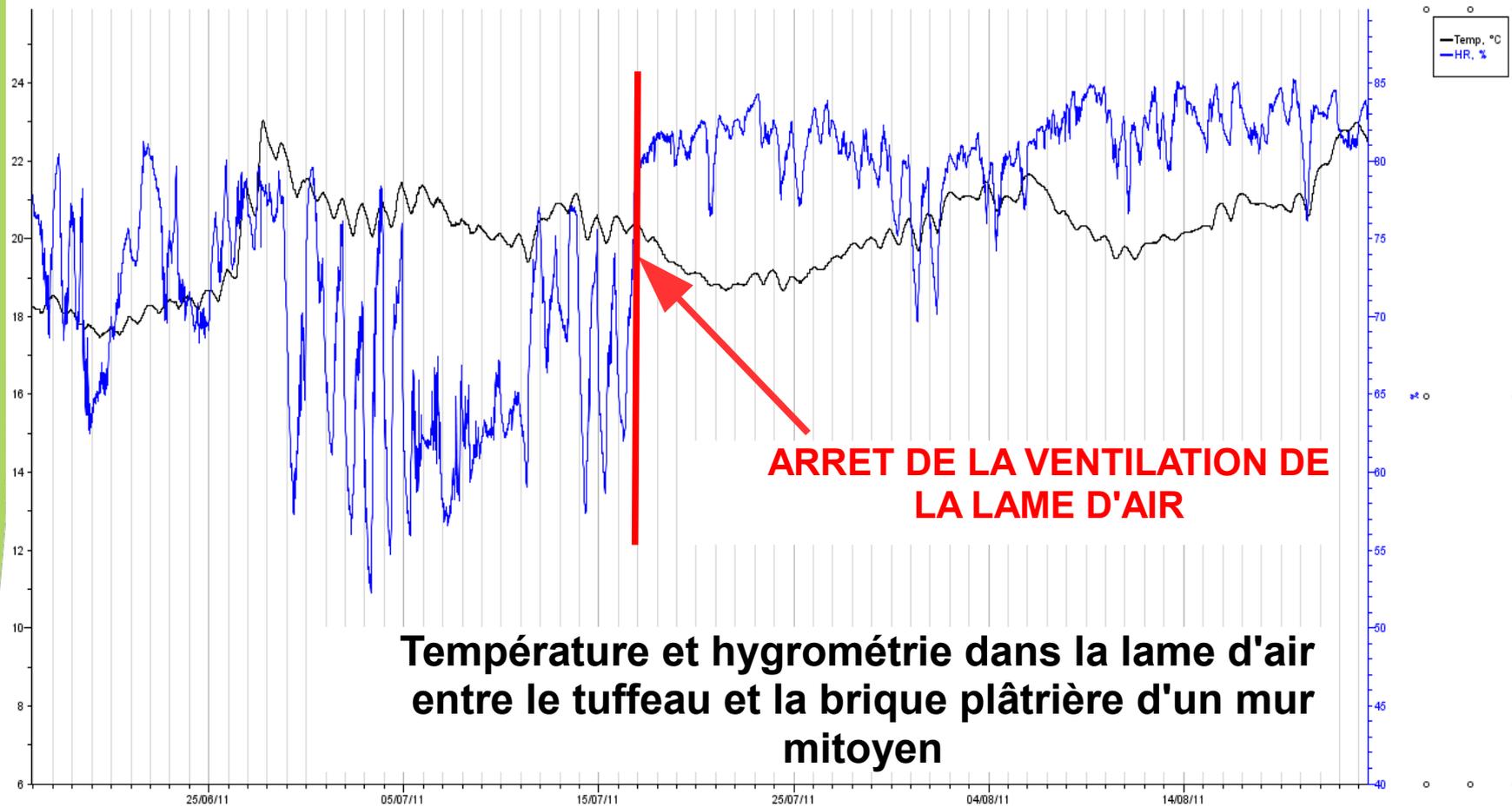


# MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE DE DESTOCKAGE EN ETE



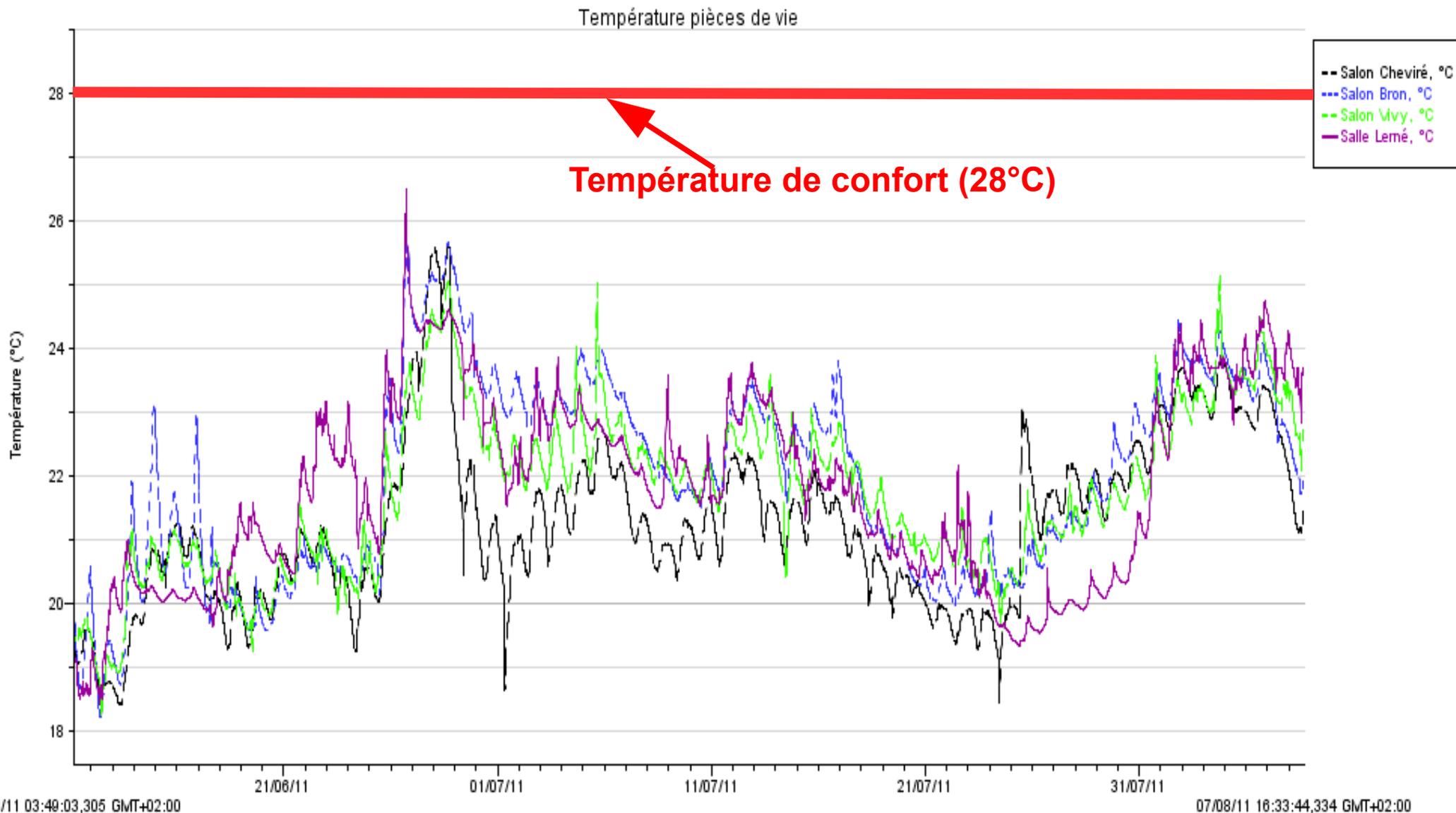
**LES PAROIS EN TUFFEAU STOCKE ET DESTOCKE UNE GRANDE QUANTITE D'EAU**

# MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE DE DESTOCKAGE EN ETE

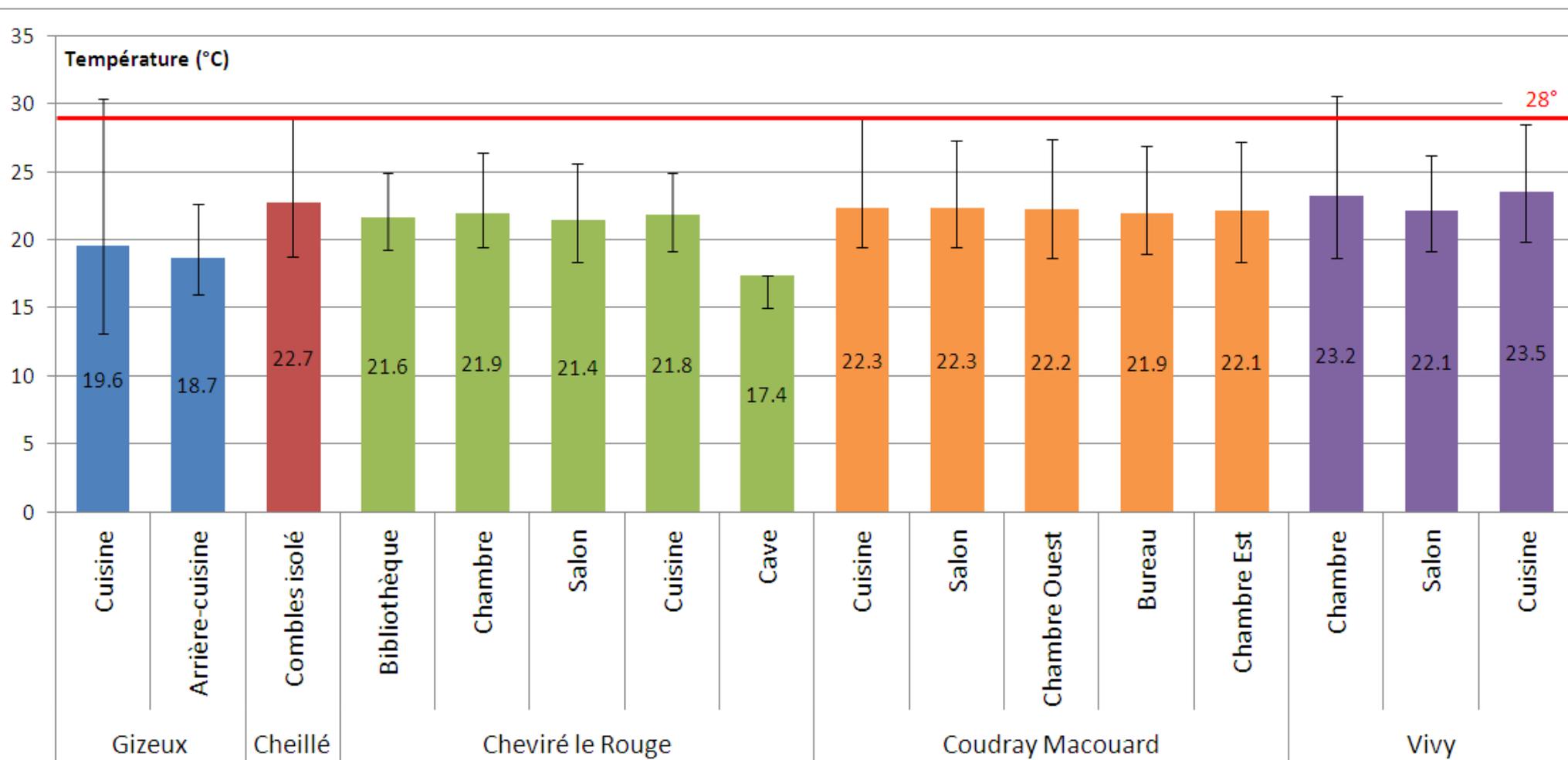


**LES PAROIS EN TUFFEAU STOCKE ET DESTOCKE UNE GRANDE QUANTITE D'EAU**

# UN CONFORT D'ETE EXCELLENT



# UN CONFORT D'ETE EXCELLENT



# L'EVAPORATION COMME MOTEUR DU CONFORT D'ETE ?

L'évaporation de l'eau contenue dans les murs en tuffeau ainsi que dans les isolants naturels contribuerait à l'excellent confort d'été constaté dans les maisons en tuffeau.



Riad au Maroc : rafraîchissement par évaporation des bassins

Cette eau a été absorbée par les matériaux au cours de l'hiver : c'est **l'inertie latente saisonnière**

**LES PAROIS EN TUFFEAU SONT DES CLIMATISEURS NATURELS**

# CE STOCKAGE DESTOCKAGE DOIT TOUTEFOIS ETRE CONTROLLE



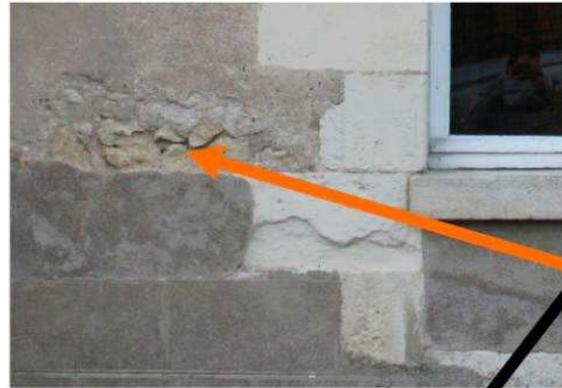
**LE TUFFEAU EST TRES SENSIBLE AUX CYCLES REPETES D'IMBIBITION SECHAGE DU FAIT DES MIGRATIONS DE SELS EN SURFACE\***

*\*Propriétés hydriques et vieillissement par cyclage imbibition-séchage de deux pierres calcaires à forte porosité - Kevin Beck (Université d'Orléans)*

# UNE CAPACITE ISOLANTE QUI CHUTE AVEC LA TENEUR EN EAU



## Identification

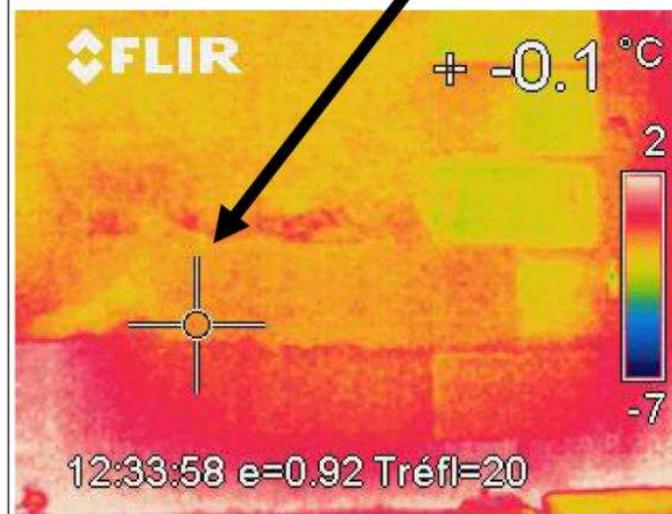


### Description :

Bâtiment : Garderie  
Etage : RdC  
Fonction : Salle de classe  
Orientation : nord-est

Heure : 12h33  
Temps : froid sec, partiellement couvert

## Thermogramme



### Description :

Emissivité de mesure : 0,92  
Précision : +/- 1°C

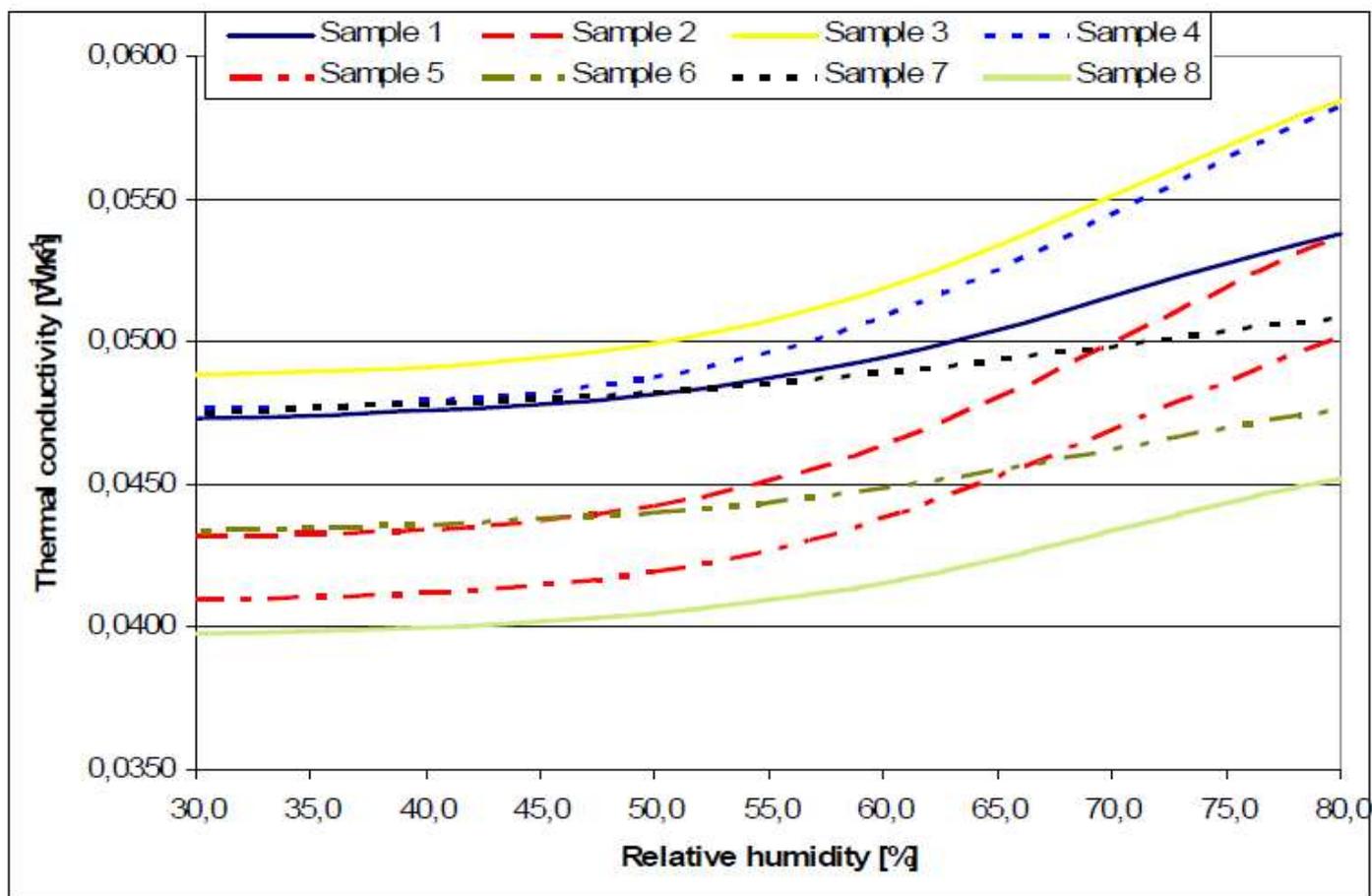
T° extérieure : -5°  
T° intérieure : 19°

T° mini scène : 0°  
T° max scène : 2°

T° spot 1 : 0°  
T° spot 2 : -  
T° zone 1 : -  
T° zone 2 : -

**L 'EAU CONDUIT : LA PERFORMANCE THERMIQUE DES PAROIS EN TUFFEAU CHUTE AVEC LA TENEUR EN EAU DU MUR**

# UN CONSTAT IDENTIQUE AVEC LES ISOLANTS



*Influence de l'humidité sur la conductivité thermique d'isolants naturels (jute, lin et chanvre)*

**LA PERFORMANCE DES ISOLANTS NATURELS CHUTE AVEC LE TAUX D'HUMIDITE**

# SYNTHESE DES PROPRIETES DU TUFFEAU

- Les parois en tuffeau nues ont une **faible capacité isolante**
- Les parois en tuffeau nue sont des **parois « froides »**
- Les parois en tuffeau sont des **éponges**
  
- Les parois en tuffeau **supportent mal les cycles d'imbibition séchage**
- La capacité isolante du tuffeau et des isolants **chute avec l'augmentation du taux d'humidité**
  
- Les parois en tuffeau sont une **fierté** du patrimoine bâti régional
- Les parois en tuffeau sont des **climatiseurs naturels**

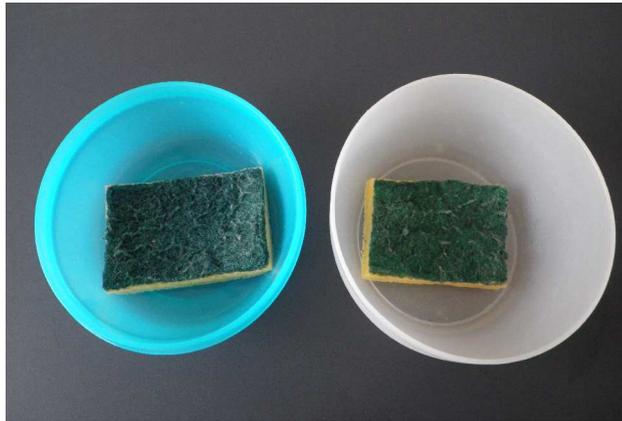
**QUE FAIRE ? OBJECTIF : VALORISER LES POINTS FORTS, MAITRISER LES POINTS FAIBLES**

# LES PAROIS EN TUFFEAU

VALORISER LEURS POINTS FORTS,  
MAITRISER LEURS POINTS FAIBLES

# PRIVILEGIER DES SOLUTIONS ISOLANTES PERSPIRANTES

TUFFEAU = EPONGE



*2 éponges les pieds dans l'eau*



*Couvercle non perspirant vs linge perspirant*

Après trois semaines, l'éponge dans la boîte Tupperware® fermée avec un couvercle non perspirant est toujours humide. L'autre éponge recouverte d'un linge laissant passer la vapeur d'eau est sèche.

**LES SOLUTIONS D'ISOLATION UTILISEES DOIVENT PERMETTRE DE LAISSER LA VAPEUR D'EAU TRANSITER DANS LA PAROI : ON PARLE DE COMPLEXES PERSPIRANTS**

# COMMENT EVALUE-T-ON LE CARACTERE PERSPIRANT D'UN COMPLEXE ISOLANT?

- Plus le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau  $S_d$  d'un produit est faible, **plus il est perspirant**.
- Un produit est perspirant si  $0 < S_d < 5$  ?
- En pratique, la règle des « 5 pour 1 » est souvent énoncée pour favoriser la migration de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur :

$$S_d \text{ intérieur} = 5 \times S_d \text{ extérieur}$$

- Règles trop simplistes dans le bâti ancien? Soumis à des sources internes d'humidité (pluies, remontées capillaires, infiltrations) et à des phénomènes physiques internes complexes (adsorption, évaporation, condensation,...)

# QUELQUES VALEURS DE Sd

MATERIAUX	Sd (m)	
Plâtre de plâtre / gypse 13 mm	0.05 à 0.16	1.2 à 5,4
Freine vapeur	1 à 5	
Laine minérale ou végétale 12 cm	0.12	
Tuffeau 22 cm	5.5	5.6 à 5.9
Enduit chaux	0.12 à 0.40	

Pour respecter la règle des « 5 pour 1 » il faudrait utiliser à un pare vapeur, ce qui va empêcher le mur de perspirer, notamment l'été.

MATERIAUX	Sd (m)
Enduit chaux aérienne 2 cm	0.12 à 0.40
Chaux-chanvre banché 20 cm	2,3
Tuffeau 22 cm	5.5
Enduit chaux	0.12 à 0.40

**Privilégier la continuité capillaire et l'utilisation d'enduits très perspirants.**

# L'INTERET DES FREINES VAPEUR A Sd VARIABLE ?

- Les freines vapeurs à Sd variables
  - permettent l'évaporation des murs l'été ( $Sd < 1$ )
  - freinent le transfert de vapeur d'eau l'hiver ( $Sd \approx 5$ )
- Quelques matériaux à éviter :

Carrelage	15 à 150
Pare Vapeur	> 10 à 15 m
Polystyrène 12 cm	9 à 24 m

← Incompatibilité chimique

**FACE A CETTE COMPLEXITE, L'INSTRUMENTATION ET LA SIMULATION SONT NECESSAIRES POUR IDENTIFIER DES SOLUTIONS QUI « MARCHENT » DANS LES CAS LES PLUS COURANTS.**

# QUELQUES BONNES PRATIQUES POUR LES PAROIS EN TUFFEAU (1/3)

- Limiter les pénétrations d'eau dans le tuffeau
  - Assurer la bonne évacuation des eaux pluviales par l'entretien des toitures et chéneaux, conservation des corniches et bandeaux
  - Drainer les pieds de mur via :
  - Combattre les remontées capillaires en privilégiant
    - les dalles perspirantes à base de chaux
    - les terrasses en bois ou en graviers
  - En cas de recours à des freines vapeurs, bien les mettre en œuvre
- **Ventiler les bâtiments**



# QUELQUES BONNES PRATIQUES POUR LES PAROIS EN TUFFEAU (2/3)

- Isoler **les parois donnant sur l'extérieur** en à veillant à laisser **perspirer** le mur en tuffeau via le recours à
  - des isolants perspirants (proscrire polystyrène, isolants minces,..) + freines vapeurs à Sd variable ?
  - des complexes perspirants présentant une continuité capillaire (béton ou brique de chanvre, béton cellulaire,...)
  - des revêtements très perspirants (proscrire faïence, peinture non perméable, enduit ciment)
- Utiliser **les murs de refends** comme des régulateurs d'humidité et des climatiseurs naturels tout en barrant les phénomènes de parois froides via des **correcteurs thermiques** type
  - enduit chaux-chanvre
  - enduit terre-paille

# QUELQUES BONNES PRATIQUES POUR LES PAROIS EN TUFFEAU (3/3)

- Si la source d'humidité n'est pas identifiée ou si elle ne peut-être résolue
  - Recourir à la technique de « la boîte dans la boîte » ie la création d'une lame d'air ventilée par l'extérieur
  - Prudence : ne jamais isoler un tuffeau gorgé d'eau...

**LES AFFIRMATIONS PRESENTEES ICI DOIVENT ENCORE ETRE EVALUEES CAR LE TUFFEAU EST UN MATERIAU SINGULIER ET FRAGILE AU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE ET CHIMIQUE PARTICULIER.**

# LES PAROIS EN TUFFEAU

## EXPERMIMENTATIONS A VENIR



# Instrumentation de 3 maisons en tuffeau pendant 1 année

Objectif : évaluer la performance de divers complexes isolants en conditions réelles

- **Mesure des paramètres de confort** dans séjour, cuisine, SDB et une chambre : température opérative, hygrométrie et CO2
- Mesure de la **température de surface** en quelques points de la paroi
- Mesure des conditions météorologiques
- Mesure de la **teneur en eau** des parois
- Mesure des **consommations** de chauffage
- Diagnostic infrarouge et infiltrométrie
- Prélèvement éventuel de moisissures
- Enquête d'ambiance

# Instrumentation de 4 maisons en tuffeau pendant 1 année



Enduit chaux-chanvre au Vieux Vivy



Maison sans isolant à Vivy



Laine chanvre et bois à Saint Mathurin

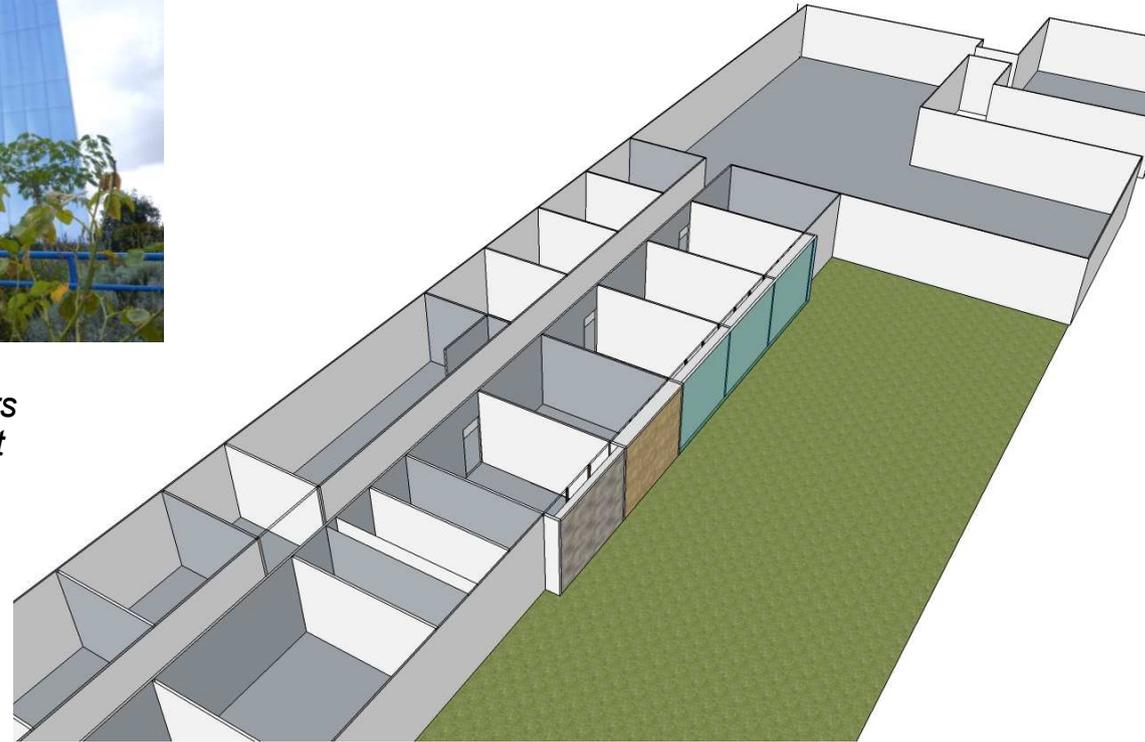


Béton de chanvre au Coudray Macouard

# Création d'une plateforme expérimentale aux Ponts De Cé



*Laboratoire  
Régional d'Angers  
CETE de l'Ouest*



Objectif : évaluer la performance de divers complexes isolants en conditions maîtrisées

# Merci de votre attention



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat Développement durable  
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent  
pour  
l'avenir

Centre d'Études Techniques de l'Équipement  
de l'Ouest

[www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr)