

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES
DE STRASBOURG
GENIE CLIMATIQUE ET ENERGETIQUE

SYNTHESE

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMIQUES
ET HYDRIQUES DU PISE, SIMULATIONS NUMERIQUE ET
EXPERIMENTALE DE SON COMPORTEMENT FACE A LA
MIGRATION D'HUMIDITE.

Projet de Fin d'Études réalisé à Nunc Architectes
par Nadège FREY

Tuteur institutionnel : Alain TRIBOIX
Tuteur entreprise : Louis PICCON

Juin 2011

FICHE D'OBJECTIFS DU PROJET DE FIN D'ETUDES.
GENIE CLIMATIQUE ET ENERGETIQUE 2011.
INSA DE STRASBOURG.

Étudiant : Nadège FREY

Tuteur institutionnel : M. Triboix (INSA)

Tuteur entreprise : M. Piccon (nunc architectes), suivi scientifique M. Creton (Gest'Energie).

SUJET :

Détermination des caractéristiques thermiques et hydriques du pisé, simulations numérique et expérimentale de son comportement face à la migration d'humidité.

CONTEXE :

L'agence nunc architectes est le maître d'œuvre du projet *La Nouvelle Maison Kœppel, Centre d'Interprétation du Patrimoine Archéologique* de Dehlingen. Le programme muséal sera accueilli dans une maison existante du XVII^{ème} et une extension en pisé. Pour atteindre les objectifs BBC, la partie existante sera isolée par l'intérieur. Dans la construction neuve, l'isolant sera placé entre deux murs de pisé. Le premier sera porteur, le second viendra en parement de façade. Une des préoccupations concernant ce projet est de connaître le comportement du mur face à la migration de l'humidité. Même si les sollicitations hydriques ne paraissent, à priori, pas poser de problèmes majeurs, il convient de comprendre les phénomènes mis en jeu, de s'assurer et de corroborer la durabilité du bâtiment.

OBJECTIFS :

Effectuer une recherche bibliographique sur les caractéristiques thermiques et hydriques de la terre crue et du pisé en particulier. Relever les conditions d'essais (auteur, état initial du matériau, technique expérimentale, métrologie, etc...). Recueillir les caractéristiques thermiques et hydriques d'une liste d'isolants. Constitution d'une base de données.

Déterminer par expérimentation les caractéristiques thermiques et/ou hydriques de la terre utilisée dans le projet. (Laboratoire de chimie de l'INSA et LGM de l'ENTPE; à confirmer).

Simuler le comportement hydrique du complexe mur-isolant avec WUFI à partir des données issues des expérimentations et/ou de la base de données bibliographique.

Définir un dispositif expérimental permettant de simuler et de mesurer la migration d'humidité à travers le complexe mur/isolant.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mon tuteur institutionnel M.Triboix pour le suivi et les conseils qu'il m'a apportés tout au long de mon projet de fins d'études. Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'INSA de Strasbourg, en particulier M.Denier, professeur de chimie, M.Boussehain, professeur en Génie Climatique et Energétique, M.Smigiel, professeur en Génie Electrique et M.Engel, professeur en Génie Mécanique pour les clarifications qu'ils m'ont données.

Je tiens à remercier mon tuteur d'entreprise M.Piccon, architecte et gérant d'agence, pour la confiance qu'il m'a accordée dès mon arrivée ainsi que tous les membres de Nunc Architectes pour m'avoir intégré pleinement à leur équipe. Je souhaite remercier particulièrement Mme.Hoppé pour son soutien.

Je remercie M.Creton, ingénieur et cogérant de Gest'Energie, ainsi que son équipe pour leur accueil et pour avoir mis à ma disposition leurs ressources numériques.

Je remercie M.Mesbah, chercheur au laboratoire LGM de l'ENTPE pour les explications qu'il m'a prodiguées et pour m'avoir permis d'assister aux essais de caractérisation de la terre. Je remercie chaleureusement Pierre-Antoine Chabriac, doctorant à l'ENTPE et Otman Elhajibi stagiaire à l'ENTPE pour l'aide précieuse et le temps qu'ils m'ont accordé.

Je remercie également Mme Thelier, de l'Agence Régionale de l'Innovation Alsace, d'avoir constitué le dossier prétendant à la subvention Prisme accordée par la Région Alsace.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, leurs conseils et leur soutien tout au long de ce stage.

RESUME

Le Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans une phase du projet de construction d'un Centre d'Interprétation du Patrimoine archéologique à Dehlingen par l'agence Nunc Architectes.

Ce rapport traite des transferts couplés de masse et de chaleur à travers une paroi composée, de l'intérieure vers l'extérieur : d'un mur porteur en pisé, d'une isolation et d'un second mur en pisé. Cette solution soulève les questions de la durabilité du bâti face aux sollicitations hydriques et de la dégradation des performances thermiques due à la présence d'eau au sein des matériaux.

Les phénomènes de fixation et de transport d'humidité au sein d'un matériau poreux sont complexes. Pour comprendre ces mécanismes, il faut changer d'échelle : partir d'une vue macroscopique du problème, la thermique du bâtiment, et zoomer jusqu'à l'échelle microscopique, la thermodynamique fondamentale.

La modélisation de ces mécanismes de transferts requière de poser de nombreuses hypothèses et de négliger certains phénomènes. Dans un second temps, pour pouvoir effectuer des simulations numériques, il faut connaître un certain nombre des propriétés thermiques et hydriques relatives au pisé. Très peu de ces données sont disponibles dans la bibliographie et elles ne sont pas transposables d'une terre à une autre.

La simulation du comportement thermo-hydrique du pisé nécessite donc une série d'essais expérimentaux. Les essais commandés au Centres d'Innovation et de Transfert Technologique d'Alsace, portant sur ces propriétés n'ont pas pu être réalisés avant la rédaction de cette synthèse.

L'utilisation du logiciel de simulation de transferts de masse et de chaleur comme WUFI.1D a pu illustrer le fait que les paramètres de base, eux même non connus avec précisions ne suffisent pas pour une utilisation adéquate de cet outil de simulation. L'utilisation de WUFI.1D est pour le moment prématurée. Des essais supplémentaires comme la détermination de la courbe de sorption et le coefficient de succion capillaire devront être menés.

Les résultats d'une future simulation des transferts de masse et de chaleur pourront nous renseigner sur les performances thermiques effectives de la paroi composite en pisé. L'évolution de la teneur en eau dans le temps devra être renvoyée au Laboratoire des Géomatériaux de l'ENTPE, compétent pour évaluer la durabilité du pisé.

Mots clé : *pisé, terre crue, transfert de masse, milieu poreux, WUFI, rammed earth, mass transfer, porous media, WUFI*

NOMENCLATURE

Symboles latins :

c	[mol.L ⁻¹]	concentration molaire de soluté
Cp_l	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	chaleur spécifique de l'eau liquide
Cp_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	chaleur spécifique du solide
$D_{l,\varphi}$	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité d'eau liquide sous gradient d'humidité relative
$D_{l,T}$	[kg.m ⁻¹ .K ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité d'eau liquide sous gradient de Température
$D_{l,T}$	[kg.m ⁻¹ .K ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité sous gradient de température
D_v	[m ² .s ⁻¹]	coefficient de diffusion de vapeur
D_{v0}	[m ² .s ⁻¹]	coefficient de diffusion de vapeur à l'air libre
$D_{v,\varphi}$	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité de vapeur sous gradient d'humidité relative
$D_{v,T}$	[kg.m ⁻¹ .K ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité de vapeur sous gradient de Température
D_φ	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	coefficient de diffusivité sous gradient d'humidité relative
d	[m]	diamètre des pores
e_a	[m]	épaisseur de la couche d'eau adsorbée
f_{LG}	[kg.m ⁻³ .s ⁻¹]	taux d'évaporation
g	[m.s ⁻²]	accélération de la pesanteur
J_l	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	densité de flux d'eau liquide
J_v	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	densité de flux de vapeur d'eau
K	[kg.m ⁻¹ .Pa ⁻¹ .s ⁻¹]	conductivité hydraulique
L	[m]	distance caractéristique macroscopique
L_v	[J.kg ⁻¹]	chaleur latente de vaporisation
K_n	[-]	nombre de Knudsen
L_{pm}	[m]	libre parcours moyen des molécules
P_a	[Pa]	pression de l'air dans le milieu poreux
P_0	[Pa]	pression atmosphérique
P_c	[Pa]	pression capillaire
P_l	[Pa]	pression d'eau liquide
P_v	[Pa]	pression de vapeur d'eau
P_{vs}	[Pa]	pression de vapeur saturante de l'eau
R	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	constante des gaz parfaits
r	[m]	rayon du pore
r_k	[m]	rayon du ménisque
S_r	[%]	degré de saturation
T	[K]	température
u_a	[m.s ⁻¹]	vitesse macroscopique de l'air

Symboles grecs :

φ	[%]	humidité relative
ψ	[m]	succion capillaire
κ_l	[m ²]	perméabilité intrinsèque à l'eau liquide
σ	[kg.s ⁻²]	tension superficielle
Λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	conductivité apparente
λ_s	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	conductivité sèche
π	[kg.m ⁻¹ .Pa ⁻¹ .s ⁻¹]	perméabilité à la vapeur d'eau
π'	[Pa]	pression osmotique
ρ	[kg.m ⁻³]	masse volumique du fluide
ρ_l	[kg.m ⁻³]	masse volumique de l'eau liquide
ρ_v	[kg.m ⁻³]	concentration de vapeur
ρ_{vs}	[kg.m ⁻³]	concentration de vapeur saturante
θ	[rad]	angle de mouillage
θ_l	[m ³ .m ⁻³]	teneur volumique en eau liquide
θ_v	[m ³ .m ⁻³]	teneur volumique en air
μ_l	[Pa.s]	viscosité dynamique
μ^G	[J.kg ⁻¹]	potentiels chimique de l'eau
μ^G	[J.kg ⁻¹]	potentiels chimique de l'eau
v	[m.s ⁻¹]	vitesse locale du fluide
ω	[kg.kg ⁻¹]	teneur en eau massique

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	8
1. UN STAGE INSCRIT DANS UN PROJET D'ENTREPRISE INNOVANT.	9
1.1 Un programme et un projet architectural en résonnance.....	9
1.2 Un projet novateur interpellant les connaissances communes.	12
1.3 Méthodologie de travail, interaction continue.	14
2. LE PISE, UN MATERIAU AJUSTABLE AUX EXIGENCES D'AUJOURD'HUI.	15
2.1 Introduction à la terre crue.	15
2.2 Mise en œuvre du pisé.....	17
2.3 Etat de l'art des connaissances.....	19
3. LA TERRE, UNE MATIERE GRAULAIRE AU COMPORTEMENT COMPLEXE.	20
3.1 Une matière issue de la pédogénèse.....	20
3.2 Une matière granulaire et cohésive.....	20
3.3 L'argile, un liant réactif.	21
3.4 Intérêts et procédés de stabilisation.	23
4. LES TRANSFERTS COUPLES D'HUMIDITE ET DE CHALEUR.	25
4.1 Pourquoi prendre en compte du transfert de masse à travers l'enveloppe ?	25
4.2 Les phénomènes de fixation et de transport d'humidité dans les matériaux poreux. ...	28
4.3 Modèle de transferts couplés de masse et de chaleur.....	33
4.4 Comment accéder aux propriétés hydriques du pisé ?	42
5. SIMULATION SUR WUFI .1D.....	44
5.1 Le modèle numérique.	44
5.2 La saisie du projet, plusieurs étapes, de nombreux éléments à approximer.....	45
CONCLUSION.	50
BIBLIOGRAPHIE.....	51
SOMMAIRE DES ANNEXES.....	53

INTRODUCTION

La consommation énergétique du bâtiment en France représente plus 40% de l'énergie finale consommée par notre pays.

De nombreux efforts ont été entrepris dans le domaine de l'équipement technique pour développer des installations efficaces, peu énergivores et recourant aux énergies renouvelables. Depuis une dizaine d'année, on assiste en effet au retour de ce type d'énergies, amorcées après le choc pétrolier de 1973, occasionnant la rédaction de la première réglementation thermique, puis délaissées subséquemment à la baisse du cours du baril. Le contexte énergétique et géopolitique mondial ne cesse de presser la compensation de ce retard.

Dans une même logique, le choix des matériaux de construction s'attarde davantage sur les qualités thermiques mais aussi sur les propriétés hydriques, l'énergie grise et l'impact environnemental du matériau.

L'agence Nunc Architectes s'inscrit dans cette démarche et remporte, en 2008, le concours lancé par la Communauté de Communes d'Alsace Bossue pour la construction à Dehlingen d'un Centre d'Interprétation du Patrimoine archéologique. Ce bâtiment, recevant du public, sera construit en pisé avec de la terre provenant d'une carrière située à 5 km du chantier.

Le pisé est une technique séculaire de construction en terre crue. La France dispose d'un important patrimoine dans la région du Dauphiné. Cependant, le savoir-faire a peu à peu disparu, et les connaissances qui ont été transmises, sont empiriques. Nos sociétés actuelles ont des exigences différentes. Nous évoluons dans un cadre juridique qui a pour but d'assurer la sécurité des personnes et de leurs biens. Légitimement ce projet soulève des interrogations, des inquiétudes. Le bureau d'études en charge du projet demande des éclaircissements et des garanties avant d'engager sa responsabilité. Les sollicitations hydriques vont-elles diminuer la résistance et la durabilité de la structure ?

Le projet de Dehlingen est subventionné par la Région Alsace dans le cadre du programme Energivie. Le bâtiment doit répondre aux exigences de la RT 2012. Le pisé bénéficie d'une grande inertie mais d'une résistance thermique insuffisante. Les maîtres d'œuvre ont donc conçu une paroi « sandwich », composée d'une isolation enserrée entre deux murs de pisé. Les transferts d'humidité vont-ils dégrader les performances thermiques du bâtiment de manière significative ?

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans un projet architectural bien réel. Afin d'appréhender la problématique posée par le projet, il est essentiel de comprendre au préalable, à travers une présentation générale, ses fondements et les acteurs qui y participent.

Avant de chercher des éléments de réponse, nous allons revenir sur le renouveau de la construction en terre crue, sur le patrimoine mondial et sur la technique du pisé. Nous nous pencherons ensuite sur cette matière première afin de connaître ce qui la caractérise.

La simulation thermique dynamique traditionnelle ne prend pas en compte le transport de masse. Pourtant ces deux transferts sont fortement couplés et l'accumulation d'eau au sein du matériau abaisse la résistance thermique de la paroi. Nous présenterons dans un premier temps les phénomènes de fixation et de transport d'humidité dans les matériaux poreux. Nous verrons ensuite, à travers un modèle d'équations couplées, les paramètres à connaître pour effectuer les simulations numériques. Enfin, aux vues des données et des connaissances dont nous disposons actuellement, nous estimerons si l'utilisation d'un logiciel de modélisation de transferts de masse et de chaleur comme WUFI.1D est opportune. En conclusion nous apporterons des propositions afin de préparer la poursuite de l'étude et du projet.

1. UN STAGE INSCRIT DANS UN PROJET D'ENTREPRISE INNOVANT.

1.1 Un programme et un projet architectural en résonance.

La Communauté de Communes d'Alsace Bossue s'engage dans une démarche de valorisation de son patrimoine historique et architectural. En 2008, elle lance un concours pour la construction d'un Centre d'Interprétation du Patrimoine archéologique (CPI) et retiendra Nunc Architectes pour la maîtrise d'œuvre et la scénographie.

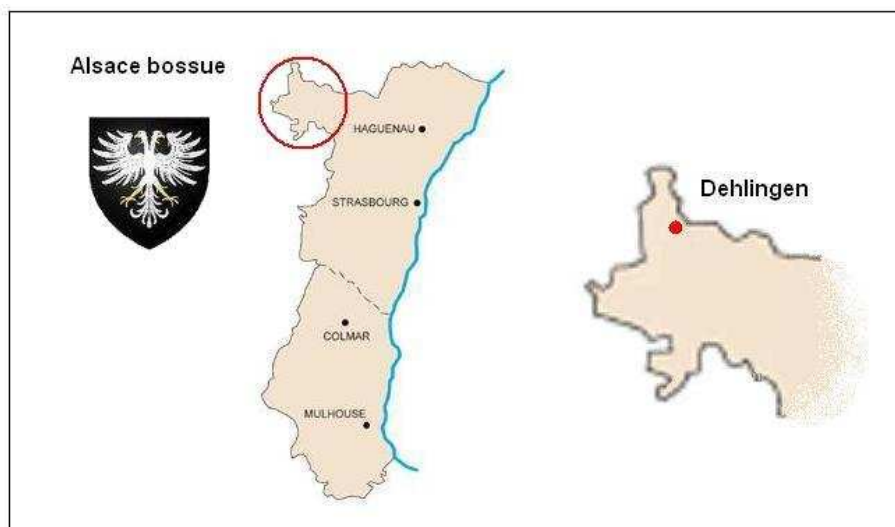


Figure 1 Dehlingen, village d'Alsace Bossue.

A proximité de Dehlingen se trouvent les vestiges d'une villa gallo romaine datant du I^{er} siècle après J.C. Le site archéologique, faisant encore l'objet de fouilles, est accessible du village par un sentier. Des visites, des animations, et des séjours d'initiation à l'archéologie y sont organisés.



Figure 2 Site archéologique de Dehlingen.

Le CPI sera un espace d'exposition pédagogique, un lieu d'échange entre les archéologues et le public. L'implantation du projet au cœur du village pourra être l'occasion d'un aménagement de l'espace le reliant à l'église et à la mairie.



Figure 3 Plan masse du projet CPI, Dehlingen.

Le CPI occupera la maison Koeppel datant du XVII^{ème}, qui sera réhabilitée, et dotée une extension.

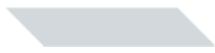


Figure 4 Maison Koeppel, façade nord.



Figure 5 Maison Koeppel, façade sud.

Le parti pris des architectes est de conserver la maison Koeppel, de la réhabiliter sans dénaturer son identité XVII^{ème}.



L'existence avérée d'une maison gallo-romaine à l'emplacement du projet, l'ancre dans une connexion symbolique avec l'époque mise à l'honneur par le CPI.



Les deux corps du bâtiment se font face, de part et d'autre d'une faille de lumière. Plusieurs époques dialoguent.



Les deux entités sont unies sous un même toit, lequel reprend la tradition alsacienne de charpente à fermes sans pannes faitières, à travers la technologie du bois actuelle.

Figure 6 Schéma concept.

Le point phare de ce projet est l'utilisation du pisé pour la construction de l'extension. Les différentes strates engendrées par la mise en œuvre lui confèrent une esthétique brute qui rend pleinement écho aux strates archéologiques, à l'idée de creuser, de fouiller et pénétrer au fond des âges.

Il est important pour l'ingénieur de comprendre le concept qui fait l'essence du projet architectural, l'idée sur lequel il repose et qui lui donne sens afin de travailler en toute intelligence avec les architectes.



Figure 7 Texture en strates du pisé.

1.2 Un projet novateur interpellant les connaissances communes.

Le projet de Dehlingen réactualise l'utilisation du pisé dans un bâtiment recevant du public. Cette démarche soulève des questionnements de la part du bureau de contrôle.

Le bureau de contrôle est une entreprise habilitée à assister, sur contrat, des maîtres d'ouvrage ou maîtres d'œuvre. Il vérifie d'une part, la conformité des solutions proposées par les architectes et les bureaux d'études avec la réglementation en vigueur et d'autre part, leur mise en œuvre sur chantier. Le bureau de contrôle, en intervenant, engage sa responsabilité au même titre que la maîtrise d'œuvre. Son rôle est d'assurer la solidité et la salubrité des bâtiments et la sécurité des personnes.

Une question qui peut légitimement être posée est la durabilité et la stabilité à l'eau d'un mur en pisé. Est-ce que face aux intempéries et aux sollicitations hydriques le mur répondra aux exigences mécaniques ? Le fera-t-il sur la durée ?

La Région Alsace a lancé depuis 2003 Energivie, un vaste programme de promotion des économies d'énergies et des énergies renouvelables. Pour prétendre à une subvention, le projet de Dehlingen doit répondre aux exigences de la RT 2012. Pour une paroi en contact avec l'extérieur en zone H1b, la valeur de référence est $2,05 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$ et la valeur garde-fou $2,05 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$.

Le pisé possède une très grande inertie thermique et hydrique, et participe ainsi au confort des occupants. Cependant sa résistance thermique reste faible. La conductivité thermique du pisé s'apparente à celle des bétons lourds. Elle prend différentes valeurs autour de $1 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ selon la densité de la matière. Pour être au dessus de la valeur garde-fou, il faudrait un mur de plus de 2 m d'épaisseur, ce qui n'est bien entendu pas envisageable. La solution retenue par les architectes est la conception d'une paroi « sandwich ».

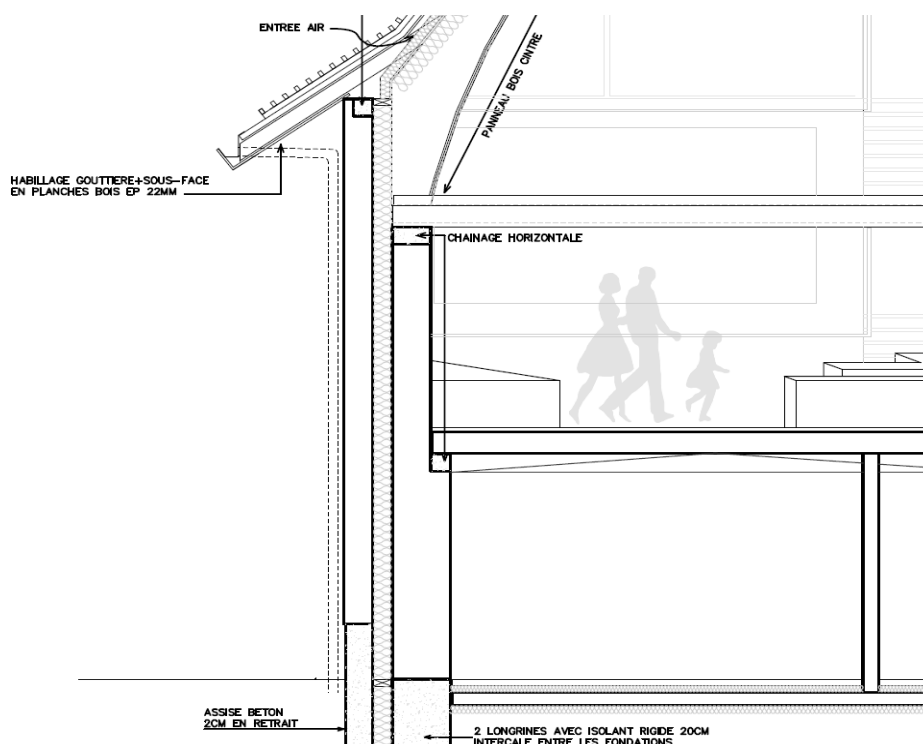
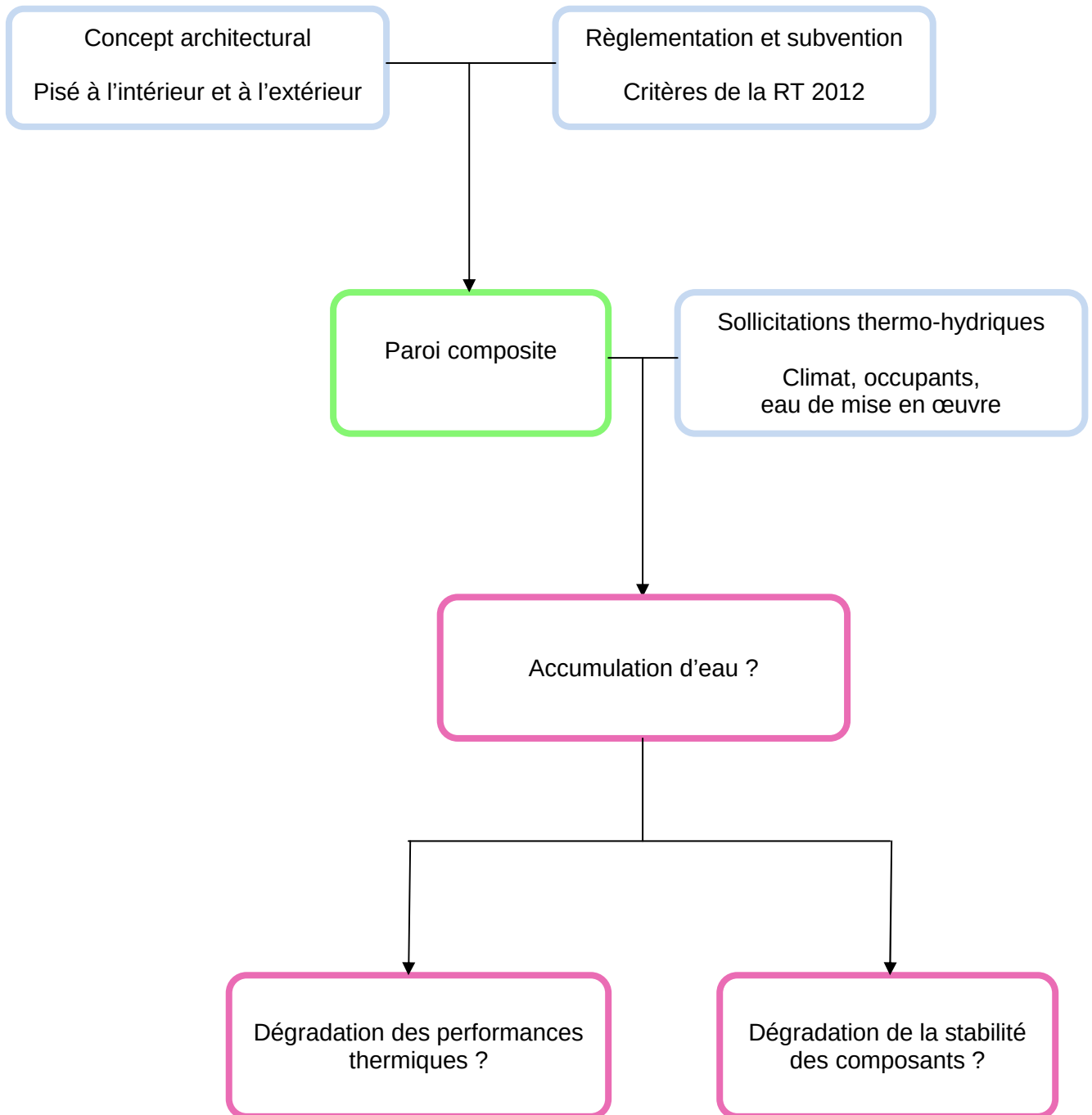


Figure 8 Extension, détails de la coupe transversale.

Le mur intérieur en pisé porte les deux étages de la structure. L'épaisseur du mur diminue à chaque niveau où un chaînage béton supporte le plancher. Un second mur en pisé vient en parement de façade. Une isolation est posée entre ces deux parois. L'isolation est « intermédiaire ».

L'objet de ce stage est d'apporter des éléments dans le but de prévoir le comportement de la paroi composite face aux sollicitations thermo-hydriques et si une dégradation de la performance énergétique ou de la stabilité de la matière est à craindre.



Pour répondre à la première question, il faut connaître bien-entendu les sollicitations thermo-hydrauliques, mais surtout les propriétés de la paroi. Or les caractéristiques thermiques et hydriques du pisé sont mal connues. Il faut également disposer d'un outil de simulation des transferts couplés de masse et de chaleur, comprendre son fonctionnement et ses limites.

Pour interpréter les résultats correctement et répondre aux questions de la dégradation des performances et de la durabilité de la paroi, il est nécessaire de connaître les phénomènes de migration de l'humidité et de comprendre le comportement de la matière.

1.3 Méthodologie de travail, interaction continue.

1. Le stage a débuté par la compréhension du projet dans son assemble :

- le contexte
- le programme
- le concept architectural
- les contraintes règlementaires
- les contraintes techniques

2. Le premier travail fut une recherche documentaire portant sur :

- la construction en terre crue
- la technique du pisé
- la recherche de paroi composite similaire
- les phénomènes de migration de l'humidité
- les modèles de transferts couplés
- la matière terre et ses caractéristiques

Concernant les propriétés thermiques et physico-chimiques du pisé, peu de données fiables sont disponibles dans la bibliographie. Les documents pertinents révèlent la spécificité de chaque pisé selon la granularité de la terre, la nature de l'argile, la nature du stabilisants et la mise en œuvre (énergie de compactage, TEO). Les résultats issus de la bibliographie ne sont pas transposables d'un pisé à un autre. Cette conclusion amène la phase suivante du projet de fins d'études.

3. La détermination des caractéristiques thermiques et hydriques du pisé de Dehlingen a nécessité les tâches suivantes :

- la recherche des normes correspondantes
- les demandes de devis auprès de laboratoires
- la commande d'essais au LGM de l'ENTPE (résultats partiels)
- participation aux essais de granulométrie et de sédimentométrie au LGM de l'ENTPE
- la commande d'essais au CRITT Alsace (démarrage des essais : attente de l'envoi des éprouvettes par l'ENTPE)
- la réflexion sur l'élaboration d'un dispositif expérimental du type double enceinte climatique.

La réalisation des essais a subi des contretemps, très peu de résultats sont disponibles à l'heure actuelle. Les réflexions sur le dispositif expérimental n'ont pas été concluantes. La phase de simulation numérique est tout de même entreprise en approximant les données.

4. L'étape de simulation s'est composée des tâches suivantes :

- maniement du logiciel WUFI 2D aux bureaux de Gest'Energie (problème de compatibilité informatique de certains outils)
- maniement d'un programme Excel interne à l'INSA en cours de validation (problème de compatibilité informatique)
- maniement du logiciel WUFI 1D aux bureaux de Gest'Energie

Cette phase nécessite encore d'être poursuivie. Néanmoins, on peut avancer qu'il est essentiel de connaître d'autres paramètres pour réaliser une simulation correcte. Le logiciel WUFI 1D requière des paramètres de base et des paramètres additionnels. Ces derniers paramètres sont primordiaux pour modéliser les transferts couplés au sein d'un matériau hygroscopique comme le pisé. Ces données sont très délicates à approximer. D'autres essais seront nécessaires pour réaliser des simulations avec le logiciel WUFI 1D notamment pour déterminer l'isotherme d'adsorption et de désorption et la courbe de succion capillaire. La répartition porométrique déterminée par la méthode du porosimètre à mercure serait également intéressante à connaître.

2. LE PISE, UN MATERIAU AJUSTABLE AUX EXIGENCES D'AUJOURD'HUI.

2.1 Introduction à la terre crue.

La construction en terre crue rencontre un regain d'intérêt dans les pays dit industrialisés. Plusieurs motifs en sont à l'origine. Les effets de l'activité des hommes sur l'environnement deviennent de plus en plus préoccupants pour la qualité et la pérennité de la vie sur terre. La conscience de la nécessité d'agir vite et en profondeur commence à s'immiscer dans les esprits. Les pouvoirs publics comme les citoyens prennent des initiatives pour maîtriser leur consommation de ressources naturelles et leur impact sur la nature. Cette démarche se heurte à l'inertie des sociétés dans lesquelles nous vivons et aux lobbies qui pèsent sur elles. Néanmoins, le processus est amorcé, se renforce et s'amplifie peu à peu.

Le bâtiment consomme chaque année environ 70 Mtep (dont 49 Mtep pour le chauffage), soit 43% de la consommation d'énergie finale en France et rejette 100 Mtéq de CO₂ (dont 77% pour le chauffage).

De nombreux efforts ont été entrepris pour développer des équipements efficaces et peu énergivores. Notamment dans les domaines du chauffage, de la climatisation, de la ventilation et de l'éclairage. Depuis peu, on apporte un soin particulier à la conception et la mise en œuvre de l'enveloppe des bâtiments.

Les pays scandinaves et germaniques élaborent de nouveaux modes constructifs pour soigner l'étanchéité à l'air. Les « nouvelles » technologies, datant tout de même des années 70, exploitant les énergies solaire, éolienne ou houlomotrice sont perfectionnées et démocratisées.

Par ailleurs on redécouvre l'usage de la terre dans la construction. Actuellement, près d'un tiers de la population mondiale vit dans un habitat en terre crue. Ce matériau se présente sous diverses formes et s'utilise pour une grande variété de composants constructifs.

La terre crue s'emploie sur tous les continents, sous différents climats, du bâtiment le plus modeste au palais le plus sophistiqué. Ci-après quelques images du patrimoine mondial en terre crue.



Figure 9 Ville de Shibam, Yémen.



Figure 10 Pont, ville d'Isfahan, Iran.



Figure 11 Grande mosquée de Djenné, Mali.

La capacité de la terre crue à réguler l'hygrométrie et sa très grande inertie en fait un matériau idéal pour le confort climatique. La terre crue n'est pas aussi isolant que le bois. Sa conductivité thermique, inférieure à celle des pierres (grès, granite, calcaire, gneiss) se rapproche de celle du béton lourd. On peut augmenter la résistance thermique d'un mur en terre en y incorporant des fibres végétales comme la paille ou le chanvre.

Le concept d'énergie grise est apparu dans les années 70 mais c'est depuis quelques années qu'on raisonne en termes d'énergie globale. Considérer l'énergie grise des matériaux de construction, c'est en plus de leurs performances, de leur absence de nocivité et de leur prix, prendre en compte leur impact sur l'environnement. L'analyse des Cycles de Vie (ACV), encadrées par les normes européennes 14040 et 14044, évalue les impacts environnementaux pour les aspects écologiques, économiques, sociaux culturels d'un produit ou d'un procédé de l'extraction des matières premières au recyclage du produit fini. La construction en terre crue est un mode constructif qui requiert peu de transformation de la matière première, qui est prélevée dans les ressources locales parfois sur le site même du chantier, sous-produit de la phase de terrassement.

2.2 Mise en œuvre du pisé.

La technique du pisé sera mise en œuvre dans le projet de Dehlingen. Cette méthode consiste à compacter de la terre humide dans un coffrage à l'aide d'une dame mécanisée. La terre utilisée est extraite de la carrière de Lorentzen à 5 km du chantier. Elle est d'abord préparée avant d'être damée dans un coffrage.

Le criblage permet d'éliminer les cailloux dont le diamètre est supérieur à 50 mm.

La terre est ensuite pulvérisée pour broyer les agrégats.

Dans le cas de Dehlingen, on réalise le mélange suivant :

- terre de la carrière
- 2% de chaux aérienne éteinte
- 2% de ciment CPA
- teneur en eau optimale (TEO) de 11,9% pour $\rho_s = 1860 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ (porosité p 29%)
24% pour $\rho_s = 1600 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ (porosité p 39 %)

Une couche de terre humide homogénéisée est placée entre deux banches, similaires à celles utilisées pour le coffrage du béton. Elle est compactée à l'aide d'une dame pneumatique (ou manuelle sur certains chantiers). L'énergie requise dans le cas du projet de Dehlingen n'a pas à ce jour été communiquée par l'ENTPE. L'opération est réitérée jusqu'au sommet du coffrage. Un coffrage continu sera mis en œuvre sur le chantier de Dehlingen. La texture présentera alors une meilleure esthétique et l'on s'affranchira du traitement des joints entre les banchées, à la chaux.

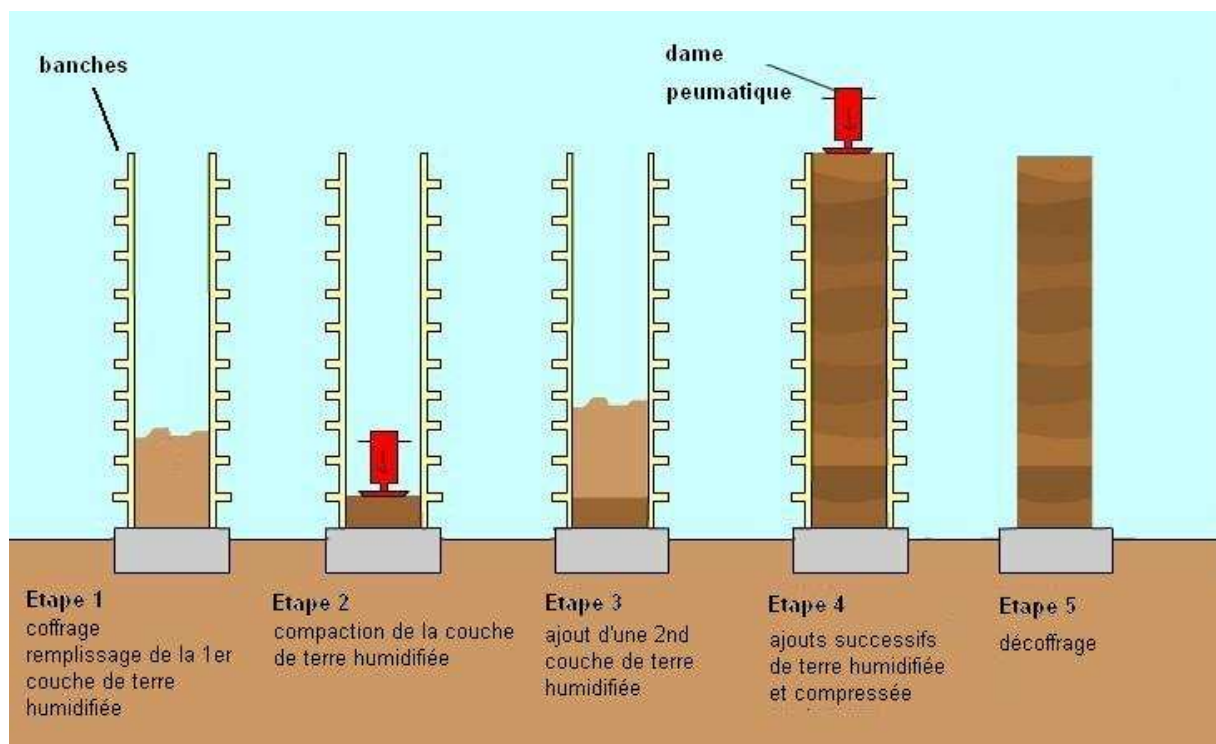


Figure 12 Etapes du montage d'un mur en pisé.

L'espace de 20 cm entre les deux murs en pisé ne permet pas le montage de deux coffrages. Les architectes ont jugé que l'aspect continu des strates revêtait une importance particulière à l'intérieur du musée pour exprimer le concept de fouilles archéologiques et la succession des ères. Le mur de parement extérieur sera donc monté en bloc de pisé préfabriqué.

2.3 Etat de l'art des connaissances.

Le pisé a depuis longtemps fait ses preuves comme en témoignent les bâtisses de plusieurs siècles du Dauphiné, les immeubles de dix étages du Yémen, ou les corps de fermes d'Angleterre. Cependant, le savoir-faire, peu à peu disparu, et les connaissances qui ont été transmises, sont empiriques. Nos sociétés actuelles ne peuvent se baser sur l'empirisme. Nous évoluons dans un cadre juridique qui a pour but d'assurer la sécurité des personnes et de leurs biens. Chaque projet de construction met ses concepteurs et ses bâtisseurs devant leurs responsabilités. Chaque phase du projet doit être étudiée sérieusement et aucun point ne doit être considéré à la légère. La sûreté, la salubrité et la durabilité du bâtiment doivent être garanties dans les conditions normales d'utilisation.

Devant les indéniables avantages des matériaux de construction dits « écologiques », diverses institutions s'évertuent à les analyser et les tester afin de disposer de données fiables et étendues. Cette démarche permet une utilisation avisée et judicieuse des « éco-matériaux ».

Dans le cas de la terre crue, l'association CraTerre, reliée à l'école d'architecture de Grenoble, œuvre depuis 30 ans à améliorer et diffuser les connaissances sur le matériau terre. Elle jouit aujourd'hui d'une renommée internationale. Ses publications concernant le patrimoine en terre crue, les tests des sols et les techniques de mise en œuvre sont des références reconnues.



Matthew Hall, chercheur et maître de conférences à l'université de Nottingham publie régulièrement les résultats des différentes expérimentations scientifiques qu'il mène depuis une dizaine d'années sur le pisé stabilisé. Ces articles sont à ce jour la source d'information la plus pertinente concernant les propriétés hydriques du pisé.



Le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, spécialisé dans l'expertise des pierres naturelles et de la terre cuite a récemment affecté une équipe de recherche sur les produits en terre crue.



Le Laboratoire Géomatériaux de l'ENTPE effectue depuis de nombreuses années un travail de recherche sur les propriétés mécaniques du matériau terre. Les essais de caractérisation de la terre de Dehlingen et les essais mécaniques y ont été réalisés.



Les articles de Matthew Hall et la thèse de Jean Paul Laurent sur la caractérisation thermique du pisé sont référencés dans la bibliographie. Les principales assertions présentent dans ce rapport s'appuient sur leurs résultats.

3. LA TERRE, UNE MATIÈRE GRAULAIRE AU COMPORTEMENT COMPLEXE.

3.1 Une matière issue de la pédogénèse.

La terre crue n'est pas un matériau homogène. Elle est issue de la dégradation d'une roche mère sur des millions d'années. Les facteurs climatiques (soleil, vent, pluie, froid) désagrègent la roche en éléments plus fins. Ils opèrent ensuite une altération chimique des minéraux qui sera poursuivie par l'action de la faune et la flore. Les éléments solubles migrent vers le bas sous les climats pluvieux (lessivage), vers le haut sous les climats secs (enrichissement).

On constate que la nature d'une terre est tributaire de la nature de la roche mère, du climat, de la végétation et de la faune. Ainsi, il existe une diversité considérable de terres. Une analyse préalable complète est indispensable au projet de construction en terre crue. Les résultats nous renseigneront sur la qualité de la terre pour son utilisation sous forme de pisé, sur son comportement à l'eau et sur sa compatibilité avec des stabilisants chimiques.

Pour comprendre le comportement thermo-hydrrique d'un mur en pisé, il faut rentrer au cœur de la matière, passer de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique. Dans un premier temps, nous détaillerons la composition de la terre. Nous verrons ensuite de quelle manière les éléments constitutifs s'agencent et comment ils réagissent avec les molécules d'eau. Enfin nous expliquerons le rôle et les effets de la stabilisation de la terre.

3.2 Une matière granulaire et cohésive.

La terre est une matière granulaire, constituée d'éléments plus ou moins fins.

Les graviers.

Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Ils sont de constitution chimique identique à celle de la roche mère. Ils sont de formes anguleuse ou ronde lorsqu'ils ont été charriés par les cours d'eau ou les glaciers. Les graviers limitent la capillarité et le retrait de la terre.

Les sables.

Leur taille se situe entre 2 mm et 0,06 mm. Ils sont composés de particules de siliceuse, silicatées ou calcaires. Le sable est caractérisé par sa grande friction interne. Cependant, il manque de cohésion du fait de la faible influence des films d'eau à la surface des grains. Ce qui limite le gonflement et le retrait.

NB : Les forces de frictions internes s'opposent au mouvement des grains. Mais il faut également tenir compte des forces de cohésion qui lient les particules entre elles. Ces deux données contribuent à déterminer la résistance du milieu.

Les silts.

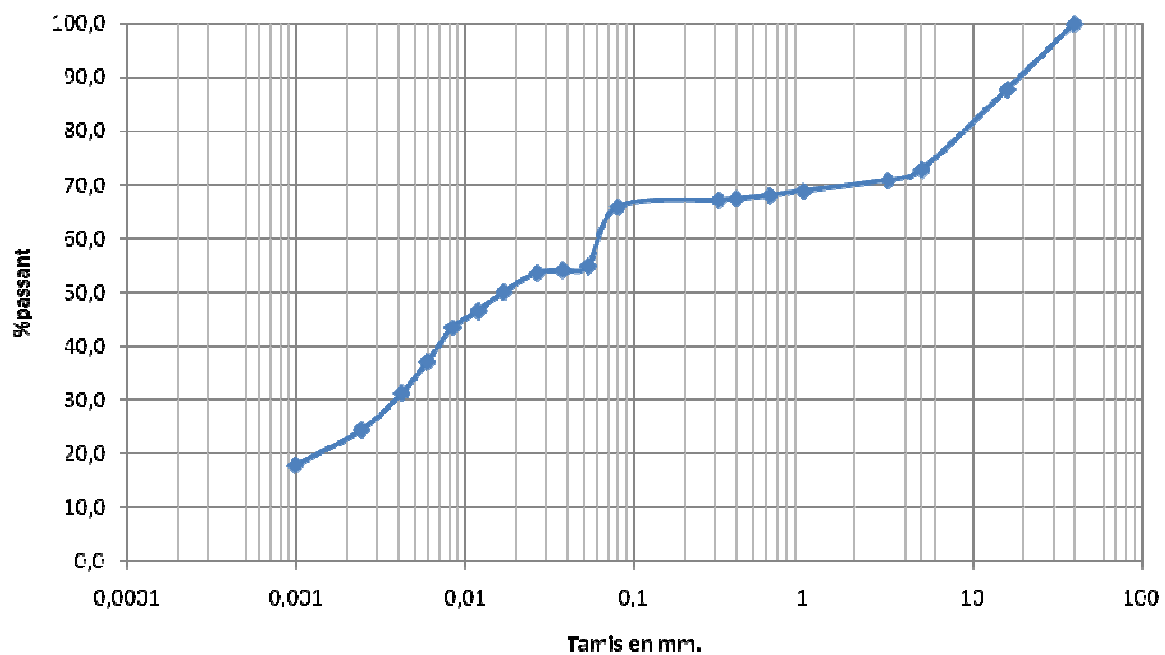
Leur taille se situe entre 0,06 mm et 0,002 mm (2 μm). Ils sont de même composition que les sables. Ils ont une grande friction interne et sont plus cohésifs que les sables. Les silts sont modérément sensibles au gonflement et au retrait.

Les colloïdes.

Leur taille est inférieure à 2 μm . Le principal colloïde minéral est l'argile. Ces particules très fines ont une composition constitution chimique différente. Il existe une grande variété d'argiles qui diffèrent par leur structure moléculaire et leur composition chimique. Les argiles sont toutes des silicates simples ou complexes d'aluminium, magnésium et fer principalement. Leur forme en feuillet leur confère une surface spécifique considérable. Le comportement des argiles à l'eau est très dépendant de leur structure.

La caractérisation de la terre peut nous permettre d'avoir une idée de son comportement mécanique, thermique et hydrique. La courbe granulométrique a été obtenue par les essais de granulométrie et de sédimentométrie réalisés au LGM de l'ENTPE.

Courbe granulométrique du sol de Strasbourg



011.

Le rapport de l'ENTPE figure en annexe.

3.3 L'argile, un liant réactif.

Les molécules d'argiles, les micelles, présentent une structure cristalline en feuillet. Leur comportement à l'eau est différent pour chaque type d'argile et dépend de :

- leur composition chimique
- de l'épaisseur des feuillets
- de l'écartement interfoliaire

La nature de l'argile n'a pas été à ce jour communiquée par l'ENTPE. Elle constitue 24,4% de la masse de la terre de Dehingen et on sait que sa sensibilité à l'eau est moyenne.

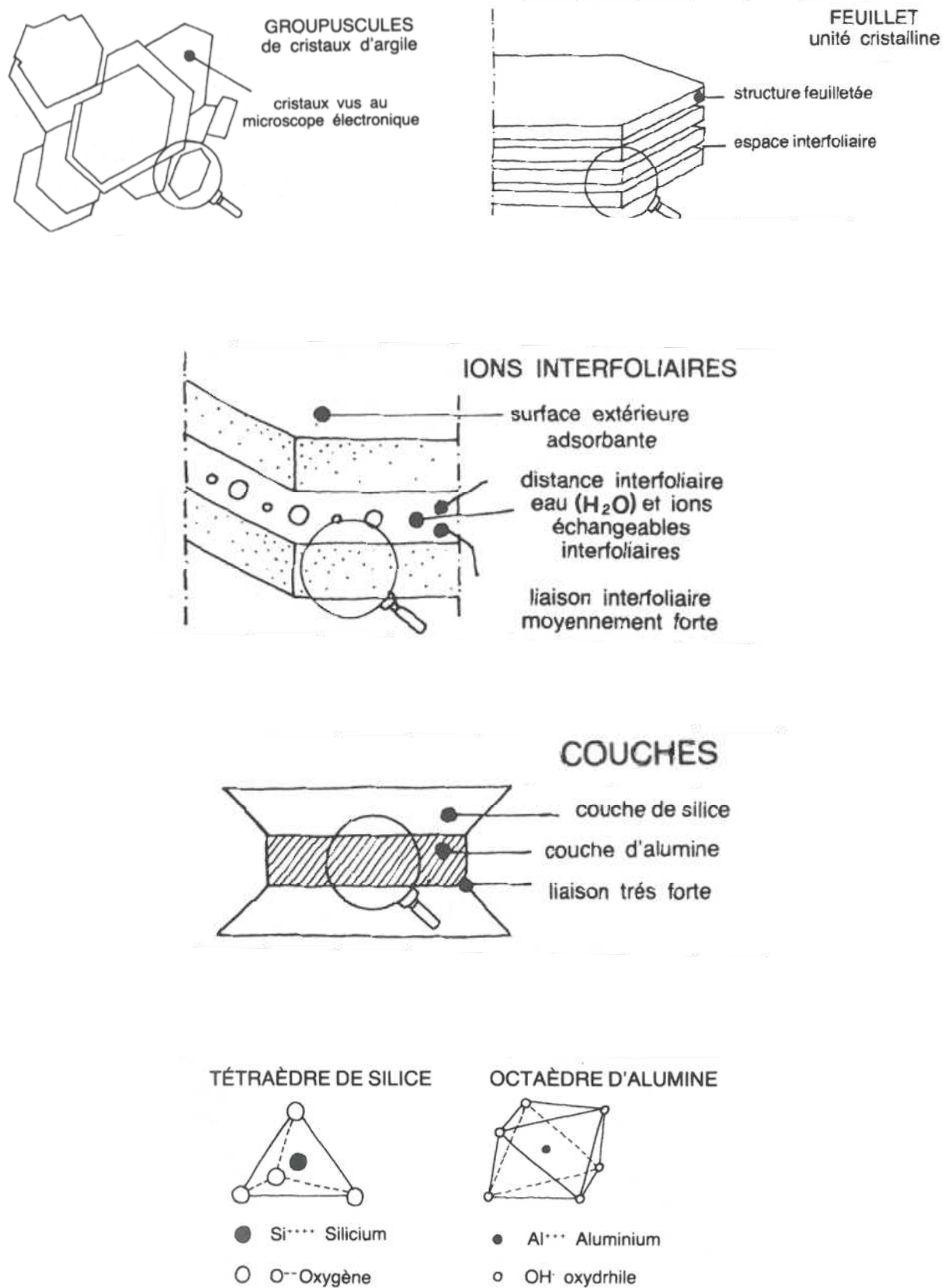


Figure 14 Structure de l'argile.

3.4 Intérêts et procédés de stabilisation.

La terre est un mélange et ses propriétés découlent des proportions des différentes fractions de cailloux, sables, silts et de la quantité et de la nature de l'argile. La terre de Dehlingen est un limon silto-argileux.

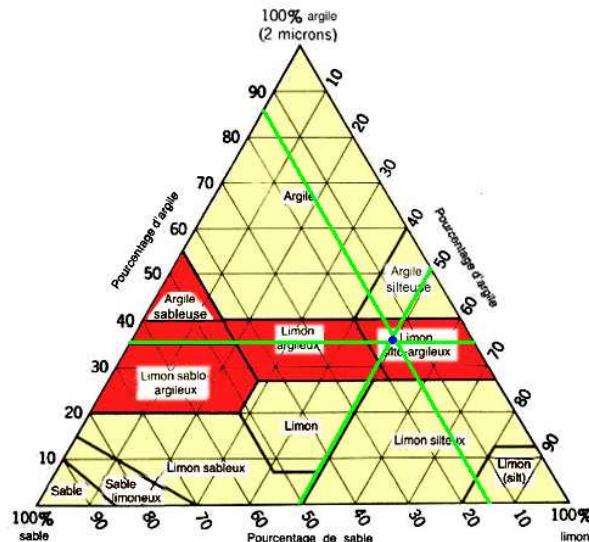


Figure 15 Triangle des textures.

Les constituants de la terre sont plus ou moins disposés et liaisonnés. La circulation d'eau liquide, de vapeur d'eau et sa résistance vont dépendre de leur assemblage.

La terre du site ne convient pas forcément aux exigences du projet et ne peut donc pas être utilisée telle quelle. C'est le cas dans le projet de Dehlingen. La stabilisation a pour but d'augmenter la résistance mécanique et d'assurer une cohésion entre les grains qui ne soit pas réversible. Le pisé de Dehlingen sera stabilisé par compaction et par ajout de liants chimiques (ciment CPA et chaux aérienne éteinte).

Le compactage augmente la contigüité entre les grains. Il densifie la matière qui acquière ainsi une plus grande résistance à la compression. Une répartition granulométrique étalée (ou étroite) accroît la qualité du compactage et donnera une porosité faible. La terre de Dehlingen présente une granulométrie discontinue, c'est dire que les fractions ne sont pas présentent de manière équilibrée.

Afin d'obtenir une compacité maximale pour une énergie de compactage donnée, il faut ajouter une quantité d'eau précise : la Teneur en Eau Optimale TEO. Tout le monde l'a expérimenté sans le savoir. A la plage, en marchant sur le sable sec, nos pieds s'enfoncent. En se rapprochant du rivage on atteint une zone de sable mouillé très dure, très compacte. Si l'on continu à marche vers la mer, nos pieds s'enfoncent de nouveau. Les essais Proctor détermine l'énergie de compactage et la TEO pour atteindre la meilleure résistance mécanique.

La densification de la matière accentue l'inertie thermique du pisé, ce qui est une bonne chose. En revanche, du fait d'une meilleure contigüité entre les grains, la conductivité thermique s'accroît. Inertie et résistance thermique évolue malheureusement dans des sens opposés.

Dans le cas du projet de Dehlingen, la terre sera stabilisée avec 2% de chaux aérienne éteinte et 2% de ciment CPA. Ces deux stabilisants réagissent avec la l'argile pour former une nouvelle matrice plus inerte (touts les agglomérats ne sont pas stabilisés).

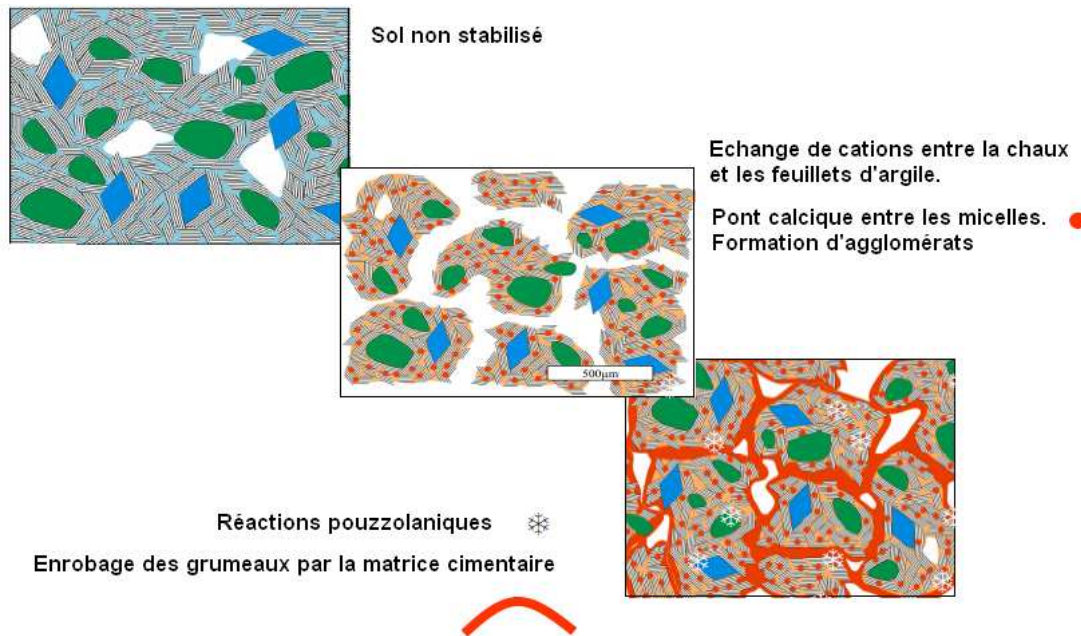
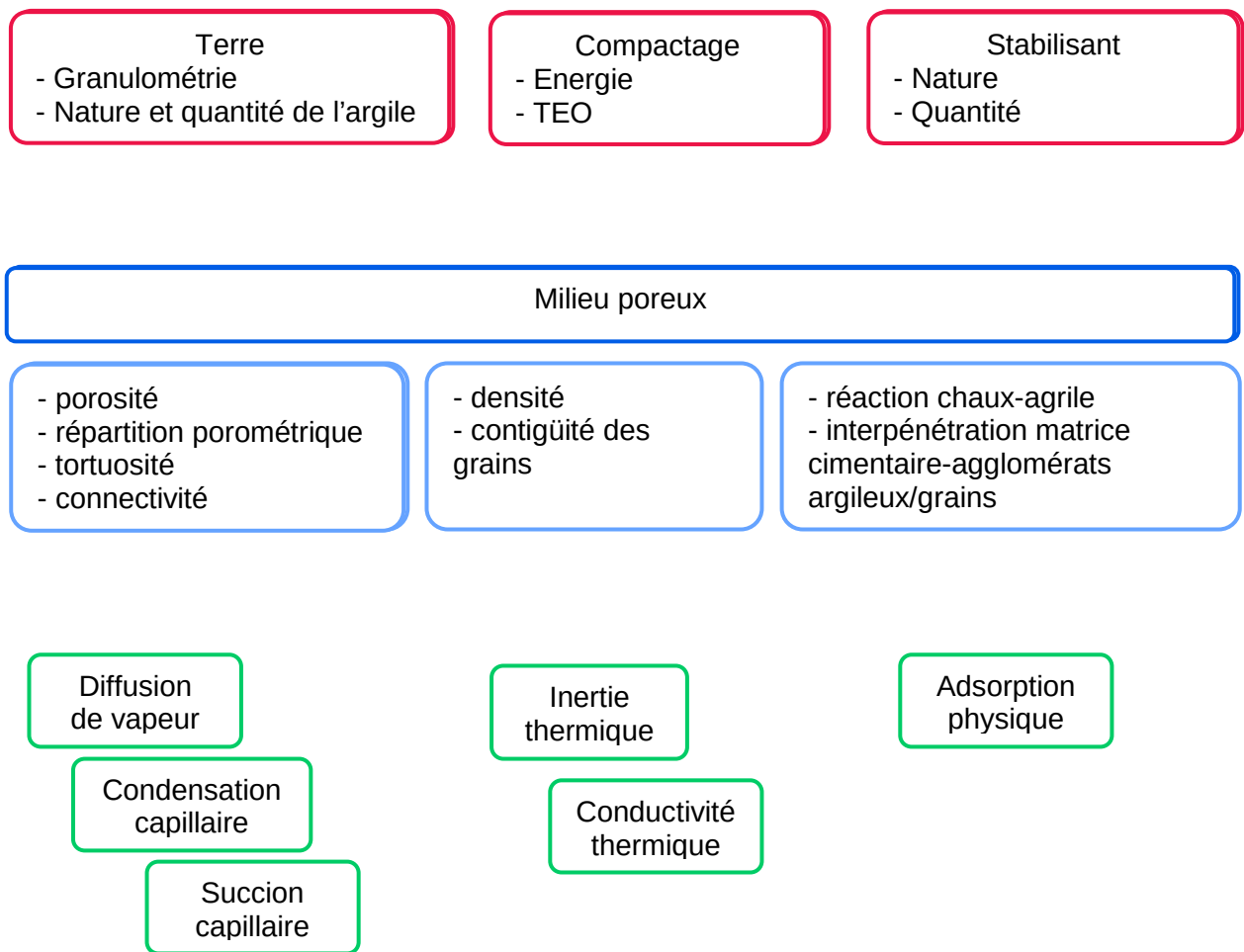


Figure 16 Stabilisation à la chaux et au ciment.

Le pisé stabilisé sera moins sujet au gonflement et à l'érosion. Quantitativement, cela dépendra de la dose de stabilisant.

NB : Plus on augmente le dosage de stabilisants, plus le pisé perdra ces avantages sur le béton (énergie grise, impact sur l'environnement). Certains appellent le pisé stabilisé le béton de terre.

Le schéma ci-après résume comment la matière brute, la terre, et la mise en œuvre influent sur les caractères thermiques et hydriques du pisé.



4. LES TRANSFERTS COUPLES D'HUMIDITE ET DE CHALEUR.

4.1 Pourquoi prendre en compte du transfert de masse à travers l'enveloppe ?

Le transport et surtout l'accumulation d'humidité renseigne sur trois points :

- la salubrité
- la performance thermique
- la solidité du bâtiment.

Tenir compte des transferts de masse dès la phase projet permet de réaliser des constructions saines, économes en énergie et pérennes.

La qualité de l'air intérieur est primordiale pour le bien-être des habitants. L'humidité excessive d'un bâtiment est néfaste pour la santé des occupants et pour leur confort. La ventilation a pour but d'éliminer les polluants générés par les hommes, leurs activités, le mobilier et les matériaux de construction.

L'humidité est l'un de ces polluants. Elle favorise la prolifération de moisissures, d'acariens et de bactéries qui libèrent dans l'air des allergènes. Ces derniers provoquent des allergies et des maladies des voies respiratoires et ORL. Il convient de maintenir un taux d'humidité relative entre de 30 et 50 %.

L'accumulation d'eau dans les matériaux poreux diminue leur résistance thermique. L'eau a une conductivité thermique de $0,6 \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ (à 20°C) soit 23 fois plus que l'air. La teneur en eau modifiera la conductivité thermique selon une loi linéaire. On parlera alors de la conductivité thermique effective (ou apparente). Les calculs de déperditions doivent prendre en compte cette donnée pour prédire de manière plus réaliste les consommations de chauffage.

L'humidité agit également sur le bâtiment en dégradant les performances mécaniques et des matériaux de construction. Un des facteurs le plus important influençant la résistance mécanique est le degré de saturation S_r .

$$S_r = \frac{v_w}{v_v} \quad [\text{Eq.1}]$$

S_r [%] degré de saturation

Deux phénomènes peuvent provoquer des dégradations : les cycles de gel-dégel et l'action chimique de certains sels et gaz dissous sur la matrice cimentaire.

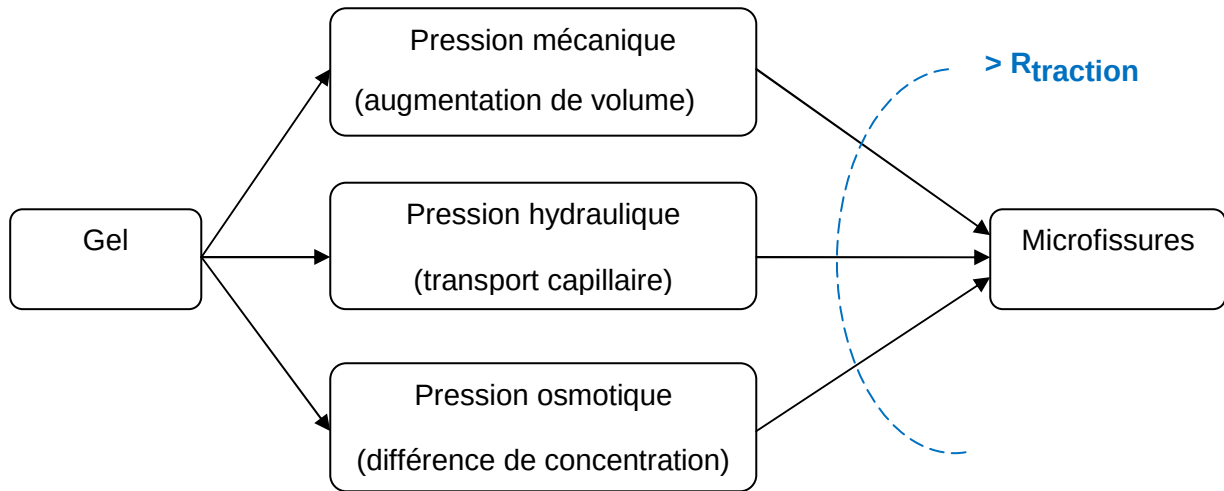
Lors du gel, l'augmentation du volume de l'eau est de 9%. Des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires. Ceci crée un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée. La différence de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée engendre une différence de pression osmotique.

La relation de Van't Hoff donne l'expression de la pression osmotique :

$$\pi' = c.R.T \quad [\text{Eq.2}]$$

π'	[Pa]	pression osmotique
c	[mol.L ⁻¹]	concentration molaire de soluté
R	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	constante des gaz parfaits
T	[K]	température

Ces pressions hydraulique et osmotique peuvent localement fissurer la pâte de ciment/chaux si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte.



Ce sont les modifications répétées et alternées de températures négatives et positives qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader la pâte cimentaire. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif.

Elles dépendent de :

- la vitesse de descente en température
- du nombre de cycles de gel
- de la durée du cycle de gel

Les cartes de gel donnent un aperçu des régions où le gel est à craindre. D'après la carte de gel issue de la norme NF EN 206-1 datant de 2005, Dehlingen se situe en zone de gel faible ou modéré. Selon la carte établie en 2011 par le Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur les Matériaux (Lerm), Dehlingen se trouve gel modéré à sévère (en fonction de l'altitude ; Dehlingen 270m). On peut considérer Dehlingen en zone de gel modéré. Les cartes de gel figurent en annexes.

Les pluies peuvent être acides ou alcalines (basiques). Les ions dissous ou les sels de déverglaçage qui rejaillissent sur la façade peuvent dégrader la pâte cimentaire lors de réaction de dissolution – précipitation. De la même manière, les eaux peu chargées sont capables de dissoudre certains constituants (la portlandite) de la pâte de ciment durci.

La carte du niveau de salage issue de la norme NF EN 206-1 datant de 2005 renseigne sur la fréquence de salage. Dehlingen se situe dans la zone H3 qui correspond à un nombre de jour de salage supérieur à 30.

Dans le cas du projet du CPI de Dehlingen, la source d'humidité intérieure provient du personnel et des visiteurs du musée.

Le climat est proche de celui de Trier, ville allemande distante d'une centaine de kilomètres à vol d'oiseau. C'est ce fichier météo qui sera utilisé lors des simulations sur WUFI 1D.

4.2 Les phénomènes de fixation et de transport d'humidité dans les matériaux poreux.

Au sein d'un système, les différentes grandeurs physiques (température, pression, concentration, etc.) tendent à s'équilibrer. Les flux de masse et de chaleur en sont la conséquence.

La migration de l'humidité dans les milieux poreux obéit à plusieurs phénomènes complexes, se produisant simultanément ou de manière consécutive. Le transfert de masse s'opère en phase liquide et phase vapeur.

Dans un premier temps nous présenterons les différents types d'interactions entre les molécules d'eau et la matière poreuse, ainsi que les mécanismes de transfert de masse. Nous expliciterons ensuite les équations de transferts couplés de masse et de chaleur. Enfin, nous verrons comment accéder aux caractéristiques du pisé.

La terre a la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air environnant. Elle est hygroscopique. L'eau est plus ou moins liée à la matrice solide :

- eau libre, avec une énergie de liaison nulle
- eau fixée par adsorption chimique
- eau fixée par adsorption physique
- eau liée mécaniquement par des forces capillaires

L'eau libre.

L'eau libre n'est liée par aucunes forces chimiques ou physiques. Elle se déplace par gravité. La vapeur d'eau est également « libre », mais ce terme désigne l'état de la phase liquide.

Adsorption chimique, eau de constitution.

L'adsorption chimique s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées. Les forces mises en jeu sont très importantes. Par exemple, le gypse possède deux molécules d'eau dans sa structure cristalline $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Lors d'une cuisson à haute température, aux alentours de 600°C , la terre subit une transformation physico-chimique irréversible. Elle est totalement déshydratée.

Adsorption physique.

L'adsorption physique est un phénomène spontané qui entraîne le passage du système adsorbat - adsorbant à un état plus stable. Elle implique les liaisons de Van der Waals. Dans le cas présent l'adsorbat est la molécule d'eau gazeuse, l'adsorbant, la paroi du pore. La variation d'enthalpie libre du système est négative, l'adsorption est exothermique.

$$\Delta H_{\text{adsorption}} = \Delta H_{\text{sorption}} + \Delta H_{\text{condensation}} < 0$$

Ce phénomène est réversible, l'action inverse est la désorption. L'enthalpie libre dépend de la température et de la pression.

$$\Delta H_{\text{désorption}} = \Delta H_{\text{sorption}} + \Delta H_{\text{évaporation}} > 0$$

La variation d'enthalpie est décomposée en deux termes : un terme de sorption (adsorption ou désorption) des molécules d'adsorbat sur la surface solide et un terme de condensation ou d'évaporation de ces mêmes molécules après la sorption.

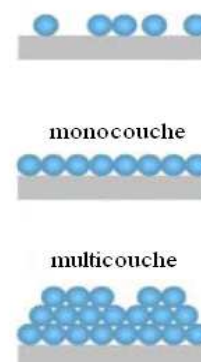


Figure 17 Adsorption physique.

L'adsorption se produit sur plusieurs couches. La première est fortement liée à la surface du pore. Les molécules des couches successives sont moins liées et peuvent donc se déplacer. C'est la diffusion surfacique. Les modèles développés pour la modélisation de l'adsorption ne seront pas explicités dans ce rapport.

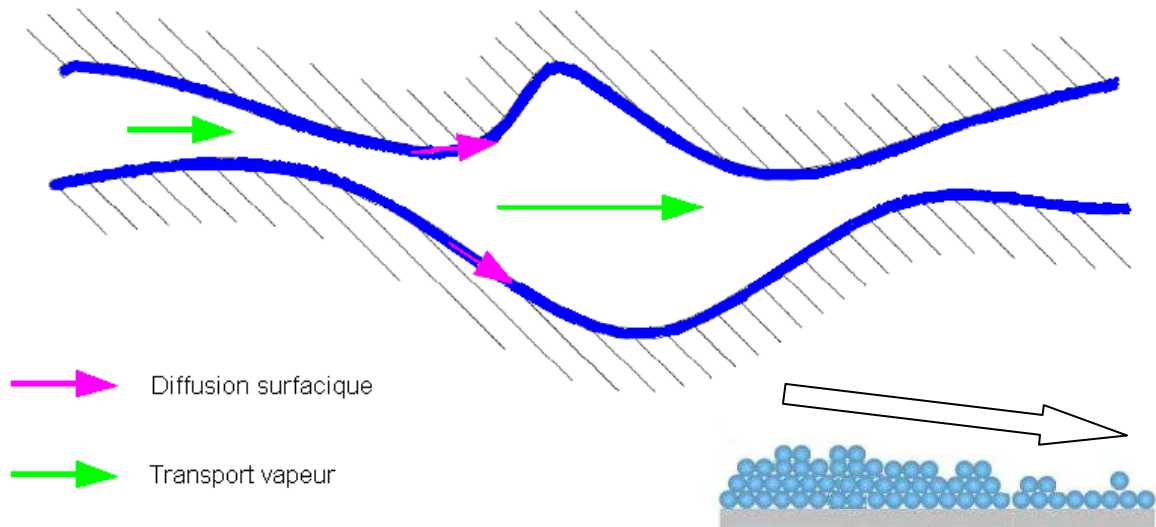


Figure 18 L'adsorption physique et diffusion surfacique.

On a vu que l'adsorption et la désorption sont des phénomènes spontanés qui tendent à amener le système solide-air environnant à l'équilibre. On peut relier l'humidité relative de l'air avec la teneur en eau du solide.

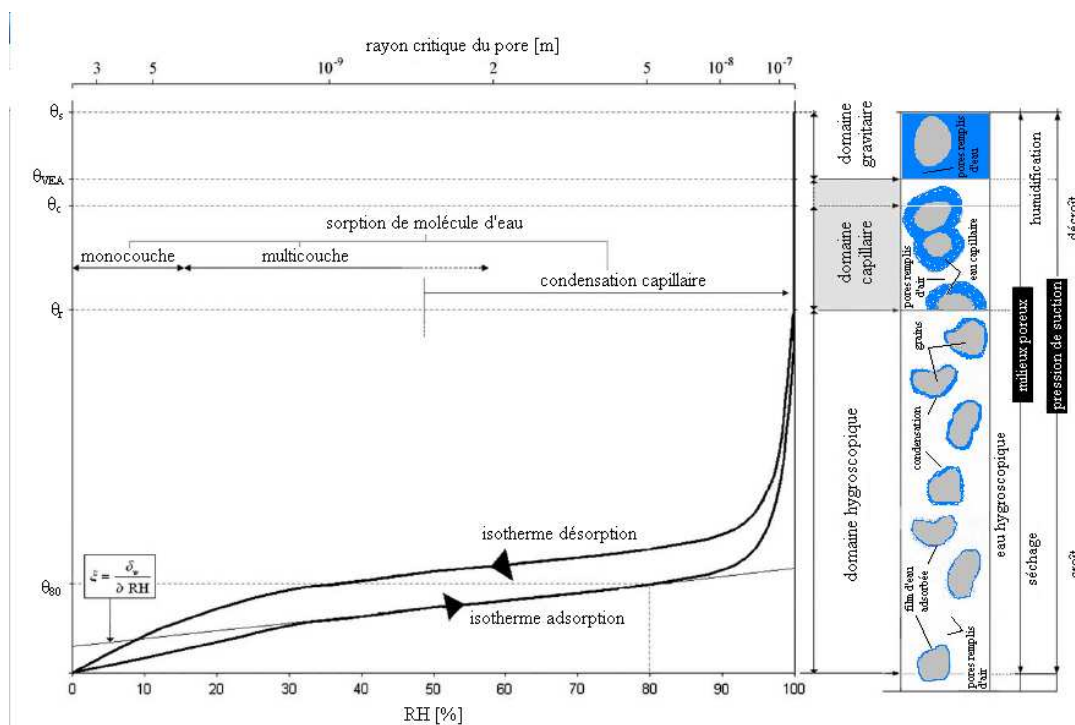


Figure 19 Isotherme de sorption.

L'isotherme d'adsorption est issue de mesures expérimentales. Il faut garder à l'esprit que sa précision dépend fortement de la méthode utilisée et comme l'indique son nom, elle est établie pour une température fixée.

L'hystérésis entre l'adsorption et la désorption traduit le fait qu'il est plus facile pour l'eau de rentrer dans le réseau poreux que d'en sortir, du fait des forces capillaires. Cet écart traduit également la présence de pore en forme de « bouteille d'encre ».

Condensation capillaire.

Après l'adsorption de plusieurs couches de molécules d'eau, de la vapeur d'eau se condense dans les pores les plus fins, puis plus larges jusqu'à l'état de saturation. Notons que l'état de saturation totale n'est possible que sous vide absolu.

Tout d'abord, il est important de comprendre pourquoi de la vapeur d'eau se condense dans certains pores alors que la pression de vapeur saturante n'est pas atteinte. Dans un espace confiné, le pore, le gaz subit des forces de volume et des forces de surface. Ces dernières sont prépondérantes sur les forces de volume. Pour atteindre un état d'équilibre, la vapeur d'eau se condense, ce qu'elle ne ferait pas si elle se trouvait au dessus d'une surface libre.

Un matériau poreux, initialement en équilibre avec l'air environnant, se remplit progressivement d'eau quand l'humidité relative augmente de manière isotherme.

A l'échelle d'un pore, lorsque l'humidité relative augmente, se produit successivement l'adsorption monocouche, multicouche sur une certaine épaisseur puis la condensation capillaire. Un pont liquide apparaît, séparé de la phase gazeuse par un ménisque. Il y a condensation capillaire.

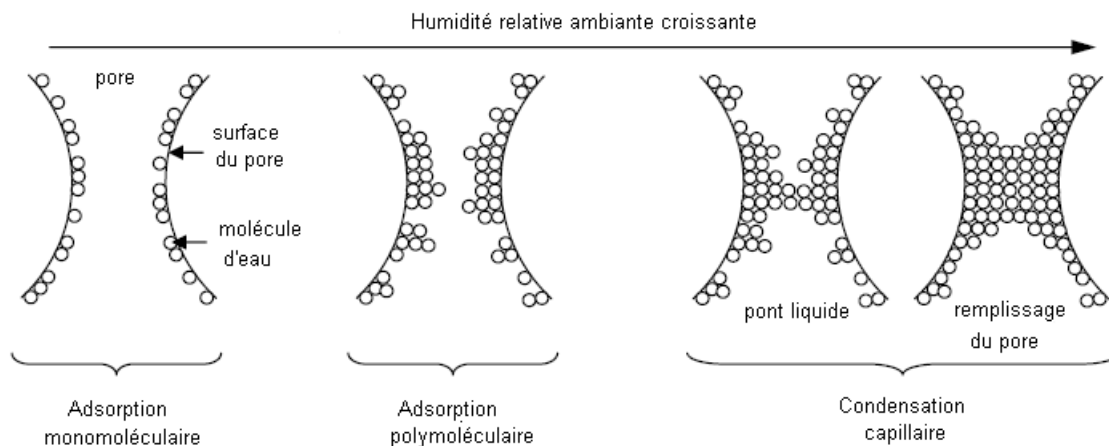


Figure 20 Condensation capillaire.

L'eau condensée est en équilibre avec l'atmosphère environnante, se qui se traduit par la loi de Kelvin :

$$P_c = P_l - P_0 = \rho_l \cdot RT \cdot \ln \frac{P_v}{P_{vs}} \quad [\text{Eq.3}]$$

P_0 : pression atmosphérique [Pa]

P_c : pression capillaire [Pa]

P_l : pression de l'eau liquide [Pa]

P_v : pression de vapeur de l'eau [Pa]

P_{vs} : pression de vapeur saturante de l'eau [Pa]

T : température [K]

$R = 8,314472 \text{ [J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ constante universelle des gaz parfaits

La relation précédente entre la pression capillaire et le taux de saturation de la vapeur s'obtient en exprimant l'égalité des potentiels chimique de l'eau dans les phases liquide μ^L et gazeuse μ^G , traduisant l'état d'équilibre.

Le potentiel chimique de l'eau pur à l'état liquide est :

$$\mu_L = \frac{P_l - P_0}{\rho_l} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad [\text{Eq.4}]$$

Le potentiel chimique de l'eau à l'état vapeur est :

$$\mu_G = RT \cdot \ln \frac{P_v}{P_{vs}} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad [\text{Eq.5}]$$

L'eau capillaire, ne s'écoule pas, elle est retenue par les forces capillaires

La loi de Laplace exprime la pression capillaire en fonction du diamètre du pore, le ménisque est supposé cylindrique :

$$P_c = P_l - P_0 = - \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r_k} \quad [\text{Eq.6}]$$

σ [kg.s⁻²] tension superficielle, 0,075 dans le cas de l'eau

θ [rad] angle de mouillage ($< \frac{\pi}{2}$)

r_k [m] rayon du ménisque

En combinant les équations [Eq.3] et [Eq.6], on obtient la relation de Kelvin-Laplace :

$$r_k = r - e_a = \frac{-2\sigma \cdot \cos\theta}{\rho_l \cdot RT \cdot \ln\varphi} \quad [\text{Eq.7}]$$

r [m] rayon du pore

e_a [m] épaisseur de la couche adsorbée

φ [%] humidité relative, $\varphi = \frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}}$

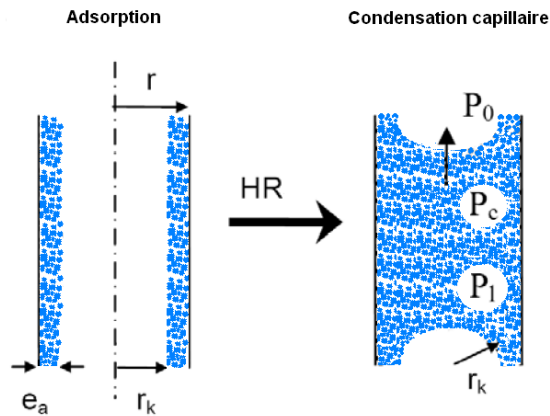


Figure 21 Condensation capillaire et diamètre de pore.

Si l'air dans le réseau poreux est caractérisé par une humidité relative ϕ à l'équilibre, tous les pores de diamètres inférieurs à r_k sont remplis d'eau. La répartition porométrique peut nous renseigner sur l'importance de la condensation capillaire au sein du matériau.

La pression capillaire P_c est souvent remplacée par la succion capillaire :

$$\psi = \frac{P_c}{\rho_l g} \quad [\text{Eq.8}]$$

ψ	[m]	succion capillaire
g	[m.s ⁻²]	accélération de la pesanteur 9,81

Une différence de succion capillaire induit un transfert d'eau liquide des pores les plus fins aux pores plus larges où règne une pression plus faible. S'ensuit un transport par séries de condensation évaporation. La diffusion surfacique s'effectue en parallèle.

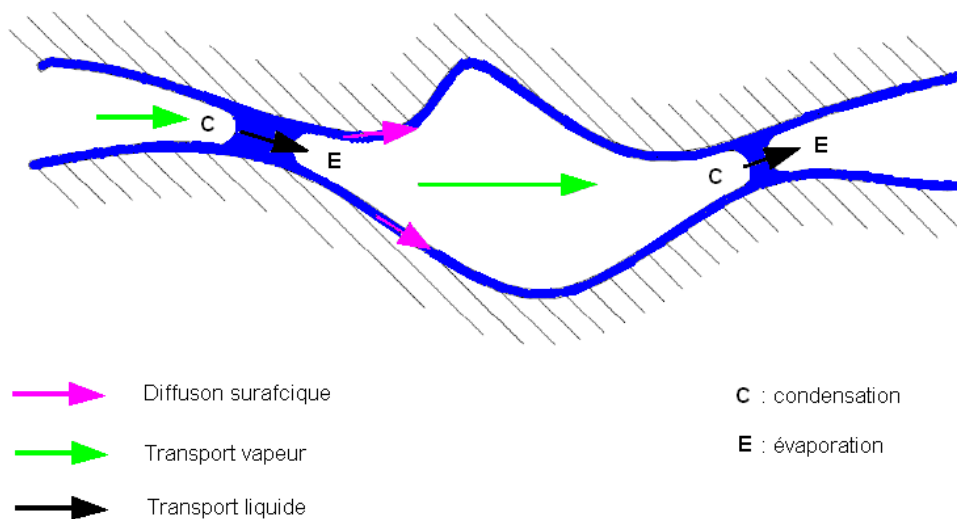


Figure 22 Transferts par séries de condensation-évaporation.

4.3 Modèle de transferts couplés de masse et de chaleur.

Le flux d'humidité totale (phases vapeur et liquide) est engendré par différents gradients moteurs. Le système mur pisé – air environnant tend à l'équilibre thermodynamique. Le transfert s'effectue en phase vapeur et en phase liquide.

Transfert en phase vapeur.

Le gradient moteur du transfert en phase vapeur est la différence de concentration. Cette concentration de vapeur d'eau est dépendante de la température et de l'humidité relative.

Lorsqu'un gradient de concentration de vapeur est appliqué, il existe au sein du milieu poreux deux modes de transport qui provoquent la migration de la vapeur d'eau. Il s'agit de l'effusion (transport de Knudsen) et de la diffusion moléculaire (transport de Fick).

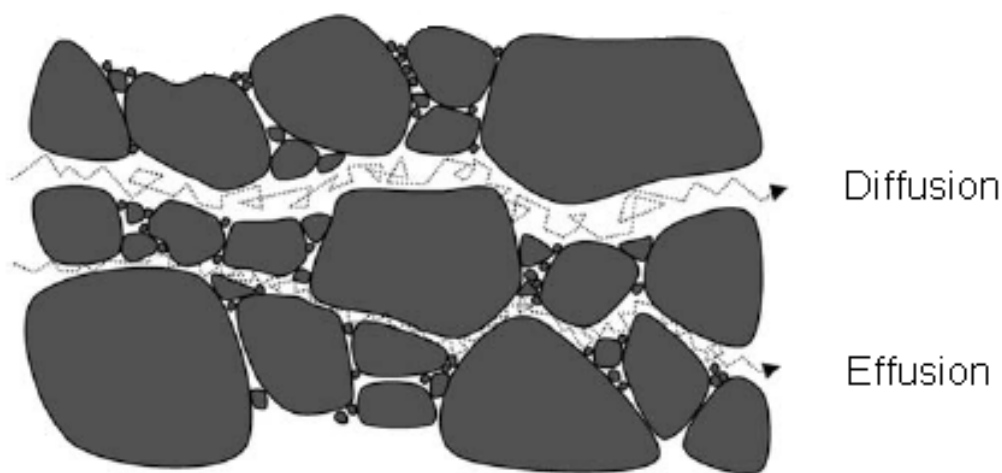


Figure 23 Diffusion et effusion de vapeur.

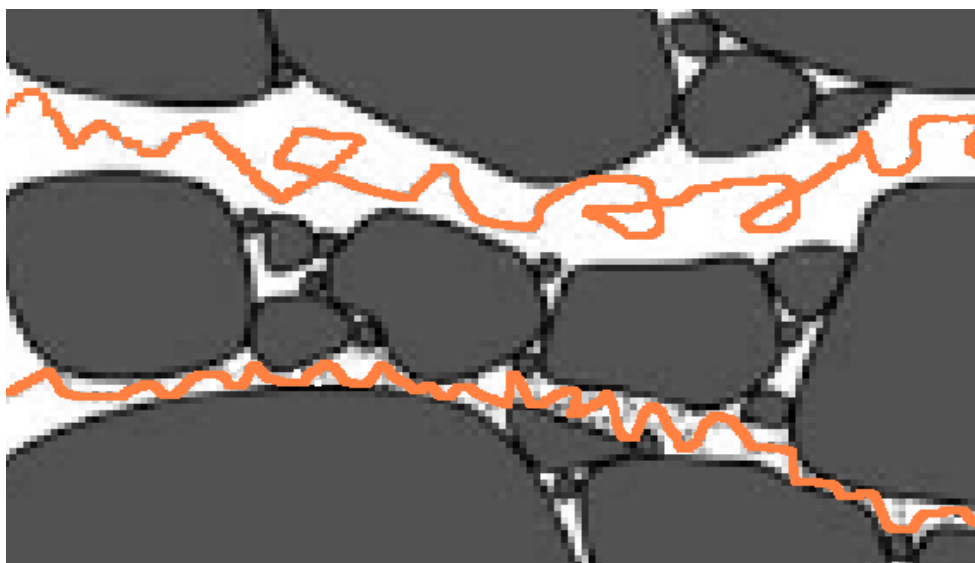


Figure 23 Détail diffusion effusion.

La distinction entre ces deux formes de transfert se fait par le nombre de Knudsen K_n .

$$Kn = \frac{L_{pm}}{d}$$

K_n	[-]	nombre de Knudsen
d	[m]	diamètre des pores
L_{pm}	[m]	libre parcours moyen des molécules

A la pression atmosphérique et dans la plage des températures extérieures, L_{pm} est de l'ordre de 0,1 μm .

- $K_n \gg 1$ soit $d \ll L_{pm}$ le transfert se fait par effusion. Le choc molécules-paroi est très supérieur aux chocs intermoléculaires.
- $K_n \ll 1$ soit $d \gg L_{pm}$ le transfert se fait par diffusion moléculaire.

Le coefficient de transfert de la phase vapeur D_v en milieu poreux dépend de la taille des pores, de leur tortuosité et de leur connectivité. La formule ci-dessous ne prend pas en compte les deux derniers facteurs. Les modèles les prenant en compte ne seront pas explicités dans ce rapport.

$$D_v = \frac{D_{v0}}{1 + K_n}$$

D_v	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	coefficient de diffusion de vapeur
D_{v0}	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	coefficient de diffusion de vapeur à l'air libre
K_n	[-]	nombre de Knudsen

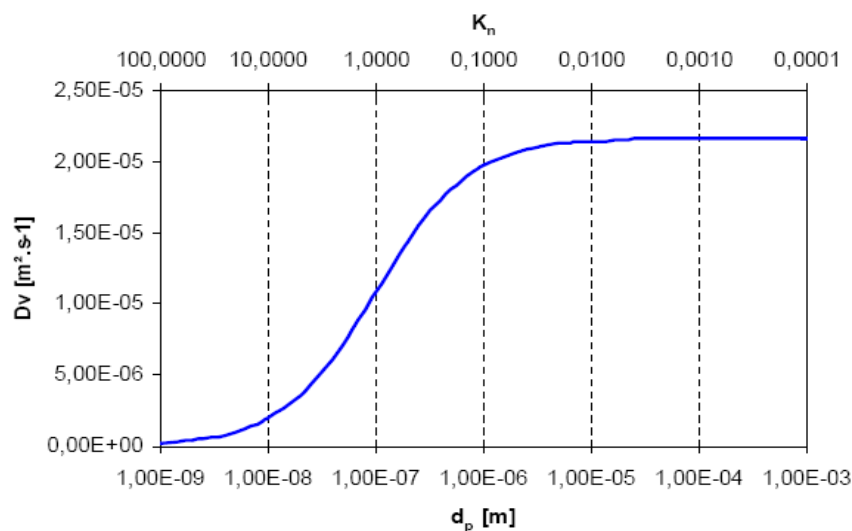


Figure 24 Coefficient de diffusion de vapeur en fonction du nombre de Knudsen.

Les pores n'ont pas tous le même diamètre. La répartition porométrique permettrait d'obtenir par pondération une valeur plus approchée du coefficient en phase vapeur.

Transfert en phase liquide.

Le gradient moteur du transfert en phase liquide est la différence de pression capillaire. Cette pression capillaire est dépendante de la température et de l'humidité relative.

Lorsqu'un gradient de pression capillaire est appliqué, il existe au sein du milieu poreux un phénomène de transport par capillarité.

$$J_l = -K \cdot \nabla P_l \quad [\text{Eq.9}]$$

J_l	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	densité de flux d'eau liquide
K	[kg.m ⁻¹ .Pa ⁻¹ .s ⁻¹]	conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique exprime l'aisance qu'a le fluide à se déplacer à travers la porosité. Elle dépend de la nature du fluide et du milieu poreux.

$$K = \rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \quad [\text{Eq.10}]$$

κ_l	[m ²]	perméabilité (intrinsèque) à l'eau liquide du milieu poreux
μ_l	[Pa.s]	viscosité dynamique
ρ_l	[kg.m ⁻³]	masse volumique de l'eau liquide

La perméabilité dépend fortement de la teneur en eau. Les modèles de détermination de la perméabilité intrinsèque ne seront pas évoqués dans ce rapport. Ils prennent notamment en compte la répartition porométrique, la tortuosité et la connectivité du réseau poreux.

La viscosité dynamique dépend fortement de la température et dans une moindre mesure de la pression liquide.

Équations couplées

On ne traite pas dans ce paragraphe des conditions aux limites.

Équation du transfert d'eau.

L'eau est supposée pure.

L'écoulement d'un fluide newtonien est régi par l'équation de conservation de masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad [\text{Eq.11}]$$

v	[m.s ⁻¹]	vitesse locale du fluide
ρ	[kg.m ⁻³]	masse volumique du fluide

Le transport du fluide, l'eau, s'effectue en phase liquide et en phase vapeur.

$$\frac{\partial \rho_l \theta_l}{\partial t} = -\nabla \cdot J_l - f_{LG} \quad [\text{Eq.12}]$$

$$\frac{\partial \rho_v \theta_v}{\partial t} = -\nabla \cdot J_v + f_{LG} \quad [\text{Eq.13}]$$

θ_l	$[m^3.m^{-3}]$	teneur volumique en eau liquide
θ_v	$[m^3.m^{-3}]$	teneur volumique en air
J_l	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$	densité de flux d'eau liquide
J_v	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$	densité de flux de vapeur d'eau
f_{LG}	$[kg.m^{-3}.s^{-1}]$	taux d'évaporation

Dans l'expression du flux d'eau liquide on néglige le transport par gravitation et par diffusion surfacique des couches adsorbées bien que certains chercheurs estiment qu'au delà de 50% d'humidité relative ce transport n'est plus négligeable.

La densité de flux d'eau liquide J_l est induite par un gradient de pression capillaire :

$$J_l = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \cdot \nabla P_l \quad [\text{Eq.14}]$$

κ_l	$[m^2]$	perméabilité du milieu poreux à l'eau liquide
μ_l	$[Pa.s^{-1}]$	viscosité dynamique de l'eau liquide
P_a	$[Pa]$	pression de l'air dans le milieu poreux

La densité de flux de vapeur d'eau J_v est induite par un gradient de concentration de vapeur. Le nombre de Péclet compare la convection et la diffusion dans le transport de masse. Sa faible valeur nous permet de négliger le transport par convection dans l'expression du flux de vapeur l'eau [GRO]:

$$J_v = -D_v \cdot \nabla \rho_v \quad [\text{Eq.15}]$$

D_v	$[m^2.s^{-1}]$	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le milieu poreux
-------	----------------	---

$$P_e = \frac{u_a L}{D_{v0}} \approx \frac{1.10^{-6}}{2.42.10^{-5}} \approx 4.5.10^{-2} \quad [\text{Eq.16}]$$

u_a	$[m.s^{-1}]$	vitesse macroscopique de l'air
L	$[m]$	distance caractéristique macroscopique (1 m)
D_{v0}	$[m^2.s^{-1}]$	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air

Reprenons l'équation bilan de masse de vapeur d'eau :

$$\frac{\partial \rho_v \theta_v}{\partial t} = -\nabla \cdot J_v + f_{LG} \quad [\text{Eq.13}]$$

Lorsque la vapeur d'eau est transportée vers l'extérieure du l'élément de volume, le flux d'évaporation compense instantanément la perte pour rétablir l'équilibre thermodynamique en l'eau liquide et sa vapeur. La densité de vapeur d'eau est constante. La relation précédente nous donne :

$$\nabla \cdot J_v = f_{LG} \quad [\text{Eq.17}]$$

$$f_{LG} = \nabla [-D_v \cdot \nabla \rho_v] \quad [\text{Eq.18}]$$

On résume le bilan de masse par :

$$\frac{\partial \rho_l \theta_l}{\partial t} = -\nabla \cdot J_l - \nabla \cdot J_v \quad [\text{Eq.19}]$$

$$\frac{\partial \rho_l \theta_l}{\partial t} = -\nabla \left[-\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \cdot \nabla P_l \right] - \nabla [-D_v \cdot \nabla \rho_v] \quad [\text{Eq.20}]$$

Équation du transfert de chaleur.

Dans l'expression du bilan de chaleur, sont négligés : l'échange radiatif interne, les réactions exo- ou endothermiques et les frottements visqueux du fluide en déplacement. Le nombre de Péclet thermique compare le transport par convection et le transport par conduction. Sa faible valeur nous permet de négliger le transport par convection [GRO] :

$$P_{eth} = \frac{L J_l C_{pl}}{\Lambda} \approx 10^{-2} \quad [\text{Eq.21}]$$

L	[m]	distance caractéristique macroscopique (1m)
J_l	[kg.s ⁻¹]	flux d'eau liquide
C_{pl}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	chaleur spécifique de l'eau liquide
Λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	conductivité apparente (ou effective)

NB : La conductivité apparente Λ dépend non seulement de la teneur en eau mais également de la géométrie du milieu poreux (contigüité des grains) par un coefficient **A**.

Le changement de phase s'apparente à un flux de chaleur. L'hypothèse d'équilibre thermique local revient à considérer que les températures de la matrice solide, de la phase gazeuse et de la phase liquide sont localement égales, de même que leur gradient de température. L'équation de conservation de l'énergie donne :

$$(\rho C_p) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla [-\Lambda \cdot \nabla T - L_v D_v \cdot \nabla \rho_v] \quad [\text{Eq.22}]$$

ρC_p	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]	capacité calorifique apparente (ou effective) du milieu poreux
L_v	[J.kg ⁻¹]	chaleur latente de vaporisation, 2500 à 0°C

La masse volumique apparente est une pondération de celles de la matrice solide et de la phase liquide, de même pour la chaleur spécifique. La phase gazeuse est négligée.

$$\rho = \theta_l \cdot \rho_l + (1 - \theta_l) \cdot \rho_s$$

$$C_p = \theta_l \cdot C_{pl} + (1 - \theta_l) \cdot C_{ps}$$

On obtient un système d'équations couplées :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_l \theta_l}{\partial t} = -\nabla \left[-\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \cdot \nabla P_l \right] - [-D_v \cdot \nabla \rho_v] \\ (\rho C_p) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla [-\Lambda \cdot \nabla T - L_v D_v \cdot \nabla \rho_v] \end{cases} \quad [\text{syst. Eq.20 ; 22}]$$

Il faut garder à l'esprit que le choix des potentiels (les gradients moteurs) doit être guidé par l'objectif de valider les modèles établis. Ainsi un critère important est l'accessibilité des potentiels par la mesure.

Les potentiels figurant dans le système d'équation sont :

- ∇T	gradient de température	accessible
- $\nabla \rho_v$	gradient de concentration de vapeur	non accessible
- ∇P_l	gradient de pression capillaire	non accessible

Le gradient d'humidité relative est accessible par la mesure avec des sondes capacitatives ou résistives. La sonde est placée dans le milieu poreux et doit être entourée d'une très fine couche d'air. L'équilibre thermodynamique s'établit entre cet air et le matériau et on accède à la mesure d'humidité relative pour un point donné.

On exprime la densité de flux de vapeur J_v en fonction des gradients de température et d'humidité relative :

$$J_v = -D_v \cdot \nabla \rho_v \quad [\text{Eq.15}]$$

$$J_v = -D_v \cdot \nabla (\varphi \cdot \rho_{vs}) \quad [\text{Eq.23}]$$

ρ_{vs} [kg.m⁻³] concentration de vapeur saturante, dépend de la température

$$\nabla (\varphi \cdot \rho_{vs}) = \rho_{vs} \cdot \nabla \varphi + \varphi \cdot \nabla \rho_{vs} \quad [\text{Eq.24}]$$

$$\nabla \rho_{vs} = \frac{\partial \rho_{vs}}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{d\rho_{vs}}{dT} \cdot \nabla T \quad [\text{Eq.25}]$$

$$J_v = -D_v \cdot \rho_{vs} \cdot \nabla \varphi - D_v \cdot \varphi \cdot \frac{d\rho_{vs}}{dT} \cdot \nabla T \quad [\text{Eq.23}]$$

$$J_v = -D_{v,\varphi} \cdot \nabla \varphi - D_{v,T} \cdot \nabla T \quad [\text{Eq.24}]$$

$D_{v,\varphi}$ [kg.m⁻¹.s⁻¹] coefficient de diffusivité de vapeur sous gradient d'humidité relative

$D_{v,T}$ [kg.m⁻¹.K⁻¹.s⁻¹] coefficient de diffusivité de vapeur sous gradient de température

$$D_{v,\varphi} = D_v(K_n) \cdot \rho_{vs}(T)$$

$$D_{v,T} = D_v(K_n) \cdot \varphi \cdot \frac{d\rho_{vs}(T)}{dT}$$

On rappelle les relations suivantes :

$$D_v = \frac{D_{v0}}{1 + K_n}$$

$$\rho_{vs} = \frac{M_w}{RT} \cdot P_a \cdot \exp \left[\frac{L_v \cdot M_w}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

On exprime la densité de flux d'eau liquide J_l en fonction des gradients de température et d'humidité relative :

$$J_l = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \cdot \nabla P_l \quad [\text{Eq.12}]$$

$$P_c = P_l - P_0 = \rho_l \cdot R T \cdot \ln \varphi \quad [\text{Eq.3}]$$

$$\nabla P_l = \rho_l \cdot R \cdot (T \nabla \ln \varphi + \ln \varphi \cdot \nabla T) \quad [\text{Eq.25}]$$

$$\nabla \ln \varphi = \frac{\partial \ln \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \ln \varphi}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{\varphi} \cdot \nabla \varphi \quad [\text{Eq.26}]$$

$$\nabla P_l = \rho_l \cdot R \cdot \left(T \frac{1}{\varphi} \nabla \varphi + \ln \varphi \cdot \nabla T \right) \quad [\text{Eq.27}]$$

$$J_l = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \cdot \rho_l \cdot R \cdot \left(T \frac{1}{\varphi} \nabla \varphi + \ln \varphi \cdot \nabla T \right) \quad [\text{Eq.28}]$$

$$J_l = -D_{l,\varphi} \cdot \nabla \varphi - D_{l,T} \cdot \nabla T \quad [\text{Eq.29}]$$

$D_{l,\varphi}$ [kg.m⁻¹.s⁻¹] coefficient de diffusivité d'eau liquide sous gradient d'humidité relative

$D_{l,T}$ [kg.m⁻¹.K⁻¹.s⁻¹] coefficient de diffusivité d'eau liquide sous gradient de température

$$D_{l,\varphi} = \rho_l \cdot \frac{\kappa_l(\varphi, T)}{\mu_l(\varphi, T)} \cdot \frac{\rho_l \cdot R T}{\varphi}$$

$$D_{l,T} = \rho_l \cdot \frac{\kappa_l(\varphi, T)}{\mu_l(\varphi, T)} \cdot \rho_l \cdot R \cdot \ln \varphi$$

On peut maintenant exprimer le système d'équation en fonction des gradients de température et d'humidité relative :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_l \theta_l}{\partial t} = -\nabla[-D_{\varphi} \cdot \nabla \varphi] - \nabla[-D_T \cdot \nabla T] \\ (\rho C_p) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla[-(\lambda + L_v \cdot D_{v,T}) \cdot \nabla T - L_v \cdot D_{v,\varphi} \cdot \nabla \varphi] \end{cases}$$

$D\varphi = D_{v,\varphi} + D_{l,\varphi}$ [kg.m-1.s-1] coefficient de diffusivité sous gradient d'humidité relative

$D_T = D_{v,T} + D_{l,T}$ [kg.m⁻¹.K⁻¹.s⁻¹] coefficient de diffusivité sous gradient de température

Résumer de la modélisation des transferts de masse et de chaleur.

La modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur traite de mécanismes complexes dont certains sont négligeables. De nombreuses lois de la thermodynamique ont été mentionnées ainsi que leurs hypothèses de validité. Nous avons explicité plusieurs coefficients qui dépendent chacun d'une ou de plusieurs grandeurs physiques. Rappelons les points importants.

Les mécanismes de transferts négligés :

- transfert de masse par convection
- transfert de masse par diffusion surfacique
- transfert thermique par convection
- transfert thermique par rayonnement
- transfert thermique par frottement visqueux
- transfert thermique par changement d'état (gel - dégel)

Hypothèses :

- eau pure
- matrice solide indéformable (cf. gonflement des argiles)
- équilibre thermodynamique prévaut partout dans le milieu poreux
- milieu poreux homogène, isotrope (l'échelle macroscopique)
- masse volumique de l'eau, chaleur spécifique de l'eau et chaleur latente de vaporisation indépendantes de la température

Gradients moteurs :

- température
- humidité relative

Paramètres à connaître :

Paramètre	unité	Dépendance à des paramètres	Dépendance au milieu poreux	Dépendance grandeurs physiques
D_φ	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	D_v $\rho_{vs}(T)$ φ T $\kappa(\varphi, T)$ $\mu(\varphi, T)$ ρ_l	Réseau poreux	φ, T
D_T	$\text{kg.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$	D_v $\rho_{vs}(T)$ φ $\kappa(\varphi, T)$ $\mu(\varphi, T)$ ρ_l	Réseau poreux	T
$D_{v,\varphi}$	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	D_v $\rho_{vs}(T)$	Réseau poreux	T
$D_{v,T}$	$\text{kg.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$	D_v $\rho_{vs}(T)$ φ	Réseau poreux	φ, T
ρ	kg.m^{-3}	$\theta(\varphi)$ ρ_l ρ_s	Réseau poreux Nature du solide	φ
C_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\theta(\varphi)$ C_{pl} C_{ps}	Réseau poreux Nature du solide	φ
Λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\theta(\varphi)$ λ_l λ_s A	Réseau poreux Nature du solide contigüité grains	φ

4.4 Comment accéder aux propriétés hydriques du pisé ?

Nous avons vu précédemment que le choix des potentiels (les gradients moteurs) s'est porté sur des grandeurs physiques accessibles par la mesure. On peut se poser la question suivante : les coefficients issus de ce modèle, sont-ils eux aussi accessibles par la mesure ?

La densité sèche ρ_s [kg.m^{-3}] :

La détermination de la masse volumique sèche a été déterminée par l'ENTPE. Le moule Proctor, de volume connu, est pesé vide, puis, après ajout et compaction de terre. Ceci donne la masse volumique apparente ρ en [kg.m^{-3}]. Un peu de terre humide est pesée, chauffée 5min au micro puis pesée une nouvelle fois.

$$\omega = \frac{m1 - m2}{m1}$$

ω	[%]	teneur en eau massique
$m1$	[kg]	masse de terre humide
$m2$	[kg]	masse de terre sèche

La masse volumique sèche ρ_s est calculée avec la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{\rho}{(1 + \omega)}$$

La chaleur spécifique C_{ps} [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] :

La chaleur spécifique de la matrice solide sera déterminée par le Centres d'Innovation et de Transfert Technologique d'Alsace (CRITT). Par calorimétrie à balayage différentiel selon une norme logiciel Netzsch qui découle de la norme anglaise ASTM E 1269-05.

La chaleur spécifique de la terre est de l'ordre de 830 [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

La conductivité thermique sèche λ_s [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] :

La conductivité thermique sèche sera déterminée par le CRITT d'Alsace par la méthode d'Optical Scanning, un dispositif développé en laboratoire ne suivant pas de norme spécifique.

NB : Dans l'idéale, il faudrait réitérer cette mesure pour différente teneur en eau afin de déterminer le coefficient de dépendance de la conductivité thermique à l'humidité.

Jean Paul LAURENT [LAU], a déterminé une formule empirique de la conductivité sèche :

$$\lambda_s = 2,97 \cdot 10^{-1,769 \cdot p} \quad [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Appliqué au cas de Dehlingen on obtient :

- $\lambda_s = 0,92$ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] pour ρ_s de 1860 [kg.m^{-3}] et une porosité p de 29%
- $\lambda_s = 0,6$ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] pour ρ_s de 1600 [kg.m^{-3}] et une porosité p de 39%

La détermination des paramètres hydriques est beaucoup plus délicate.

Détermination du coefficient de diffusivité sous gradient d'humidité relative D_ϕ :

Le CRITT d'Alsace va déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau NF-EN-ISO 12572. Cette propriété nous permettra d'accéder au coefficient de diffusivité sous gradient d'humidité relative.

Les échantillons sont soumis à un gradient de pression de vapeur.

Le flux d'humidité total g_h est :

$$gh = \frac{G}{S} \frac{\pi \cdot \Delta P v}{e}$$

G	[kg.s ⁻¹]	variation de masse en régime permanent
S	[m ²]	surface d'échange de l'éprouvette
e	[m]	épaisseur de l'éprouvette
π	[kg.m ⁻¹ .Pa ⁻¹ .s ⁻¹]	perméabilité à la vapeur d'eau

NB : La perméabilité dite à « la vapeur » d'eau est en réalité la perméabilité à l'humidité (vapeur et liquide)

Dans des conditions isothermes, la densité de flux d'humidité totale J_h est :

$$J_h = -D_\varphi \cdot \nabla \varphi \quad [\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$$

$$g_h = S \cdot J_h \quad [\text{kg.s}^{-1}]$$

Le flux d'humidité total g_h est :

$$gh = S \cdot J_h = \frac{\pi \cdot \Delta P v}{e}$$

$$-S \cdot D_\varphi \cdot \frac{\Delta \varphi}{e} = \frac{\pi \cdot \Delta P v}{e}$$

$$-S \cdot D_\varphi \cdot \frac{\Delta \varphi}{e} = \frac{\pi \cdot P v s \cdot \Delta \varphi}{e}$$

$$-D_\varphi = \frac{\pi \cdot P_{vs}}{1} = \frac{\pi \cdot \rho_{vs}(T) \cdot RT}{M_\omega} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

Les coefficients de diffusivité de vapeur sous gradient d'humidité relative $D_{v,\varphi}$ et sous gradient de température $D_{v,T}$ se déterminent de la manière suivante.

Soit Φ la densité de flux de l'échantillon (mesure avec un fluxmètre) :

$$\Phi = -(\Lambda + L_v \cdot D_{v,T}) \cdot \nabla T$$

$$\Lambda^* = -\frac{\Phi}{\nabla T} = \Lambda + L_v \cdot D_{v,T} \quad [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Λ [W.m⁻¹.K⁻¹] conductivité thermique mesurée avec le dispositif Optical Scanning

$$D_{v,T} = \frac{\Lambda^* - \Lambda}{L_v} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

$$D_{v,\varphi} = \frac{D_{v,T} \cdot \rho_{vs}(T)}{\varphi \cdot \frac{d\rho_{vs}(T)}{dt}} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

Coefficient de diffusivité sous gradient de température D_T :

$$D_T = \rho_l \cdot \frac{\kappa_l(\varphi, T)}{\mu_l(\varphi, T)} \cdot \rho_l \cdot R \cdot \ln \varphi + D_v(K_n) \cdot \varphi \cdot \frac{d\rho_{vs}(T)}{dt} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

Or la conductivité hydraulique K est pratiquement impossible à déterminer expérimentalement [SAM].

$$K = \rho_l \cdot \frac{\kappa_l(\varphi, T)}{\mu_l(\varphi, T)} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

5. SIMULATION SUR WUFI .1D.

WUFI.1D est un logiciel de simulation développé par le Fraunhofer Institut für Bauphysik, il fait partie des systèmes de modélisation de transferts couplés les plus employés.

En premier lieu nous verrons les équations couplées utilisées par WUFI.1D et les paramètres à indiquer. Ensuite, nous exposerons les conclusions issues des simulations notamment l'importance de la précision des données renseignées et des options de calcul.

5.1 Le modèle numérique.

Le système d'équations de transferts couplés de masse est de chaleur employé par WUFI.1D est le même que celui exposé en 4.3 *Modèle de transferts couplés de masse et de chaleur* après reformulation.

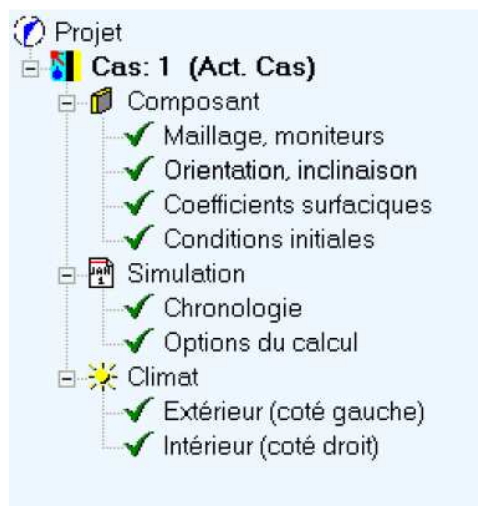
Cependant, il faut encore vérifier que tous les coefficients correspondent bien à ceux énoncés précédemment. Au moment de la rédaction de cette synthèse ce point n'a pas été assez éclairci pour répondre avec certitude. Notamment, il faut se reporter aux normes qui définissent les procédures de détermination de ces paramètres. Celles-ci figurent en annexes.

La résolution mathématique se fait par l'algorithme de Thomas. Les échecs de convergence sont comptabilisés et figurent sur la fiche des résultats.

NB : Avec WUFI.1D on peut également simuler les transferts de chaleur seuls, ce qui nous permet d'estimer l'importance de la dégradation des performances thermiques due à l'accumulation d'eau dans la paroi.

5.2 La saisie du projet, plusieurs étapes, de nombreux éléments à approximer.

La saisie des données d'un projet suit les étapes suivantes :



Ces étapes sont bien illustrées dans l'annexe du Projet de Recherche Technologique *Humidité dans les parois* réalisé en janvier 2011 par Aude Raguideau, étudiante en GCE à l'INSA de Strasbourg. Ce document a été ajouté aux annexes du présent rapport.

Les points exposés ci-dessous méritent d'être traités avec attention.

1. L'assemblage des composants.

Dans le cas du projet de Dehlingen, de la ouate de cellulose ou de la perlite en vrac sera déversée entre les deux murs en pisé.

Il est préférable d'insérer une fine couche d'air entre chaque composant. L'interface sera modélisée de manière plus réaliste. Cette petite discontinuité est importante pour les phénomènes de transport par capillarité.

2. L'orientation.

L'orientation choisie doit être la plus défavorable. Il convient de sélectionner l'orientation correspondant à celle des pluies battante plutôt que l'orientation nord. Dans le cas du projet de Dehlingen, l'orientation sud-ouest est la plus défavorable.

NB : Le fichier météo choisi est celui de Trier en Allemagne cf. 4.1 p26.

Les coefficients d'absorption $R1$ [-] et $R2$ [$s.m^{-1}$] de pluie sont dépendants de l'exposition de la façade à la pluie battante. WUFI.1D calcule l'intensité de la pluie selon la formule suivante :

$$\text{Intensité pluie} = \text{pluie} \times (R1 + R2 \times \text{Vitesse vent}) \quad [mm.h^{-1}]$$

L'orientation (O ; S et E) et le contexte du projet, notamment la hauteur des bâtiments voisins, permettront de juger si les coefficients par défaut de WUFI.1D sont adéquats.

3. Coefficients surfaciques.

Dans le cas du projet de Dehlingen, aucun enduit ou peinture n'est appliqué sur les surfaces intérieures et extérieures. Aucune épaisseur d'air équivalente S_d n'est à spécifier. Le pisé est nu conformément au concept architectural.

WFI.1D requière les coefficients d'émissivité courtes et grandes longueur d'onde de la surface extérieure. Ces paramètres sont utiles pour calculer l'échange thermique radiatif entre le bâti et l'environnement.

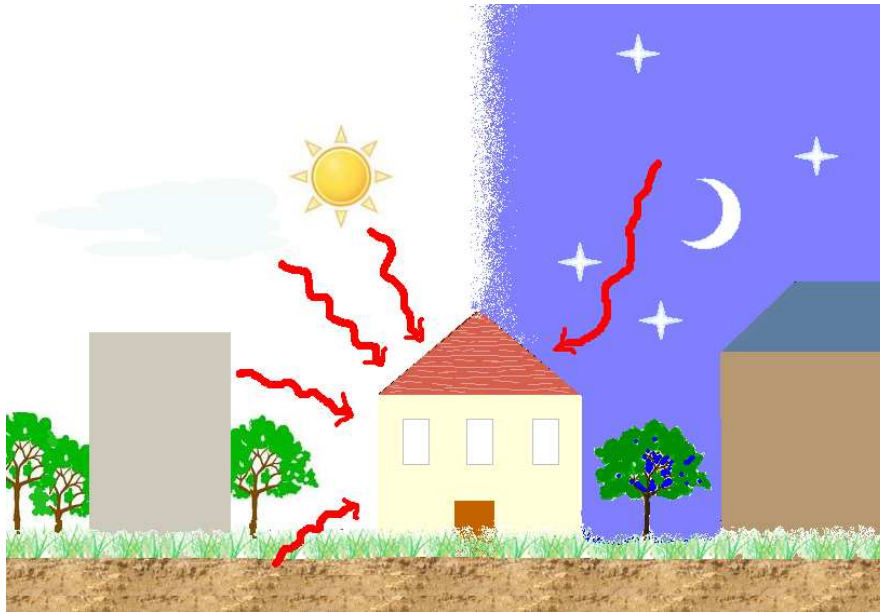


Figure 25 Echange radiatif avec l'environnement.

Rq : Nous rappelons que les équations aux limites n'ont pas été traitées dans la partie 4.3 *Modèles de transferts couplés de masse et de chaleur*.

Dans le mode de calcul simplifié, le coefficient d'échange radiatif est constant. Le coefficient d'échange global combine ce coefficient avec le coefficient d'échange par convection.

- Cela sous-entend que l'échange radiatif et l'échange convectif vont dans le même sens. Or ceci peut ne pas être le cas la nuit. Le bâtiment peut capter de la chaleur par échange convectif avec l'air ambiant et en perdre par un échange de flux radiatif avec la voûte céleste.
- Deuxièmement, le coefficient d'échange radiatif du mode simplifié ne prend pas en compte l'influence de l'environnement ou des conditions climatiques (bâtiments voisins, sol, nuages, etc.)

Pour effectuer un calcul plus précis, il faut autoriser le mode *Bilan explicite de rayonnement* et rentrer de nouveau paramètres. Les points énoncés précédemment seront alors considérés.

Les développeurs de WUFI.1D conseillent d'activer ce mode si l'on veut tenir compte du rafraîchissement nocturne, susceptible d'engendrer des points de condensations. Dans le cas du projet de Dehlingen, on recherche justement à connaître les risques de condensation. Le mode doit alors être activé.

A titre d'exemple, plusieurs simulations ont été réalisées concernant le projet de Gest'énergie *J.Zay Mulhouse*. Les fiches résumant les données et les résultats se trouvent en annexes.

Tableau 1 Emissivité et bilan explicite de rayonnement.

<i>simulation sur 10 ans</i>	Echange de chaleur		Echange d'humidité		Accumulation d'humidité	
sans émissivité	-1 553		-19,3		11,1	
émissivité 1	-1 201	-23%	-12,4	-36%	7,4	-33%
émissivité 1 + bilan	-1 706	42%	-25,1	102%	11,8	59%
émissivité 2	-1 201	-23%	-12,4	-36%	7,4	-33%
émissivité 2 + bilan	-1748	46%	-27,2	119%	12,2	65%
<i>simulation sur 1 an</i>						
émissivité 2	-122		-2,4		5,7	
émissivité 2 + bilan	-177	45%	-4,1	71%	8,9	56%
		2,46%		8,37%		3,39%

On constate trois choses :

- L'échange radiatif de la surface extérieure avec l'environnement joue un rôle important dans le transfert de masse. L'accumulation d'humidité est réduite d'un tiers (cf. ligne 2). Cependant, en mode simplifié, une imprécision sur de coefficient d'émissivité n'a pas d'impact significatif.
- En autorisant le mode *Bilan explicite de rayonnement*, les résultats obtenus sont sensiblement différents et vont dans un sens défavorable. Cela corrobore ce qui a été exposé lus haut. Le rafraichissement nocturne aggrave la condensation. Il est primordial de considérer cet élément.
- Ce mode de calcul autorisé, il faudra connaître avec plus de précision la valeur de l'émissivité. Cependant, l'équipe d'IBP recommande d'utiliser ce mode même si les données supplémentaires ne sont pas précises.

4. Conditions initiales

Dans cet onglet on rentre l'humidité à la construction. Les valeurs par défaut doivent être supprimées pour les deux murs en pisé et remplacées par les valeurs issues des résultats des essais Proctor réalisés par l'ENTPE.

Tableau 2 Humidité initiale

Cas	Densité sèche [kg.m ⁻³]	TEO [kg.kg ⁻¹]	Teneur en eau WUFI [kg.m ⁻³]
Cas 1	1860	11,9	222
Cas 2	1600	24,0	384

NB : Pour le cas des rénovations avec ajout d'isolation extérieure par exemple (cf projet Mulhouse de Gest'énergie) il faut d'abord lancer une simulation sur la paroi existante afin de connaître la teneur en eau après stabilisation. Cette valeur est ensuite reportée dans la simulation de la paroi rénovée. Attention à la date de début de simulation. En effet même si la teneur en eau d'une paroi existante est dite stabilisée, elle n'est pas constante tout au long de l'année.

5. Option de calcul.

L'autorisation d'un pas de temps variable permet de réduire les erreurs de convergence. Ces erreurs peuvent avoir de multiples origines : un maillage inadapté, les valeurs de certains coefficients etc.

En annexe figure une explication illustrée de cette option (Adaptative Time Step Control)

6. Climat extérieur

Le climat extérieur choisi parmi ceux disponibles dans la bibliothèque de WFI.1D est celui de Trier, ville allemande distante d'une centaine de kilomètres à vol d'oiseau. Cependant il est préférable de continuer les recherches pour se procurer un fichier météo de Dehlingen ou d'Alsace bossue ou encore de créer un fichier météo à partir de données fournies séparément.

WUFI.1D est compatible avec les formats suivants :

- *.WAC (WUFI peut convertir un fichier météo fait sur Excel en *.WAC)
- *.TRY (utilisé par Pléiades comfie)
- *.WBC
- *.WET
- *.DAT
- *.IWC
- *.EPW
- *.KLI
- *.AGD

Un fichier *.WAC peut contenir les données suivantes :

SGH	[W.m ⁻²]	Global Horiz. Radiation, short-wave
ISDH	[W.m ⁻²]	Direct Horiz. Radiation, short-wave
ISD	[W.m ⁻²]	Diffuse Radiation, short-wave
ILAH	[W.m ⁻²]	Atm. Counter Horiz. Radiation, long-wave
ILTH	[W.m ⁻²]	Terr. Counter Horiz. Radiation, long-wave
ISM	[W.m ⁻²]	Measured Radiation, short-wave
ILM	[W.m ⁻²]	Measured Radiation, long-wave
CI	[-] 0..1	Cloud Index
WV	[m.s ⁻¹]	Wind Velocity, vect. Average
WS	[m.s ⁻¹]	Wind Speed, skal. Average
WD	[°] Nord=0	WindDirection
RN	[mm.h ⁻¹]	Normal Rain
RM	[mm.h ⁻¹]	Measured Rain
TA	[°C]	Air Temperature
HREL	[%] 0..1	Relative Humidity
PSTA	[hPa]	Air Pressure at Station Height
PMSL	[hPa]	Air Pressure at MSL

NB : Pour autoriser le bilan radiatif il faut impérativement que les données SHG ; ILAH ; ILTH soient renseignées et que le coefficient d'émissivité soit connu avec précision. De même pour tenir compte de la pluie battante il faut disposer des données suivantes RN ; WD et WS.

Analyse des résultats.

Le rapport d'erreur de convergence nous indique :

- le nombre d'échec de convergence (1 à 2 par an est acceptable)
- NB** : Ce nombre ne renseigne pas l'importance de l'échec
- le nombre d'échec d'absorption de pluie

Cependant, les éléments les plus probants sont les Balance 1 et Balance 2.

$$\text{Balance 1} = (kl + dl) - (kr + dr) \quad [\text{kg.m}^{-2}]$$

kl : transport capillaire du côté extérieur

dl : diffusion de vapeur du côté extérieur

kr : transport capillaire du côté intérieur

dr : diffusion de vapeur du côté intérieur

$$\text{Balance 2} = \text{Teneur en eau finale} - \text{Teneur en eau initiale} \quad [\text{kg.m}^{-2}]$$

Dans l'idéal Balance 1 = Balance 2, est le calcul est considéré comme fiable.

Interprétation résultats :

Sur WUFI.1D, on peut visualiser les résultats sous forme de graphes : l'évolution en fonction du temps de grandeurs comme :

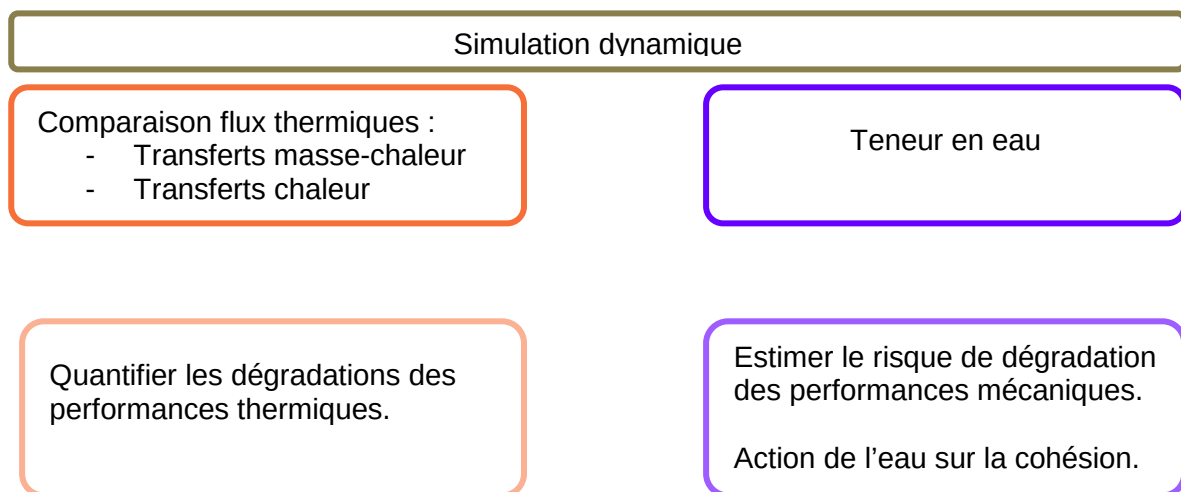
- la température
- l'humidité relative
- le flux thermique
- le flux hydrique
- la teneur en eau
- etc.

NB : Ces graphes sont disponibles pour chacune des couches de la paroi et pour des points précis qu'on aura spécifiés lors de la création du maillage.

Deux grandeurs nous intéressent particulièrement :

- la teneur en eau $[\text{kg.m}^{-2}]$ (*)
- le flux de chaleur (transports masse-chaleur / transport chaleur seule)

(*) attention aux unités différentes entre les coefficients, les grandeurs des graphes, etc.



CONCLUSION.

Le projet du Centre d'Interprétation de Patrimoine Archéologique de Dehlingen interpelle les connaissances communes et soulève plusieurs interrogations. Les sollicitations hydriques vont-elles diminuer la résistance et la durabilité de la structure ? Les transferts d'humidité vont-ils dégrader les performances thermiques du bâtiment de manière significative ?

A l'heure actuelle, la recherche sur les propriétés hydriques du pisé est balbutiante. De surcroît, les résultats obtenus pour un type de pisé ne sont pas transposables d'un pisé à un autre. Son comportement thermo-hydrique est fortement dépendant de la terre utilisée : sa granulométrie, la nature de l'argile mais aussi de sa mise en œuvre : énergie de compactage, teneur en eau à la construction, soin apporté au séchage.

Dans les simulations thermiques dynamiques, le transport d'humidité à travers les parois n'est souvent pas considéré. Pourtant, l'accumulation d'eau au sein des matériaux réduit leur résistance thermique, les consommations de chauffage sont sous-évaluées. Dans quelle mesure les performances thermiques sont-elles dégradées par ce transport ?

Afin de pouvoir simuler le comportement thermo-hydrique du pisé, nous avons utilisé le logiciel WUFI.1D. Les phénomènes de fixation et de transport d'humidité au sein d'un matériau poreux sont complexes et nécessitent d'être simplifiés. Le modèle sur lequel le programme repose procède à de nombreuses hypothèses et requiert un certain nombre de paramètres thermiques et hydriques.

Les données dont nous disposons aujourd'hui sont la masse volumique sèche et la porosité. Le Centre d'Innovation et de Transfert Technologique d'Alsace est chargé des essais de détermination de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la perméabilité à la vapeur d'eau du pisé à l'état sec.

L'utilisation de WUFI.1D est pour le moment prématurée. Il faudrait encore examiner la détermination expérimentale de leurs paramètres. Les premières tentatives de simulation sous WUFI.1D ont révélé qu'il faudrait mener d'autres essais comme la détermination de la répartition porométrique, et des courbes de sorption et de succion.

Les résultats de la simulation des transferts de masse et de chaleur pourront nous renseigner sur les performances thermiques effectives de la paroi composite en pisé. L'évolution de la teneur en eau dans le temps devra être renvoyée au Laboratoire des Géomatériaux de l'ENTPE, compétent pour évaluer la durabilité du pisé.

L'agence Nunc Architectes est précurseur dans l'utilisation de cette paroi composite. Cette situation est à la fois exaltante et délicate. Tous projets innovants rencontrent des difficultés de réalisation et avancent par tâtonnements. Cependant cette démarche, qui s'apparente à la recherche, permet d'ouvrir de nouvelles perspectives et participe à l'évolution de la technique constructive.

BIBLIOGRAPHIE

[COL, 2004] Florence COLLET. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de Génie Civil à faible impact environnementaux. Thèse, Génie Civil. Rennes : INSA de Rennes, 2004, 252 f.

[CRA, 1996] P. CRAUSSE, J.P LAURENT et B. PERRIN. Influence de deux modèles d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériau poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermodynamique de parois de bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, février 1996, vol. 35, n° 410, pp. 95-106.

[HAL, 2010] Matthew HALL and David ALLISON. Transient numerical and physical modeling of temperature profile evolution in stabilized rammed earth walls. *Applied Thermal Engineering*, avril 2010, vol. 30, n° 5 pp. 433-441

[HAL, 2009a] -, David ALLISON. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, septembre 2009, vol. 44, n° 9, pp. 1935-1942.

[HAL, 2009b] -, David ALLISON. Influence of cementitious binders content on moisture transport in stabilized earth materials analysed using 1-dimensional sharp wet front theory. *Building and Environment*, avril 2009, vol. 44, n° 4, pp. 688-693.

[HAL, 2009c] -, David ALLISON. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, mars 2009, vol. 29, n° 4, pp. 40-747.

[HAL, 2008] -, David ALLISON. Assessing the moisture content-dependent parameters of stabilised earth materials using the cyclic-response admittance method. *Energy and Building*, mai 2008, vol. 40, n° 11, pp. 2044-2051.

[HAL, 2007] -. Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *Building and Environment*, janvier 2007, vol. 42, n° 1, pp. 139-145.

[HAL, 2006] -, Youcef DJERBIB. Moisture ingress in rammed earth - Part 2 - The effect of the soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building MATERIALS*, juillet 2006, vol. 20, n° 6, pp. 374-383.

[HAL, 2004] -, Youcef DJERBIB. Moisture ingress in rammed earth - Part 1 - The effect of the soil particle-size distribution on the rate of capillary suction. *Construction and Building MATERIALS*, mai 2004, vol. 18, n° 4, pp. 269-280.

[HOU, 2006] Hugo HOUBEN et Hubert GUILLAUD. *Traité de construction en terre*, 3^{ème} édition, Parenthèses, (Marseille 2006), 355 p.

[GRO, 2009] Olivier GROSSEIN. *Modélisation et simulation numérique des transferts couplés d'eau, de chaleur et de solutés dans le patrimoine architectural en terre, en relation avec sa dégradation*. Thèse, Océan Terre et Hydrologie. Grenoble : Univ. J.F Fourier, 2009, 226 f.

[LAU, 1984] Jean-Paul LAURENT. *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaire : Optimisation d'outils de mesure « in-situ » des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre*. Thèse, Génie Mécanique. Grenoble : INP Grenoble, 1984, 232 f.

[SAM, 2008] Driss SAMRI. *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. Thèse, Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2008, 284 f.

SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1

Rapport caractérisation de la terre du projet Dehlingen par l'ENTPE, mai 2011.

Annexe 2

Climat Dehlingen, Annexe 7 *La chevêche d'Athéna d'Alsace* Bossue, Anaëlle ATAMANIUK, 2007

Carte de gel issue de la norme NF EN 206-1, 2005

Carte de gel établie par le Lerm, avril 2011

Carte de niveau de salage issue de la norme NF EN 206-1, 2005

Annexe 3

Matthew HALL, David ALLISON. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, septembre 2009, vol. 44, n°9, pp. 1935-1942.

Matthew HALL , David ALLISON. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, mars 2009, vol. 29, n°4, pp. 4 0-747.

Matthew HALL , Youcef DJERBIB. Moisture ingress in rammed earth - Part 2 - The effect of the soil particule-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building MATERIALS*, juillet 2006, vol. 20, n°6, pp. 374-383.

Matthew HALL , Youcef DJERBIB. Moisture ingress in rammed earth - Part 1 - The effect of the soil particule-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building MATERIALS*, juillet 2006, vol. 20, n°6, pp. 374-383.

P. CRAUSSE, J.P LAURENT et B. PERRIN. Influence de deux modèles d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériau poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermodynamique de parois de bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, février 1996, vol. 35, n°410, pp. 95-106.

Annexe 4

Determination of Material Properties for Hygrothermal Calculation with WUFI

Annexe 5

Annexe 2 PRT A. Raguideau,

Annexe 6

Fiches simulation WUFI.1D n°1

Fiches simulation WUFI.1D n°2

Fiches simulation WUFI.1D n°3

Fiches simulation WUFI.1D n°4

Fiches simulation WUFI.1D n°5

Fiches simulation WUFI.1D n°6

Fiches simulation WUFI.1D n°7

Annexe 7

Présentation de Nunc Architectes