



Journées thématiques IBPSA France 2015

Atelier transferts hygrothermiques

27 mai 2015

Comportement hygrothermique des matériaux bio-sourcés, exemple du béton de chanvre



Espace éco-chanvre, Noyal sur Vilaine (35)

Florence COLLET,

Université de Rennes 1

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (EA 3913)

Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie

IUT Génie Civil Construction Durable - Rennes





43
**Enseignants-
chercheurs**

32
doctorants

8 ETP
BIATSS

GEOSAX

Géomatériaux et
Ouvrages sous actions
complexes

- matériaux granulaires et structures de chaussées
- dépollution des sols et des milieux poreux
- Endommagement chimio-mécanique, altérabilité et durabilité des géomatériaux et des ouvrages
- Construction mixte acier-béton
- Résistances parasismique et incendie des structures en acier et mixtes acier-béton

PSM

Procédés et Systèmes
Mécaniques

- Comportement thermomécanique des matériaux sous sollicitation dynamique
- Simulation des procédés de mise en forme : usinage rapide, forgeage, extrusion
- Comportement dynamique et optimisation des robots manipulateurs parallèles
- Commande optimisée des systèmes mécaniques de production

MT Rhéo

Matériaux,
Thermo-Rhéologie

- Rhéométrie, rhéologie et tribologie des pâtes
- Formulation et mise en forme des bétons et mortiers, extrusion, synthèse des liants
- Altérabilité des composés cimentaires sous agressions chimiques et hautes températures
- Endommagement et visco-endommagement, rhéologie des bétons durcis
- Caractérisation thermo-hydrrique des matériaux de construction , comportement thermo-hydrrique des locaux, convection naturelle et mixte



Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique

- Investigations depuis 15 ans
 - Matériaux bio-sourcés (bauge, laine de chanvre, béton de chanvre...)
 - Formulation (en lien avec la méthode de mise en œuvre)
 - Caractérisation mécanique (échelle du matériau)
 - Caractérisation hygrique et thermique (échelle du matériau)
 - Comportement hygrothermique (échelle de la paroi)
 - Analyse de cycle de vie





Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique



- Projet ANR Béton Chanvre (2006-2010)



- Projet PRIR Ecomatx (2006-2010)



- Projet Européen ISOBIO (2015-2020)



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement N° 636835.

- 3 thèses soutenues
(F. COLLET 2004, J. CHAMOIN 2013, Y. AIT OUMEZIANE 2013)
- 2 thèses en cours
(B. MAZHOUD oct. 2014, L.M. THIEBLESSON janv. 2015)
- 7 Masters
(X. BIHAN 2007, J. CHAMOIN 2008, C. GARNIER 2010, TRINMIN 2010,
G. BONDA KOUKAM 2012, B. MAZHOUD 2014, M. LAARADH 2015)



Contexte et enjeux

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Qualité environnementale des bâtiments
 - limiter les impacts du bâtiment sur l'environnement extérieur
 - créer un environnement intérieur satisfaisant
- Grenelle de l'environnement (2007)
 - Biomatériaux dans le bâtiment (engagement n°9)
 - Objectif : 10% de matériaux bio-sourcés dans le bâtiment pour 2020 (hors bois d'œuvre)
 - ⇒ Enjeux environnementaux
 - ⇒ Performances techniques et fonctionnelles



Contexte et enjeux

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



isolants

(laines de fibres végétales ou animales, de textile recyclé, ouate de cellulose, chènevotte, anas, bottes de paille, etc.),

mortiers et bétons

(béton de chanvre, de bois, de lin, etc.),



Matériaux bio-sourcés dans le bâtiment

(hors bois d'œuvre)

matériaux composites plastiques

(matrices, renforts, charges),

chimie du bâtiment

(colles, adjuvants, peintures, etc.),

panneaux

(particules ou fibres végétales, paille compressée, etc.),



Peinture Algo



Heraklith



Bétons de granulats bio-sourcés



Formulation et mise en oeuvre

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Composition

- Granulat bio-sourcé



- Liant



- Eau



- Mélangeage

- bétonnière
- vis mélangeuse,
- malaxeur...



- Mise en forme

- moulage simple
- moulage par compaction
- projection





Masse volumique et porosité

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

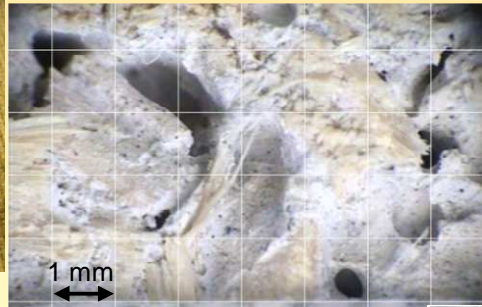
Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

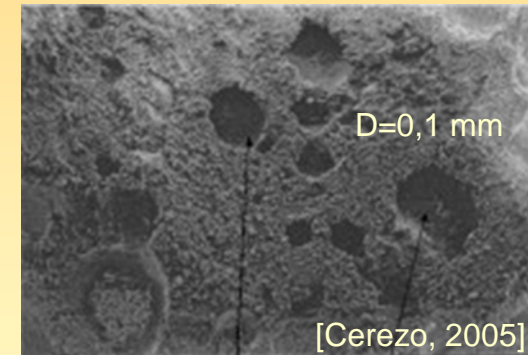
- Masse volumique moyenne (BC : 300 à 800 kg/m³)
- Porosité élevée (BC : 60 à 85 %)
- Majoritairement ouverte
- Présence de macro et micro porosité



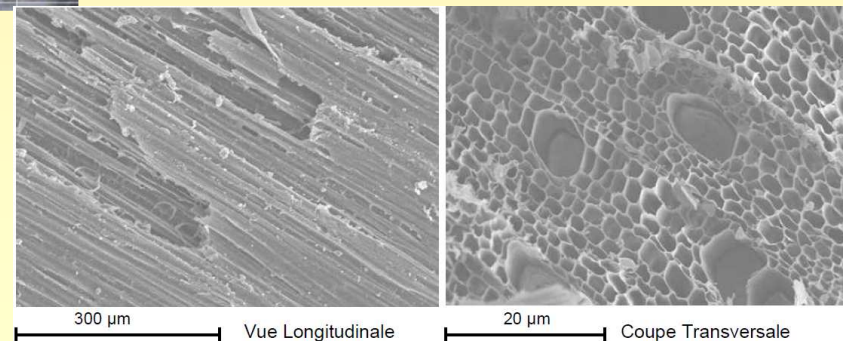
Macroporosité inter particules



Porosité du liant



Porosité des chènevottes



[Chamoïn et al., 2011]



Propriétés thermiques

Contexte et enjeux

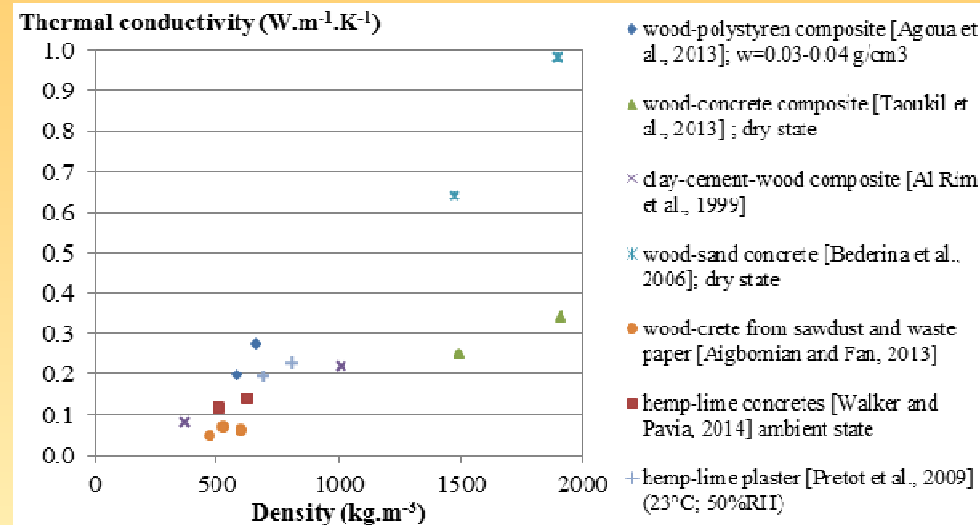
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

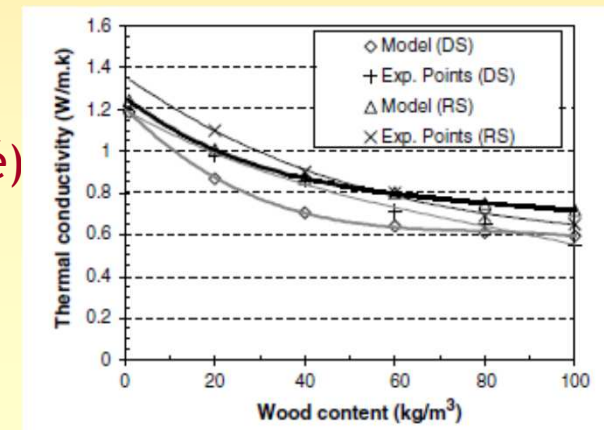
Bilan et perspectives

- Conductivité thermique très faible à moyenne



Fonction

- de la masse volumique
- du ratio granulats bio-sourcés / liant
- du type de granulats (ex. fibré/défibré)
- du type de liant
- de l'anisotropie
- de la teneur en eau...



[Bederina et al., 2007]



Propriétés hydriques

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

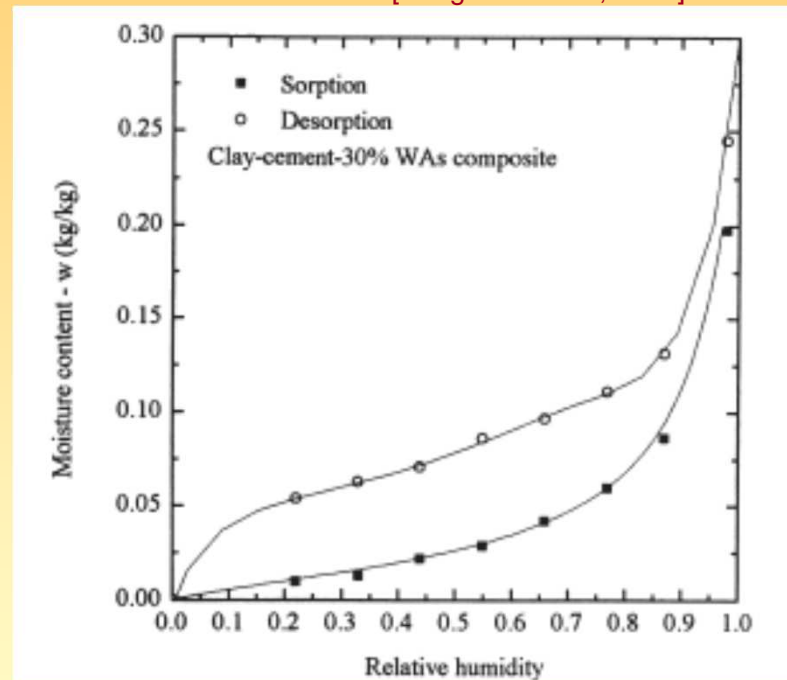
Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

• Isothermes de sorption

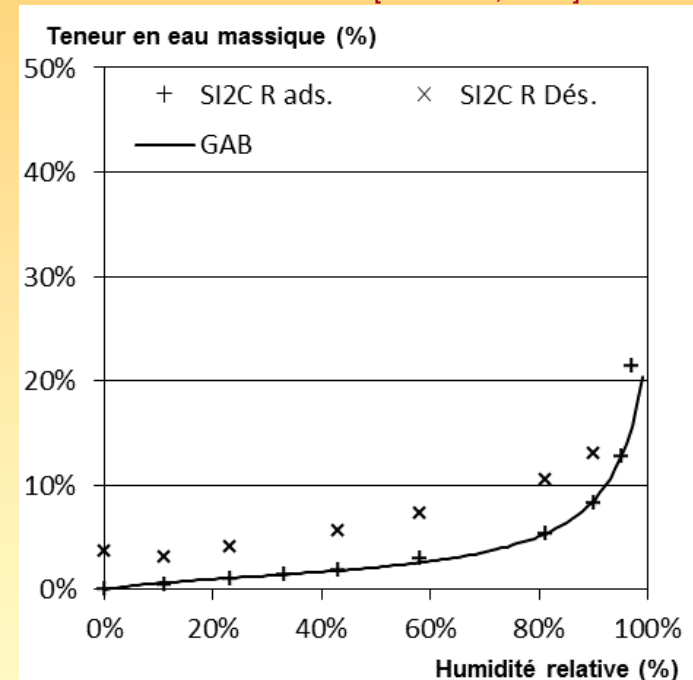
Argile-Ciment-Bois 30%

[Bouguerra et al., 1999]



Béton de chanvre

[Chamoïn, 2013]



- Matériaux très hygroscopiques
- Hystérésis sur tout le domaine



Propriétés hydriques

Contexte et enjeux

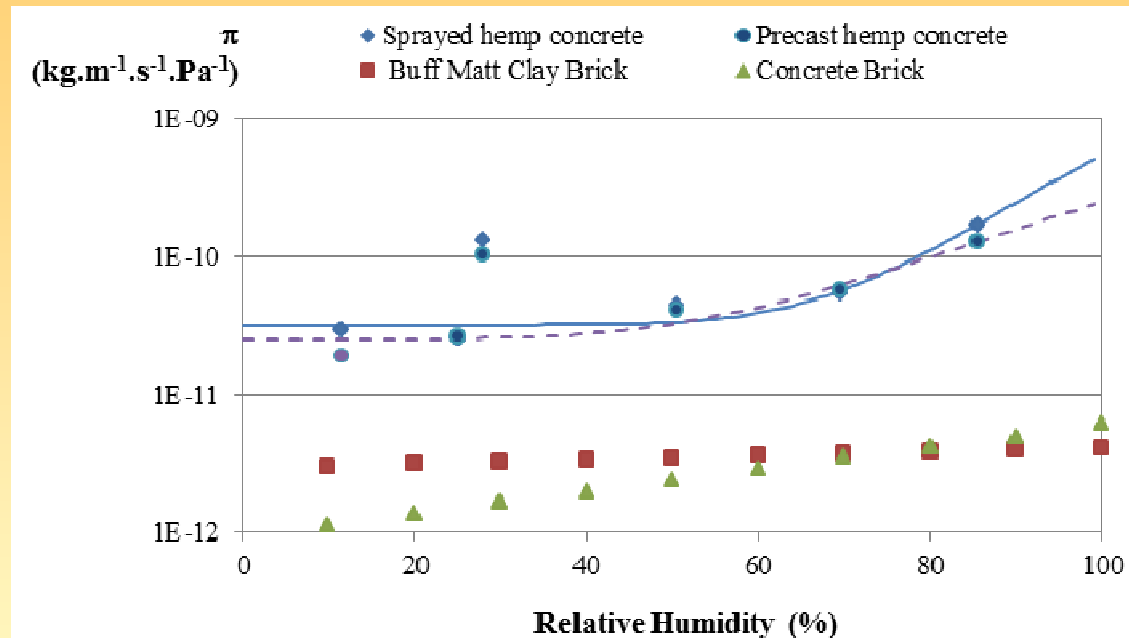
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Perméabilité à la vapeur



- Augmentation de la perméabilité avec l'hygrométrie (ie la teneur en eau du matériau)
- Mesures à la méthode de la coupelle, calcul prenant en compte la résistance de la lame d'air
- Porosité élevée \Rightarrow imprécision



**Caractérisation hygrique
en régime dynamique ,
conditions isothermes
de bétons de chanvre**

Caractérisation hygrique - Mesure en régime dynamique

Valeur tampon hydrique (MBV)

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

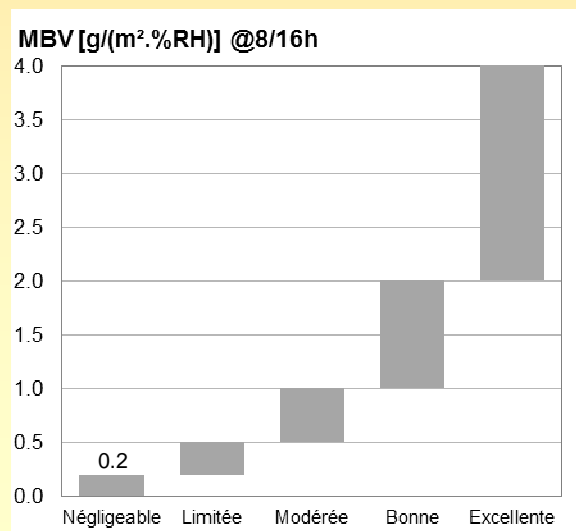
Bilan et perspectives

• NORDTEST Project

- Valeur tampon hydrique (MBV) :
capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant
- Exposition des échantillons à des cycles d'humidité relative journaliers (8/16h @ absorption/désorption)

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_{haute} - HR_{basse})}$$

- Round Robin test (différents matériaux) ⇒ Classification



- Armoire climatique Vötsch VC4060
- Enregistrement de l'ambiance (sensirion SHT75)
- Suivi massique : absorption 5 pesées, désorption 8



Matériaux / complexes étudiés

Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Campagne 1 : Béton de chanvre
 - Échantillons étanchés sur toutes les faces sauf une
 - Surface d'échange $\approx 14 \times 14 \text{ cm}^2$
 - Hauteur des échantillons : 7 à 8 cm
 - (> hauteur de pénétration estimée)
 - Nombre d'échantillons : 6



- Campagne 2 : Béton de chanvre enduit

- 2 types d'enduit :
sable-chaux chanvre-chaux

- Épaisseur d'enduit : 1 cm





Caractérisation hygrique - Mesure en régime dynamique

Résultats sur du béton de chanvre

Contexte et enjeux

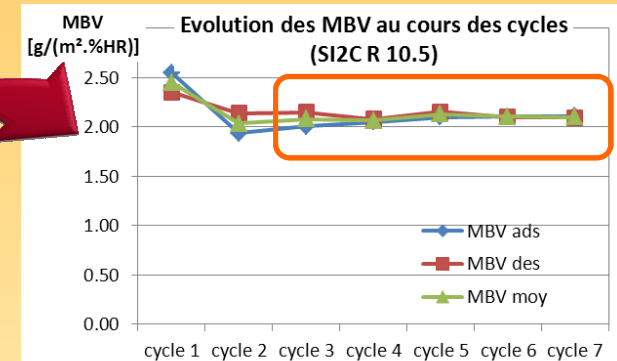
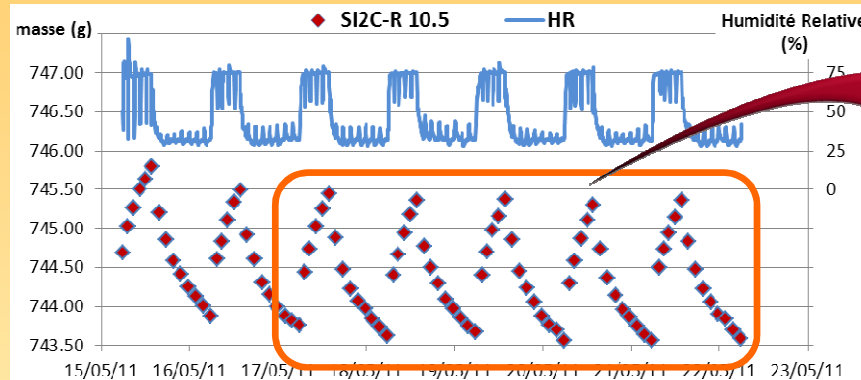
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

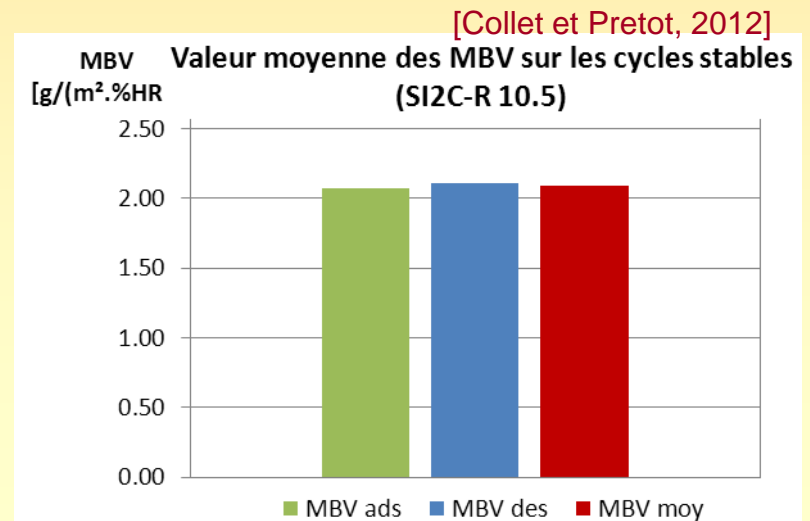
- Stabilité atteinte à partir du cycle 3



[Collet et Pretot, 2012]

- MBV_{moyen} sur 5 cycles et 6 éch. : $2,15 \text{ g}/(\text{m}^2.\%HR)$

↪ **Excellent**
régulateur hydrique



[Collet et Pretot, 2012]



Caractérisation hygrique - Mesure en régime dynamique

Effet de l'enduit

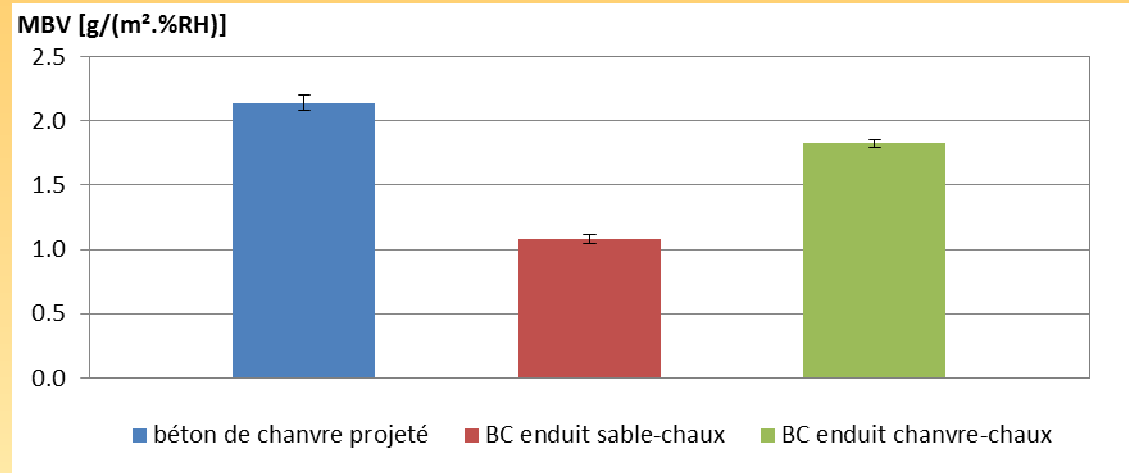
Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



- La mise en place d'enduit **réduit** la valeur MBV plus ou moins fortement, selon le type d'enduit

- Enduit chanvre -chaux : effet assez faible (1.82 g/(m².%RH))
- Enduit sable-chaux : effet plus important (1.08 g/(m².%RH))



Caractérisation hygrique - Mesure en régime dynamique

Discussion

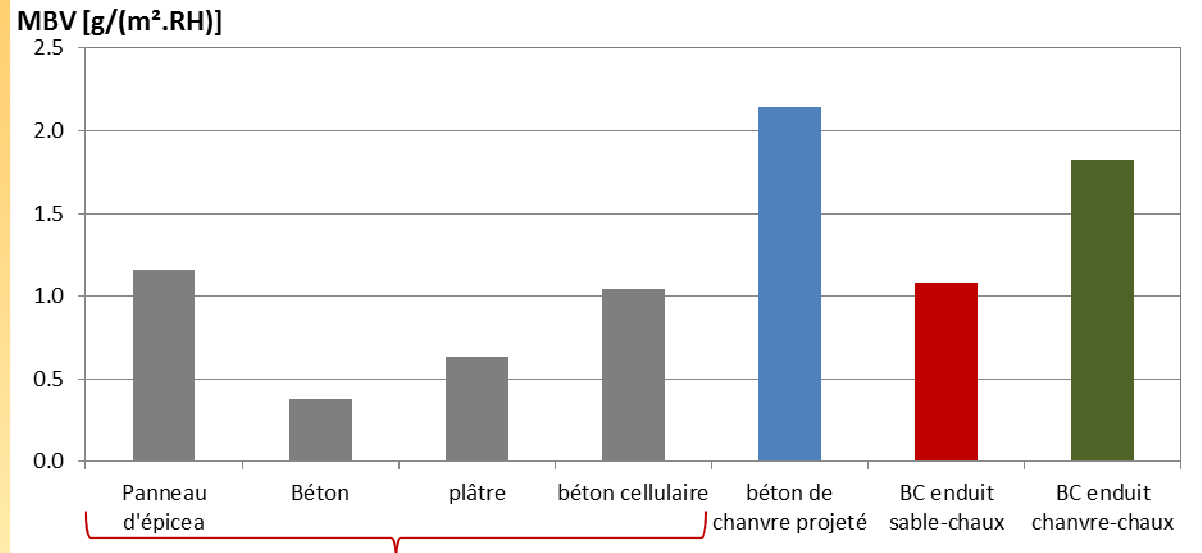
Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



NORDTEST Project

- Béton de chanvre : matériau performant même une fois enduit
- Comparaison au béton cellulaire :
 - Conductivité thermique comparable,
 - Plus grande capacité de régulation des variations d'hygrométrie ambiante



**Comportement
hygrothermique
à l'échelle de la paroi**



Dispositif expérimental

Contexte et enjeux

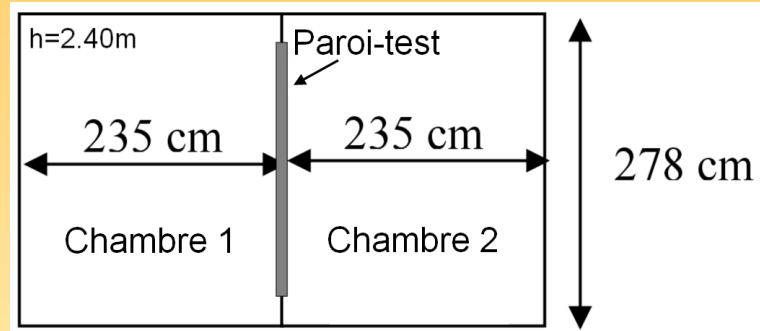
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

• Enceinte bi-climatique

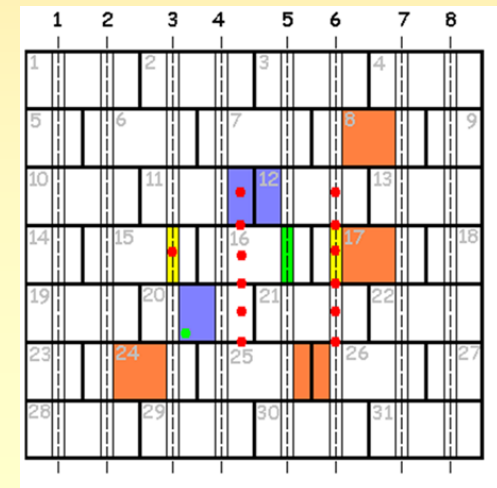


- murs et plafond : panneaux sandwich polyuréthane $e = 60 \text{ mm}$ ($U = 0,40 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
- sol : béton peint

	Chambre n°1 (intérieur)		Chambre n°2 (extérieur)	
	Plages	BP	Plages	BP
Température	18 à 27 °C	0,4 °C	-5 à 35 °C	1 °C
Hygrométrie	30 à 60 %	0,6 %	30 à 90 %	1,6 %

Instrumentation

- Thermocouples type K
- Sensirion SHT75





Conditions isothermes avec Gradient de Pression de vapeur

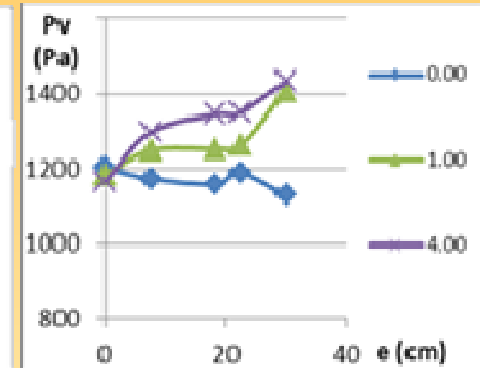
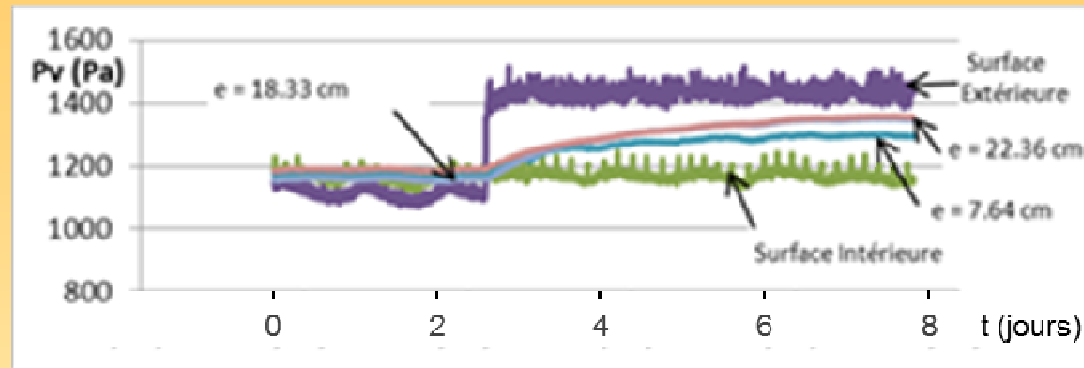
Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

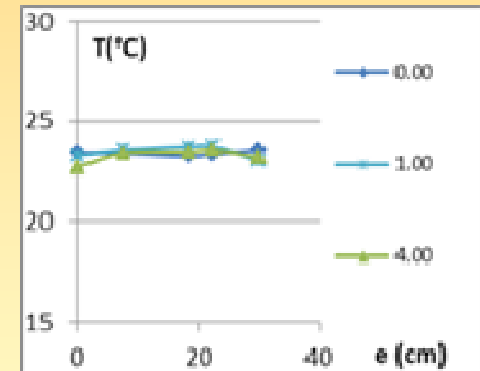
Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



- Conditions isothermes validées par l'évolution des profils de T.
- Evolution progressive de Pv dans l'épaisseur du mur, régime stationnaire à 7 jours
- Profil de Pv quasi constant à l'instant initial, tend vers une évolution linéaire



⇒ Diffusion homogène dans toute l'épaisseur



Gradient de Température et Pression de vapeur constante

Contexte et enjeux

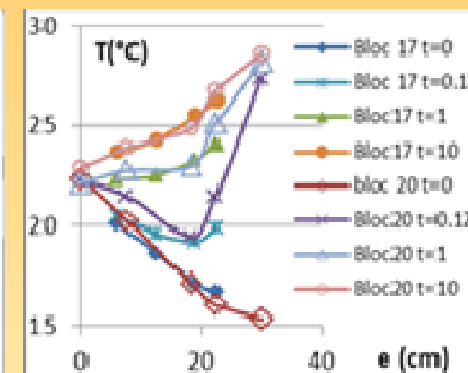
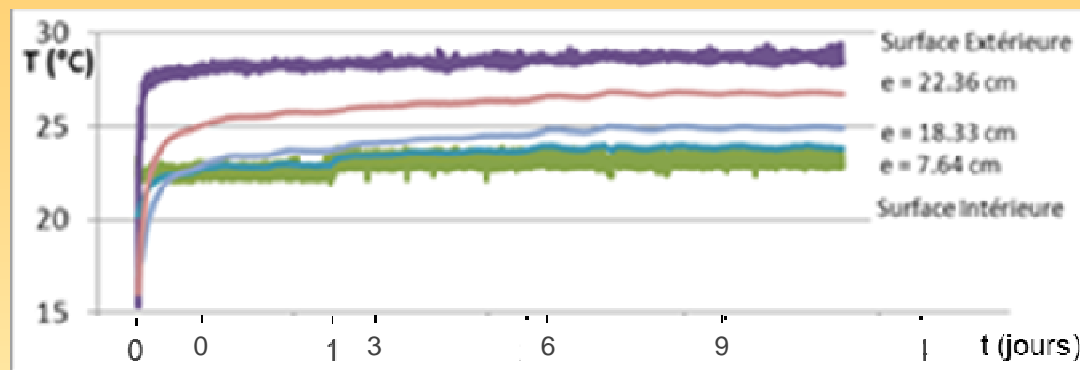
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Température



- Evolution rapide de T
- Profils initial et final linéaires
- Evolution la plus lente : au centre de la paroi

⇒ Propagation dans les 2 sens de la chaleur



Gradient de Température et Pression de vapeur constante

Contexte et enjeux

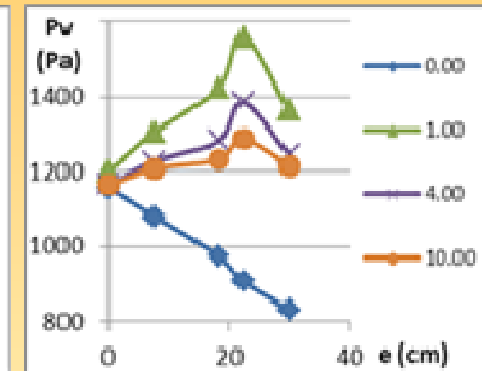
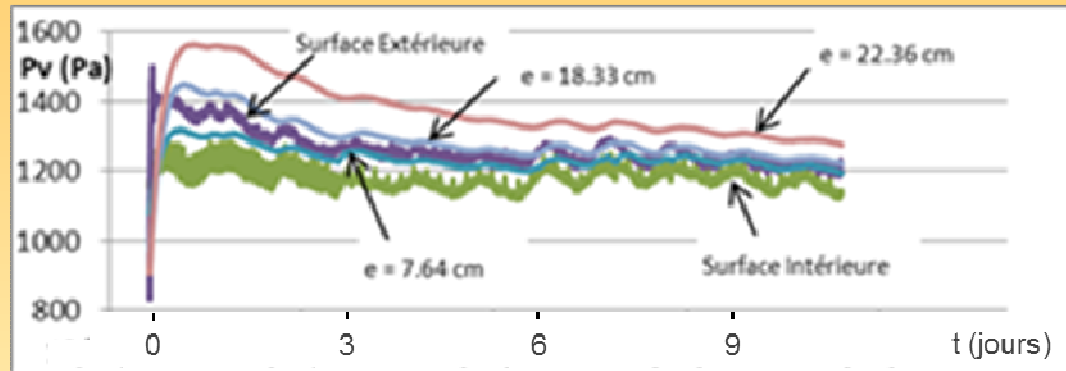
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Pression de vapeur



- Les P_v atteintes en ambiance ne sont pas exactement les consignes \Rightarrow faible ΔP_v intérieur-extérieur
- Evolution rapide de P_v
- Pic de P_v au sein de la paroi consécutif au changement d'ambiances
- $P_v > P_v$ ambiance

\Rightarrow Phénomène d'adsorption-désorption



Gradients simultanés de Pression de vapeur et de Température

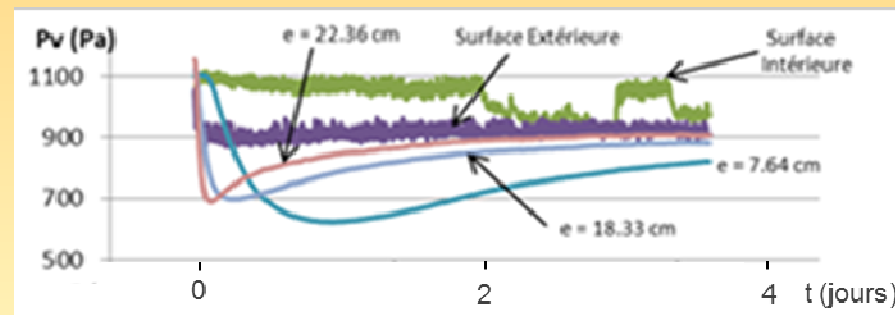
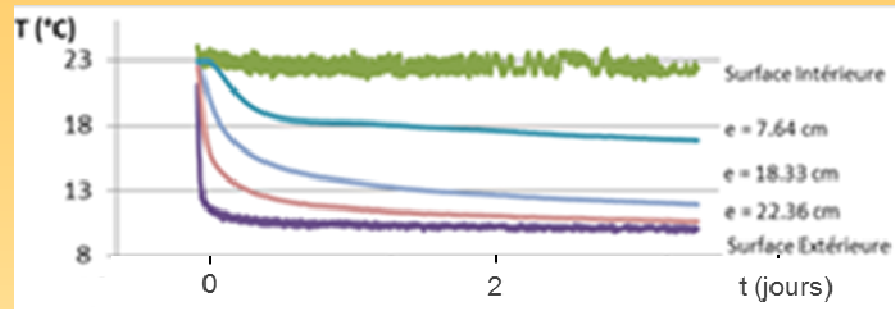
Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



- Chute rapide (puis remontée) de Pv au sein du matériau côté extérieur
- Même phénomène sur toute l'épaisseur avec un déphasage
- $P_v < P_v$ ambiance

⇒ Phénomène d'adsorption-désorption

Effet de l'enduit sur le comportement hygrothermique de la paroi

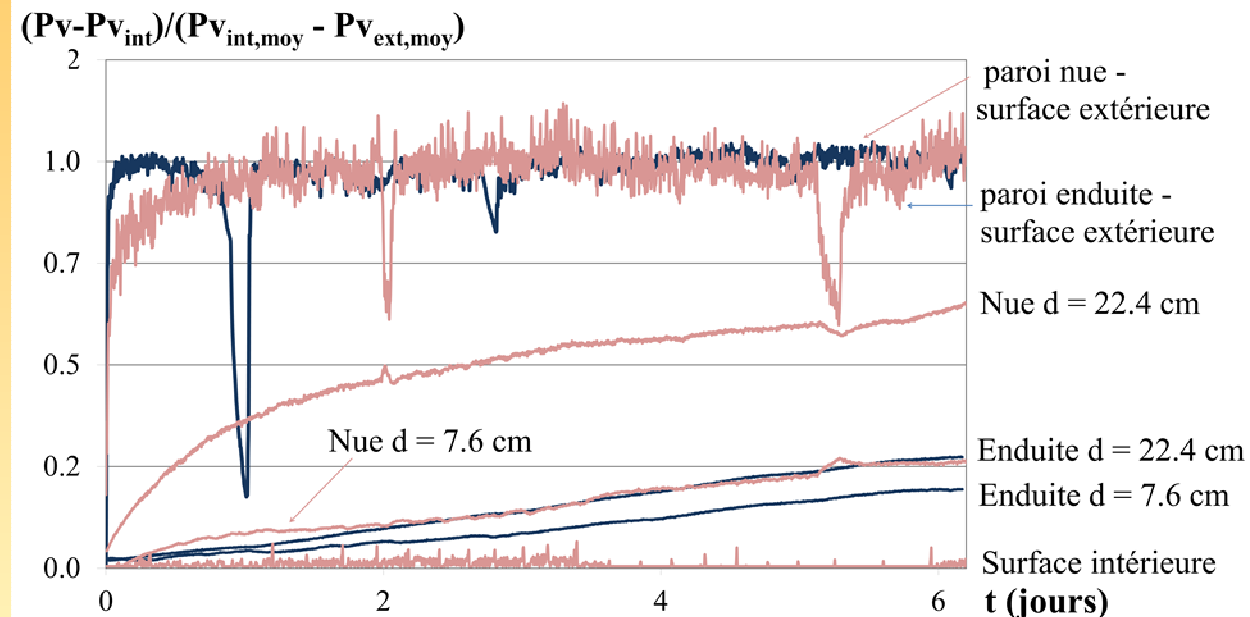
Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives



- Pression de vapeur + faible au sein de la paroi enduite
- Pente de la cinétique + faible au sein de la paroi enduite
- La présence d'enduit limite et retarde le flux de vapeur, sans empêcher les phénomènes d'adsorption-désorption au sein du béton de chanvre



Bilan et perspectives



Bilan

Contexte et enjeux

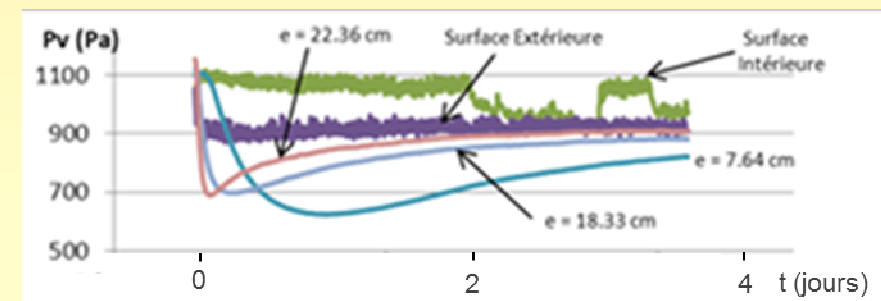
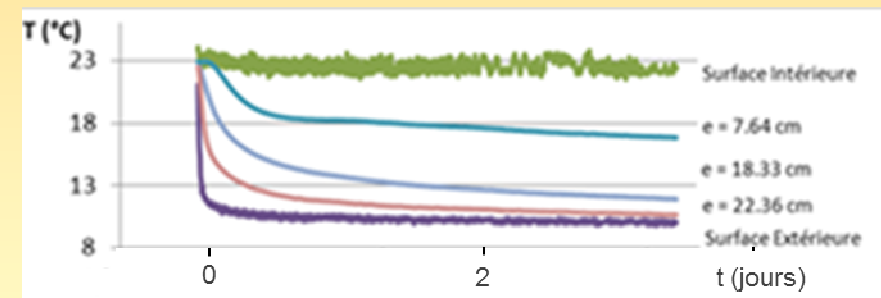
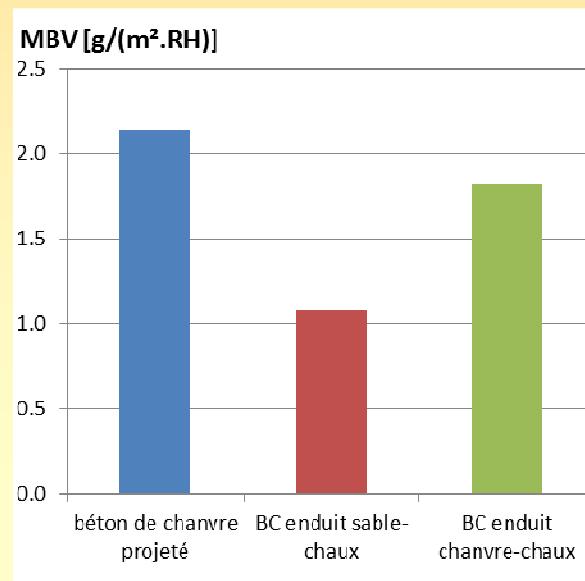
Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Béton de chanvre = excellent régulateur hygrique
- Effet de l'enduit plus ou moins marqué selon le type d'enduit
- Paroi en béton de chanvre = lieu de transfert et stockage de chaleur et d'humidité
 - ↳ Mise en évidence des phénomènes d'adsorption-désorption au sein de la paroi



Perspectives



Contexte et enjeux

Bétons de granulats bio-sourcés

Caractérisation hygrique en régime dynamique, conditions isothermes de bétons de chanvre

Comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Bilan et perspectives

- Méthode de caractérisation des matériaux bio-sourcés
 - TC Rilem BBM
 - Constructions et Bioressources



- Développement de matériaux bio-sourcés et/ou recyclés
 - Projet européen ISOBIO
 - Thèse de Brahim Mazhoud
 - Thèse de Lydie Thiebleson



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement N° 636835.