

Anaël Courjaud
La Prépa Des INP Bordeaux
Promo 9

Rapport de stage

Stage ouvrier en Entreprise, 2A fin de cursus.

Sujet : Restauration du bâti ancien.

Sommaire

A. Introduction

B. Contexte et modalités du stage

C. Présentation synthétique de l'Entreprise

D. Description des chantiers effectués

I. Semaine 1

II. Semaine 2

III. Semaine 3

IV. Semaine 4

E. Explication des principales notions scientifiques mises en jeu

I. Foisonnement, empilement apollonien et squelette granulaire

II. Le cycle de la chaux, chaux aérienne, chaux hydraulique et ciment

III. Hygrométrie, point de rosée, frein-vapeur, capillarité

F. Tour d'horizon de différentes techniques constructives intéressantes

I. Tadelakt

II. Construction avec isolation paille, paille qui peut être porteuse :

III. Bâti en terre crue

IV. Poêle de masse

G. Conclusion

A. Introduction

Mon objectif pour ce rapport dans son ensemble : restituer le plus synthétiquement possible le tour d'horizon de cette partie de l'écoconstruction qui m'a été donné d'apercevoir grâce à ce stage et à mes recherches personnelles.

Je cherche également à faire une présentation attractive, désacralisant le secteur du bâtiment en repoussant son côté inaccessible (en tout cas chez les jeunes et les personnes non-informées), montrer que c'est possible et sensibiliser à l'écoconstruction.

Nous le savons tous, la construction moderne est très polluante, au même titre que l'industrie ou encore le transport de marchandises. Pour remédier à cela, une des solutions réside dans l'écoconstruction. Je vais m'efforcer durant ce rapport à vous en transmettre certaines des notions que j'ai vues ou apprises.

B. Contexte et modalités du stage

Stage ouvrier écourté à cause de mon opération à la cheville. Le stage s'est donc déroulé du Lundi 3 Mai au Jeudi 27 Mai 2021 (4 semaines). Camille m'hébergeait durant toute la durée du stage, sauf les Week-ends. Nous travaillions 35 h par semaine, du Lundi au Jeudi. Nous allons numéroter ces 4 semaines de 1 à 4. Nous changions de chantier chaque semaine, l'objectif étant de finir à temps chaque semaine en gardant une qualité optimale. Mon rôle durant ce stage a été d'évoluer aux cotés de Camille et des différents renforts présents (clients ou travailleurs engagés par Camille) avec une répartition dynamique et équilibrée des tâches en fonction des situations. Le travail de réflexion, de prévision et d'organisation étant effectué en amont ou à l'arrivée sur les lieux du chantier, j'avais le même « statut » que les autres car j'apprenais rapidement les diverses techniques et procédures associées aux différentes tâches.

Un chantier est toujours un ensemble très complexe de paramètres nécessitant des gens qualifiés pour le mener à bien mais en soit, les tâches isolées restent, en tout cas de ce que j'ai vu, d'une étonnante simplicité. Je pense que la réelle compétence/virtuosité d'un artisan comme Camille réside dans l'amont d'un chantier, avec son lot de diagnostics, contacts avec le client, négociations, acheminements des matériaux des outils et de la main d'oeuvre, choix techniques, imagination des procédures et autres questions d'organisation et de logistique...

C. Présentation synthétique de l'Entreprise

Ce stage se déroulerait dans le Lot, sous la direction de M. Camille Bonhert, le chef et unique employé de son entreprise. Je l'ai rencontré sur un chantier participatif d'une semaine d'un ami commun (isolation d'une pièce selon la technique terre/paille) en Juin dernier. Nous avons, à cette occasion, beaucoup échangé et j'ai notamment appris qu'il a passé pas mal de temps en Andalousie où il a commencé la construction écologique, en parallèle de ses études de physique-Chimie.. Il a l'habitude des chantiers participatifs en éco-construction et lance son entreprise en 2012 sans arrêter de suivre diverses formations. Il est maintenant spécialisé en enduits écologiques à base de chaux, terre, chanvre etc.. et notamment le Tadelakt (technique très difficile à réaliser).

Camille Bonhert et son entreprise Enduits Naturels Décoratifs , description sur le site : <http://camillebonhert.com>

« C'est au cours d'une dizaine d'années passées en Andalousie, au cœur d'une hacienda, que sont nées mes premières constructions écologiques. En parallèle de mes études de physique-chimie (licence), j'y ai bâti en 2005 ma première maison en paille.....

Animation de 5 chantiers participatifs près de Séville

En 2008, je co-dirige un chantier participatif en Suisse pour la construction d'un corps de ferme traditionnel en paille.

De retour en France, j'intègre en 2010 une formation d'Ouvrier Professionnel en Restauration

du Patrimoine (OPRP) dans l'Aude. Je me spécialise peu à peu dans les enduits (chaux-terre), j'approfondis des techniques telles que le tadelakt, le stuc et le béton ciré sur plusieurs chantiers et m'atèle plus généralement à l'apprentissage des différentes techniques de restauration du patrimoine (ouverture, taille de pierre, ardoise...)

- 2012 : création de *Enduits Naturels Décoratifs* en Alsace (où j'ai grandi) pour y passer cinq années où des opportunités de chantiers très différents vont me permettre de mettre en pratique mes connaissances. Durant ce temps, de nouvelles formations viennent aussi compléter mes acquis :
 - 2013 : propaille au Gabion
 - 2014 : formation Renovation Thermique du bati ancien avec JP Oliva »

Prestations :

Décoration : Tadelakt, stuc, badigeon, béton ciré, enduit à la chaux, à la terre...

Gros œuvre : Restauration du patrimoine, isolation écologique, enduits de façade...

D. Description des chantiers effectués

Semaine 1

	Lieu	Client	Contexte	Mission	Remarques
Semaine 1	Faycelles	Nicolas et Maria, amis de Camille, anciens guides touristique au Portugal	Rénovation d'un vieux bâtiment en pierre pour s'y installer	Enduit intérieur de finition chaux/sable sur toute la surface	Nicolas s'est occupé de l'acheminement des matériaux et il travaillait avec nous.

Pour ce chantier, nous devons poser un enduit de finition sur tous les murs (~80 m² de surface à enduire) d'une petite maison en pierre de 2 salles réparties sur 2 étages. END avait déjà au préalable posé un enduit de corps isolant de 5 cm (correction thermique) à la perlite expansée (petits graviers de roche volcanique avec des propriétés isolantes). Cet enduit de corps fait également office de forme (voir glossaire) et offre donc une surface plane et régulière pour l'enduit de finition de 1 cm d'épaisseur. Il nous a fallu préparer une vingtaine de bétonnières pour recouvrir toute la surface.

Recette pour une bétonnière avec des seaux de 10-12 L :

- 8 sable de finition (0-2mm de diamètre)
- 12,5 kg de NHL2
- 3L de barbotine d'argile
- de l'eau à consistance (crémeuse)

Ici, le sable représente la charge du mortier, la chaux NHL2 est le liant hydraulique et aérien (plutôt souple et perspirant), l'argile sert de pigment et a des propriétés liantes.

Pour enduire, il faut :

- mouiller le support d'accroche pour pas que l'enduit sèche trop vite
- projeter une couche de 1 cm au sablon (projeteuse à air comprimé)
- dresser la surface avec une règle (aplanir et boucher les gros trous)
- laisser tirer un peu
- Talocher avec une grande taloche pour tasser, gommer les imperfections, faire ressortir la laitance et boucher les petits trous
- laisser tirer encore
- éponger avec la taloche-éponge pour faire ressortir le grain et donner le rendu final recherché



Pierres avec 4 cm d'enduit à la perlite Enduit de finition taloché VS pas encore taloché

Le mur est donc recouvert de 5 cm d'enduit à la chaux dont 4 cm isolant et garantissant une bonne gestion de l'humidité dans le mur et 1 cm esthétique, solide et avec de bonnes propriétés hygroscopiques. Pour changer la couleur, on peut appliquer des badigeons colorés aux pigments naturels. Le tout ayant très grande inertie thermique de par la masse du mur en pierre, on aboutit à une maison qui écrête les pics extérieurs de température, agréablement fraîche en été et dont les murs stockent la chaleur en hiver sans pour autant subir de problèmes de condensation. C'est bluffant comment le ressenti est différent lorsque que l'on se tient dans ce genre de maison par rapport aux constructions modernes (post seconde Guerre Mondiale)

Semaine 2

	Lieu	Client	Contexte	Mission	Remarques
Semaine 2	Montet-Et-Bouyal	Mme Piltant, magistrate	Rénovation d'une grande et vieille maison en pierre pour s'y installer	Dalle chaux/pouzzolane dans 6 pièces différentes	Camille a engagé son voisin Aurélien comme renfort.



Phase d'apport de matière et de tirage à la règle d'une Dalle en chaux/Pouzzolane

Il fallait cette fois créer des dalles en pouzzolane (roche volcanique) dans 6 pièces différentes de la maison, dont une à l'étage. Environ 50 m² de surface avec une épaisseur allant de 10 à 20cm donc au moins 5 m³ de matière à acheminer, mélanger/assembler, transporter, couler et former/dresser pour avoir des surfaces planes.. En conséquence mon maître de stage avait acheminé 6 big bags (1 big bag = 1 m³) de gravier de Pouzzolane (7-15 mm de diamètre), 2 big bags de sablede Pouzzolane (0-4 mm), pas mal de sable classique de 0-4 mm, une cinquantaine de sacs de 35 kg de chaux hydraulique 5 (NHL5) et de l'eau sur place.

Nous avons commencé par décaisser les sols des pièces avant de créer un hérisson dans les pièces dont le sol était en communication directe avec la terre (au rez de chaussée). Un hérisson est un tapis de pierre qui sert à couper la capillarité (humidité remontant de la terre en dessous de la maison). Avant, les artisans prenaient la peine de faire des beaux hérissons précis avec des pierres dressées de 20 cm et bien rangées/calées entre elles. Maintenant, (ce qu'on a fait) on se contente de répartir du ballast (cailloux de chemin de fer) et d'étendre une couche de géotextile par dessus (une sorte de tissu) qui va empêcher la dalle (quand elle est encore liquide) de s'infiltrer entre les cailloux du pseudo-hérisson moderne (le ballast) et de finalement toucher la terre naturelle et ainsi recréer la chaîne de capillarité. Les beaux hérissons d'avant devaient être suffisamment bien agencés pour faire également le boulot du géotextile.

La recette de notre béton pour une bétonnière (en seaux de environ 11 L) :

- 6 seaux de grosse Pouzzolane (gravier de 7 à 15 mm de diamètre)
- 2 seaux de petite Pouzzolane (sable de 0-4 mm)
- 2 seaux de sable classique de 0-4 mm
- 17.5 kg de chaux hydraulique 5 (un demi sac de 35 kg)
- 1 seau et demi d'eau (il fallait un produit plutôt sec)

Le choix technique de la dalle en Pouzzolane découle du fait que la cliente voulait des matériaux les plus naturels possible, tout en gardant la qualité, le confort et la durabilité (d'où la chaux et la pouzzolane). Les éléments en béton de chaux sont très perspirants, la Pouzzolane a une densité très faible pour une roche minérale (0,85) et est expansée (plein de

bulles d'air dues au fait que c'est une roche volcanique (la chaleur a expansé la roche)), elle est donc bien isolante. Enfin la chaux hydraulique réagirait avec la Pouzzolane pour devenir encore plus dure que prévu. On se retrouve donc avec, sous nos pieds dans la vie quotidienne, une dalle plane en pierre isolante, avec une dureté s'approchant du béton Portland ainsi qu'un bon comportement face aux problèmes d'humidité...

Semaine 3

	Lieu	Client	Contexte	Mission	Remarques
Semaine 3	Lissac	François, ami de Camille, écrivain et menuisier, ancien correcteur linguistique	Construction d'une maison ossature bois	Enduit de façade chaux/sable + badigeon esthétique et protecteur	François s'est occupé de l'acheminement des matériaux et il travaillait avec nous.



Façade en train de se faire enduire. On voit clairement la partie non enduite, la partie fraîchement projetée, la partie fraîchement dressée et la grande partie déjà talochée.

Il s'agissait ici d'enduire une façade de 50 m² puis d'y appliquer un badigeon protecteur pour la protéger des éléments.

Notre enduit était fait de chaux, de sable, d'argile et d'un peu de latex. Le badigeon était fait de colle à méthyl-cellulose (colle à papier peint), poudre de marbre (c'est la charge, avec une granulométrie très petite pour une finition très fine), pigments dissous dans du savon noir, caséine (protéine qui va produire de longs filaments qui vont « fibrer » le badigeon) et chaux aérienne en pâte pour durcir le tout. 2 couches appliquées au pinceau. Un tel badigeon est à renouveler tous les 5-10 ans selon les régions, c'est une couche sacrificielle destinée à protéger l'enduit de finition de la façade et à donner la couleur souhaitée en fonction des pigments.

Pour l'application, nous avons procédé de la même manière que pour l'enduit de finition de la semaine 1 à la différence près que l'on a pas épongé : projection au sablon, dressage à la règle, tassage et lissage à la taloche...

Semaine 4

	Lieu	Client	Contexte	Mission	Remarques
Semaine 4	Montet-Et-Bouxal	Mme Piltant, magistrate	Rénovation d'une grande et vieille maison en pierre pour s'y installer (la même)	Pose d'une finition de carreaux de terre cuite dans 2 salles d'eau	Camille a engagé Clément, un ami et collègue maçon de Toulouse comme renfort.



Les tomettes, disposées en damier, légèrement enfoncées dans la chape de mortier très sec.

De retour à Montet-et-Bouxal pour y installer des finitions à la tomette (petites briques de terre cuite) dans les salles d'eau. Il fallait d'abord couler une chape (gros sable et chaux pour faire un mortier très sec) puis y placer les tomettes en damier (Il fallait être très précis et faire un calepinage au préalable pour que le damier reste bien régulier). Avant de poser une tomette, il fallait étaler un peu de barbotine de chaux (chaux+eau avec une consistance très fluide) pour "coller" les tomettes à la chape encore fraîche. Ensuite petits coups de maillet pour ajuster les tomettes, on place les plinthes de la même façon puis on attend que le tout soit à moitié sec (quelques jours) pour couler les joints (poudre de marbre+chaux dans une consistance très fluide), les racler pour qu'ils pénètrent bien entre les tomettes puis les passer au vinaigre une fois secs pour nettoyer.

La grande salle prise en photo se trouve à l'étage, nous disposions d'un treuil pour monter les masses de mortier et de tomettes. Une petite scie à pierre nous permettait d'ajuster les tomettes en contact avec le mur et dans les coins.

E. Explication des principales notions scientifiques mises en jeu

I) Foisonnement, empilement appolonien et squelette granulaire :

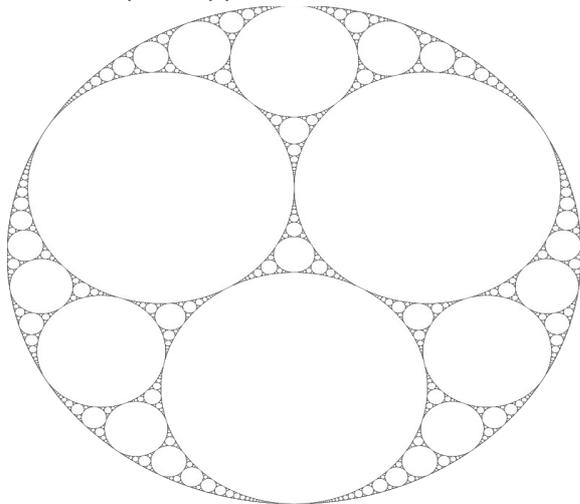
On appelle béton un ensemble d'agrégats (sable, graviers...) mélangé à de l'eau et à un liant. Il existe ainsi des bétons de ciment, des bétons de chaux, des bétons de terre (le liant est l'argile), des bétons de bitume (goudron)... Un béton sans gravier est un mortier : sa plus grande granulométrie est celle des sables qu'il contient. On joue sur la granulométrie d'un

béton en fonction de la qualité de la finition requise. Plus on cherche un rendu lisse et doux, plus la granulométrie de l'enduit doit être fine (par exemple la poudre de marbre de 0 à 350 micromètres de diamètre pour les stucs et tadelakts). Inversement, plus on recherche quelque chose de solide, plus il faut augmenter la granulométrie. C'est ainsi que l'on se retrouve à ajouter des rochers dans les bétons destinés à construire des barrages hydrauliques.

Faisons maintenant une petite expérience : mélanger un volume de gravier avec un volume identique de sable. Le mélange obtenu occupe moins de place que les deux volumes de grains pris séparément. Ce phénomène s'appelle le foisonnement ! En fait, cette augmentation de la compacité provient du fait que les grains de sable remplissent les vides entre les graviers. Il existe en fait une proportion unique de petits et de gros grains correspondant à une compacité maximale. Pour trouver cette proportion, on peut procéder par pesée de différents mélanges. Ainsi, pour augmenter la compacité (et donc la résistance) d'un matériau granulaire, la solution consiste d'une part à mélanger des grains de différentes tailles, et d'autre part à s'approcher de la proportion idéale de chaque taille de grains.

Après que le sable s'est inséré entre les graviers, il reste encore des vides entre les plus petits grains, qui pourraient être comblés par des grains encore plus fins. En répétant l'opération indéfiniment, serait-il possible d'obtenir un matériau plein, de porosité nulle, en remplissant les vides avec des grains de plus en plus petits ? On peut faire appel à la solution de l'empilement apollonien, dans lequel chaque interstice entre quatre sphères est rempli par une boule tangente à ces surfaces, et où ce principe est reproduit à l'infini dans le but d'atteindre la plus grande compacité possible. C'est une structure fractale qui a une réelle importance pratique qui a permis de développer des bétons de ciment ultra haute performances.

Ainsi, « la passerelle des anges » construite par les frères Ricciotti est une gigantesque poutre de 69 m en béton de ciment dont les performances s'approchent de l'acier. En effet, tout a été fait pour combler le maximum de vides au sein de la matière et on arrive à une proportion de vide de 2% par rapport aux 10% d'un béton de ciment conventionnel.



Un exemple d'empilement apollonien
(Source : Wikipédia)

La passerelle des anges dans l'Hérault (34)
(Source : office de tourisme)

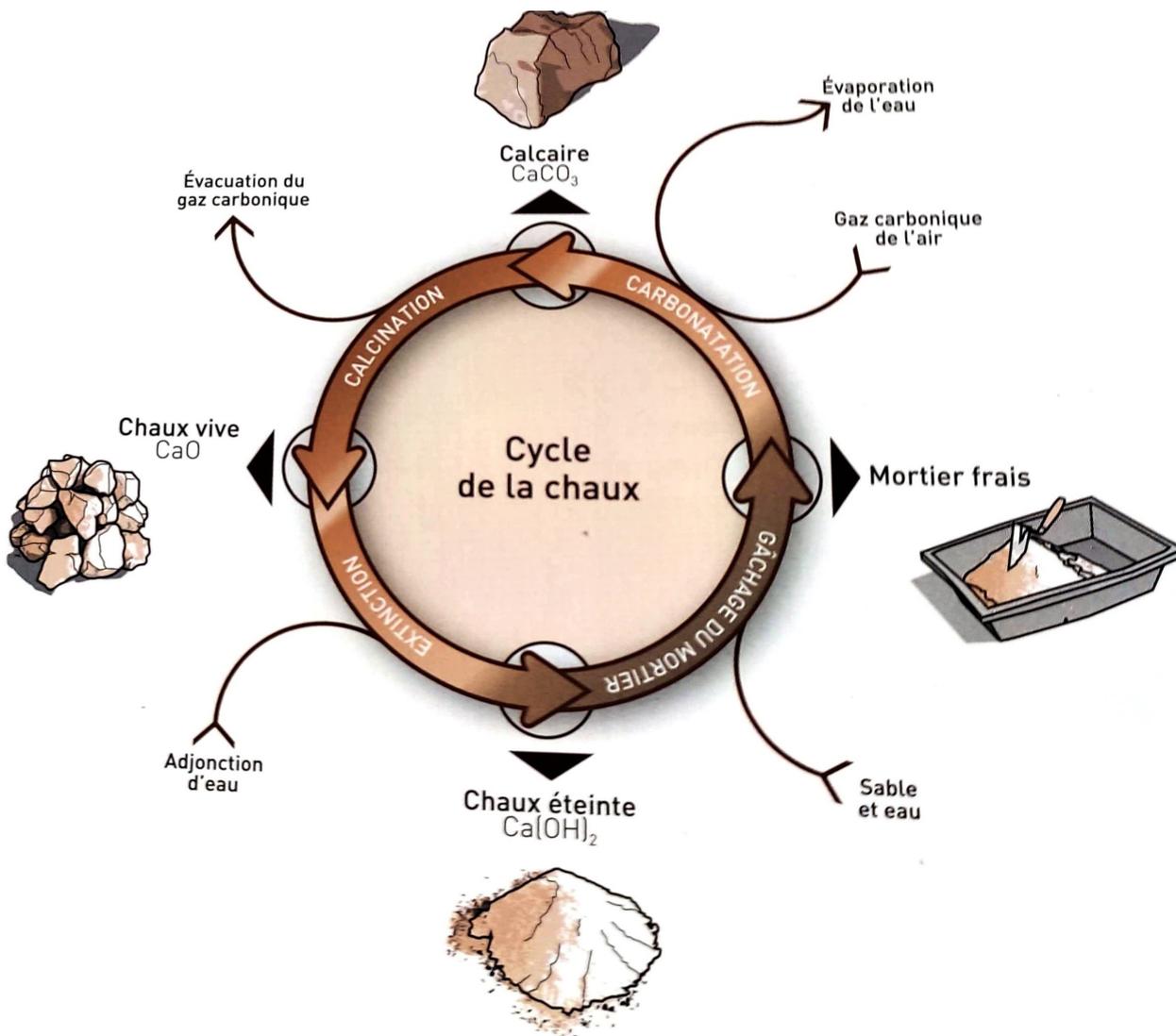
Cet amélioration des propriétés mécaniques est notamment due à l'amélioration de la structure du squelette granulaire de la matière. Chaque grain s'appuie sur tous ses grains environnants pour s'opposer à une contrainte, des chaînes de force se créent mais elles se rompent ou doivent faire des « détours » dès qu'elles tombent sur un vide. Ainsi, le meilleur squelette granulaire est celui d'un empilement apollonien car chaque grain est entouré par une infinité de non-vide, les chaînes de forces ne sont donc jamais rompues ou détournées. Toutes ces notions appartiennent au domaine de « la physique du tas de sable », discipline source d'innovations depuis plus de 30 ans maintenant.

Finalement, il en résulte que certains mélanges tout-prêt d'agrégats à bétons sont brevetés par des ingénieurs et dont chaque granulométrie y est en proportions idéales afin d'améliorer les performances mécaniques du produit.

II) Le cycle de la chaux, chaux aérienne, chaux hydraulique et ciment :

La chaux est l'un des matériaux les plus utilisés par END, autant en restauration du bâti ancien que en nouvelles constructions. Son intérêt principal réside en sa capacité d'imitation d'un procédé naturel qui relève des temps géologiques : la création de la roche !

Enfin du moins la création de la roche calcaire... en effet, on réussit, grâce au cycle de la chaux, à obtenir de la roche calcaire à partir... de roche calcaire. C'est en découvrant la chaux que nos ancêtres (preuves d'utilisation de chaux en Jordanie en 7500 avant J.C.) ont réalisés cet exploit ! Voici comment ça marche :



Le cycle de la chaux, illustration de Arnaud Misse.

C'est par **calcination** (combustion de roche calcaire (CaCO_3) à $\sim 800^\circ\text{C}$) que l'on obtient de la chaux vive (CaO) et du gaz carbonique (CO_2). Cette chaux vive est une base très intense utilisée pour le chaulage des lacs ou jardins, dans la sidérurgie ou encore dans de nombreuses applications chimico-industrielles. On ne l'utilise en revanche pas en construction, pour cela il faut d'abord provoquer la réaction d'**extinction** avec de l'eau. On obtient ainsi de la chaux éteinte (Ca(OH)_2) prête à l'emploi pour l'artisan. En immergeant ainsi de la chaux vive, celle-ci intègre dans sa structure atomique des molécules d'eau pour former de la chaux éteinte. Plus on laisse tremper, plus la qualité du produit sera élevée de par la cinétique de la réaction d'extinction. On a ainsi retrouvé des fosses oubliées d'extinction de chaux datant de la Grèce antique avec, au fond, de la chaux éteinte (particulièrement bien éteinte de fait) prête à l'emploi.

Ce procédé permet de produire de la chaux aérienne éteinte en pâte. Nous préciserons plus loin les termes « aérienne » et « en pâte ».

Après extinction suffisante il ne reste plus qu'à laisser sécher à l'air libre. La chaux durcit ainsi par réaction chimique avec le CO_2 de l'air (la réaction consomme une molécule de CO_2 et produit une molécule d'eau) pour reformer de la roche calcaire sèche (CaCO_3), roche identique à celle du départ avec laquelle on pourrait refaire de la chaux et ainsi de suite. C'est ainsi que le cycle de la chaux est complété et que l'on est retombé sur une roche calcaire après l'avoir calcinée, éteinte puis séchée. On remarque que ce cycle est « neutre en carbone », à part les émissions liées au chauffage à 800°C , car les gaz dégagés par la combustion initiale du calcaire sont re-consommés durant le séchage final.

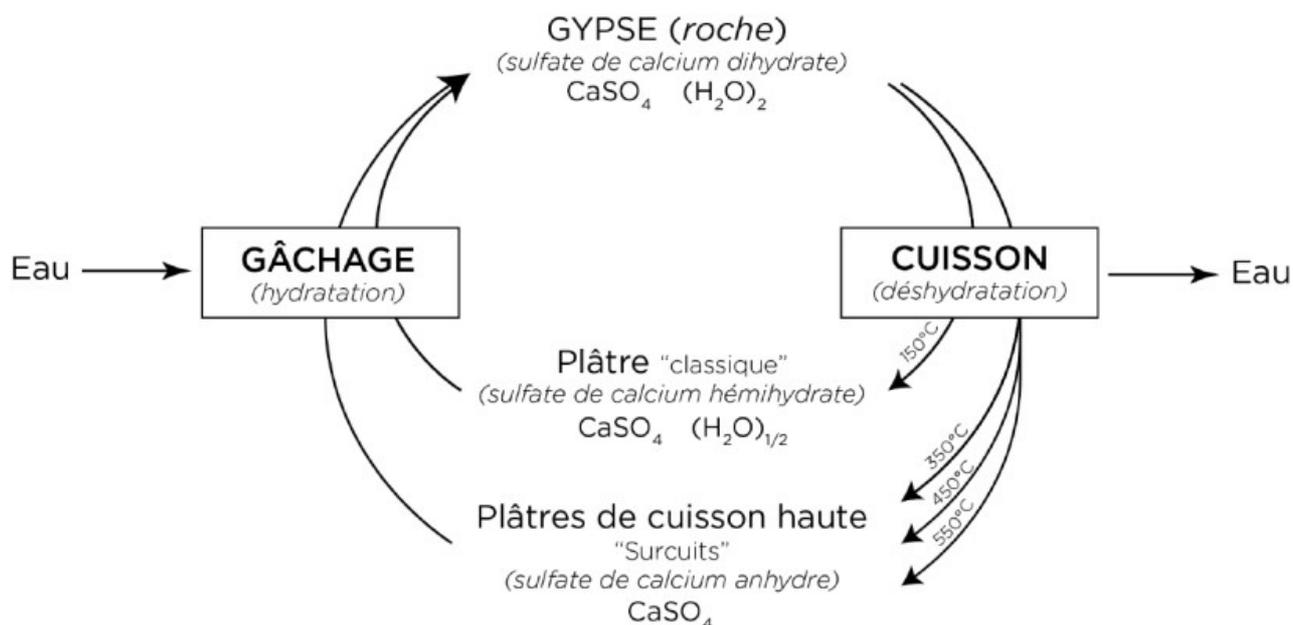
On appelle ce durcissement par réaction avec le CO_2 de l'air la **réaction aérienne**.

Bien évidemment, personne ne laisserait impunément sécher de la chaux éteinte sans la mettre en œuvre en la mélangeant avec du sable, des graviers, de l'argile ou encore des pigments pour faire des enduits, des dalles, des badigeons etc...

Ainsi la chaux pourra pleinement jouer son rôle de liant au sein des squelettes granulaires formés par les agrégats (sables, graviers etc..) en présence. Elle va se mettre à durcir grâce à son caractère aérien (réaction avec le CO_2 de l'air) et transformer des mélanges plus ou moins fluides en pierre, de la même manière que le ferait un ciment Portland classique.

Le processus présenté ci-dessus n'est plus que partiellement présent de nos jours. La chaux que l'on sort des bassins d'extinction est sous forme de pâte mouillée. On parle de chaux aérienne en pâte, on en trouve toujours dans le commerce mais elle est devenue plus rare que la chaux aérienne en poudre. Bien que de meilleure qualité elle reste moins adaptée à la production industrielle de par son procédé d'extinction, son conditionnement, son stockage et sa manutention. En effet, il faut laisser reposer pendant un certain temps de la chaux vive broyée dans des grands bassins d'extinction avant de conditionner la pâte mouillée obtenue dans des seaux hermétiques en plastique, difficilement disponibles sur une palette etc... Désormais la production industrielle de chaux aérienne est sous forme de poudre conditionnée dans des sacs en papier plus faciles à disposer sur des palettes, plus faciles à stocker et à manutentionner. En revanche, comme il est impossible de laisser sécher de la chaux aérienne en pâte pour ensuite la broyer afin d'obtenir de la poudre (il s'agirait là de poudre de calcaire et non de poudre de chaux aérienne éteinte !), les industriels agissent sur le procédé d'extinction pour éviter l'état pâte. Ils réussissent ainsi à obtenir une chaux aérienne éteinte en poudre mais dont l'extinction a été de moins bonne qualité voire trop partielle. Cela influe sur la qualité du produit final car une partie plus ou moins importante du mélange de mise en œuvre (mortier, badigeon etc...) ne réagira tout simplement pas et ne durcira pas comme prévu. Il en découle également des différences notables au niveau de la texture d'un mélange de mise en œuvre qui engendrent des difficultés d'application pour un artisan ou ouvrier. Dans l'ensemble, nous pouvons distinguer de nombreuses similitudes avec le plâtre qui est produit à partir de pierre de Gypse calcinée à $\sim 150^\circ\text{C}$ puis broyée pour obtenir de la poudre de plâtre prête à l'emploi.

LE CYCLE DES PLÂTRES



(Source : <https://platre.blog/2016/12/10/le-cycle-des-platres/>)

Nous avons, jusqu'à maintenant, uniquement parlé de chaux aérienne et de sa réaction avec le CO_2 de l'air. Tout ceci a plutôt l'air de bien fonctionner : nous réussissons à produire assez simplement (chauffage à $\sim 800^\circ\text{C}$ puis trempage dans de l'eau) un matériau qui permet à des mélanges plus ou moins liquides de durcir comme de la pierre... et pourtant il reste un gros problème : la disponibilité de gaz carbonique au sein d'un volume.

On a ainsi pu retrouver d'anciens ponts dont les piles (très gros piliers immergés soutenant le tablier), construites avec un mortier de chaux aérienne, n'ont toujours pas finies de sécher ! En effet, la combinaison du gros volume de la pile et du fait qu'elle soit immergée a rendu impossible durant des millénaires la réaction aérienne de la chaux au cœur de la pile. Nous sommes bel et bien face à un problème mécanique de taille ! C'est pour pallier ce problème ce problème de disponibilité en gaz carbonique que nous allons nous intéresser au deuxième grand type de chaux : la chaux hydraulique. Cette chaux durcit par réaction avec des molécules d'eau, on parle de réaction hydraulique. Par la même occasion, il se trouve que les propriétés mécaniques de la chaux hydraulique sont bien supérieures à la chaux aérienne (plus dure et plus résistante) et que le temps de prise est moins long.

La première sorte de chaux hydraulique aurait été inventée par les romains aux alentours du 1er siècle par ajout de pouzzolane (un certain type de roche volcanique très utilisé en écoconstruction) ou de brique pilée à de la chaux aérienne après cuisson, on parle de béton romain. Cette technique permet une prise hydraulique ainsi que plus de résistance mécanique, tout cela a notamment permis aux romains de construire leurs ouvrages d'arts si connus. Puis après la perte de cette technique, ce n'est qu'au 19^e siècle que Louis Vicat redécouvre les principes d'hydraulicité pour ensuite inventer le fameux ciment Portland avec les procédés de clinkerisation. Ce ciment est cette fois à prise purement hydraulique, contrairement au béton romain qui comprenait une partie hydraulique et une partie aérienne. Pour produire du ciment, il faut cette fois calciner des calcaires argileux, idéalement avec des proportions stoechiométriques de calcaire et d'argile. Cette calcination appelée la clinkerisation se fait à plus haute température (environ 1450°C) et les industriels actuels rajoutent beaucoup d'adjuvants plus ou moins controversés. Après broyage et d'autres procédés complexes, ces clinkers donnent du ciment que l'on conditionne dans des sacs en papier similaires à ceux de la chaux aérienne en poudre.

D'après Wikipédia, la seule fabrication du ciment est responsable de près de 5 % des

émissions mondiales de CO₂ dues :

- pour 40 % au combustible utilisé pour chauffer le cru (mélange de calcaire et d'argile) et provoquer sa réaction endothermique de décarbonatation.
- pour 60 % à la décarbonatation du calcaire même ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Lors de la prise d'un béton de ciment, il n'y a pas de CO₂ fixé, la prise se fait à l'eau contrairement à la prise de la chaux aérienne qui fixe la même quantité de CO₂ que celle émise lors de la décarbonatation.

Finalement, la fabrication du ciment (sous forme de poudre) émet en moyenne 850 kg de CO₂ par tonne de ciment. En 2018, environ 4100 mégatonnes de ciment ont été produites dans le Monde.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement (et souvent bien) son béton, on utilise un dosage dit « standard » de 350 kg de ciment par m³ de béton. La composition de 1 m³ de béton « standard » est donc de :

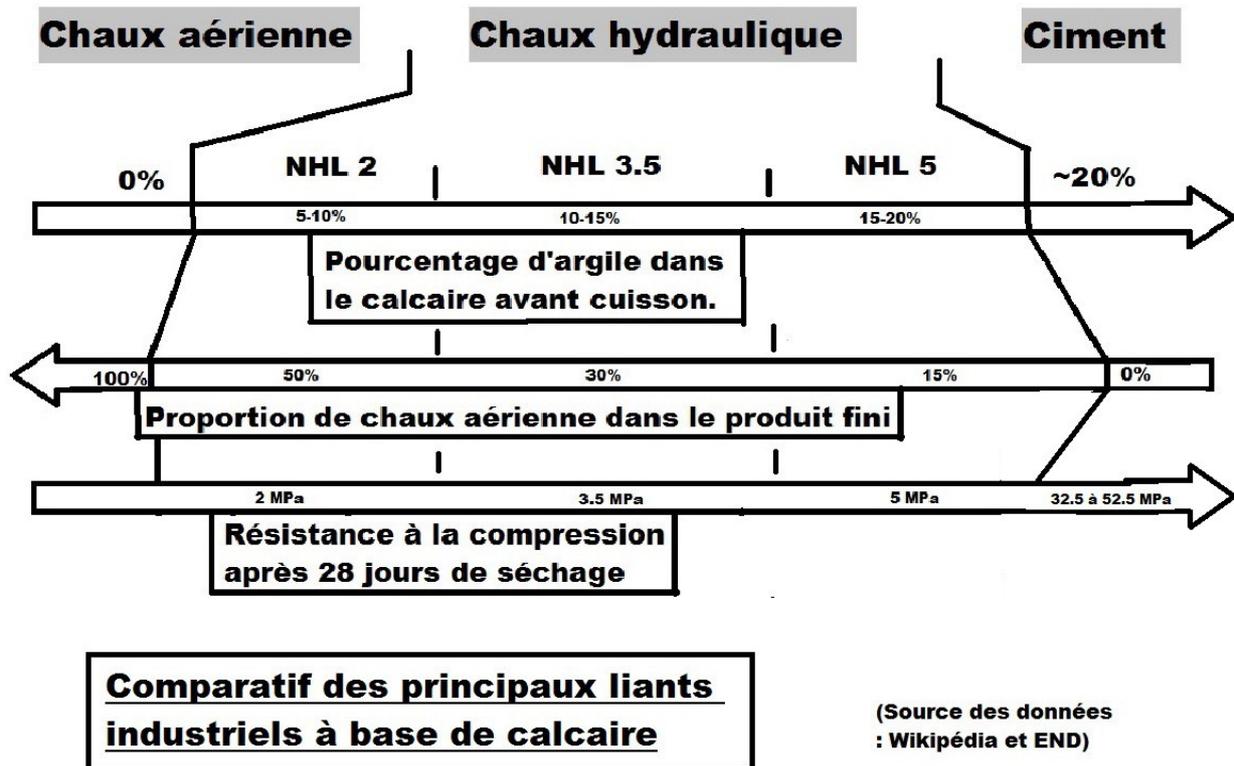
- 350 kg de ciment
- 680 kg de sable (granulométrie de 1 à 5 mm)
- 1 175 kg de gravier (granulométrie de 6 à 15 mm).

La densité d'un tel béton est d'environ 2 à 2,6. On peut donc s'amuser à calculer un ordre de grandeur du volume de béton coulé en 2018 (en supposant grossièrement que la totalité du ciment produit en 2018 a été mis en œuvre avec ces proportions là) : on parle de 2,9 m³ de béton par tonne de ciment donc on a 12 milliards de m³ de béton ce qui représenterait un cube de 2,3 km de côté, rien qu'en 2018 !

Nous parlons de ciment, de béton romain et de chaux aérienne mais nous avons toujours pas parlé du matériau le plus utilisé par END : la chaux hydraulique naturelle produite par l'usine de chaux de st-Astier !

Comme le ciment, elle est obtenue par calcination à environ 1300°C de calcaire argileux mais avec cette fois-ci, le réactif calcaire en excès. Il en résulte donc une partie hydraulique et une partie aérienne résultante de la calcination du calcaire en excès. On peut ainsi jouer sur les proportions pour obtenir des chaux plus ou moins hydrauliques, et donc plus ou moins résistantes. On appelle la chaux hydraulique naturelle NHL (Natural Hydraulic Lime) et les indices 2, 3.5 et 5 (3 catégories que l'on peut voir chez des vendeurs de chaux, à l'usine de chaux st-astier par exemple) précisent la résistance en megapascal (N/mm²) de la chaux à la compression au bout de 28 jours de séchage. Il faut savoir que plus la chaux est hydraulique, moins elle est perméable à l'air et à l'eau.

Le grade NHL 2 est utilisé pour fabriquer des mortiers très souples, par exemple pour les enduits sur murs fragiles, en terre ou pierres tendres. Les grades NHL 3,5 et 5 sont surtout utilisés pour monter des murs, les enduits extérieurs, exécuter des chapes, poser du carrelage. Plus une chaux est hydraulique, plus elle présente de résistance à la compression, moins elle est plastique. Pour simplifier les choses, on peut même représenter les choses de cette façon :



La proportion de chaux aérienne dans le produit fini est directement corrélée avec l'intensité du caractère hydraulique du produit. On voit que les caractéristiques mécaniques restent bien différentes entre le ciment Portland et la chaux hydraulique NHL5 : une résistance à la compression au bot de 28 jours de 32.5 à 52.5 Mpa contre 5 Mpa. C'est en partie dû aux adjuvants incorporés au ciment Portland mais on peut avoir recours à certaines ruses : par exemple dans le chantier de la semaine 2, nous avons préparé un béton à base de NHL 5, de sable, de sable de pouzzolane et de gravier de Pouzzolane. Il a été prouvé empiriquement que cette mixture, au bout d'un certain temps de séchage, pouvait atteindre une résistance à la compression d'environ 25 MPa ! C'est entre autres pour cette raison que END a fait ce choix technique pour le chantier de la semaine 2. END se demande même si on peut se permettre de comparer ça au béton romain, de par ce mariage supposé entre la partie aérienne du sac de chaux hydraulique et la pouzzolane.

Petites anecdotes en rapport avec le sujet :

Mon maître de stage m'a fortement conseillé d'aller essayer de décrocher une visite guidée au sein de l'usine de chaux de St-Astier (sur la route entre Bordeaux et Figeac). Je m'y suis donc rendu pour en apprendre plus sur les procédés de fabrication mais après discussion avec un des chefs d'équipe, une visite guidée était malheureusement impossible en ces temps de pandémie. En revanche, cette expédition m'a tout de même permise de découvrir des petits bouts d'infrastructure de l'usine ainsi que la carrière adjacente.

Durant son parcours, mon maître de stage s'est rendu en mission humanitaire, dans un pays où avait eu lieu une catastrophe naturelle. Il a été mandaté pour y étudier et améliorer les procédés de reconstruction qui se faisaient à la chaux aérienne car la chaux hydraulique et le ciment y étaient trop chers (fait surprenant car c'est l'inverse en France : le ciment est généralement le produit le moins cher). Il a ainsi pu observer qu'ils rajoutaient de la brique pilée dans leurs béton de chaux destinés aux fondations des bâtiments afin d'augmenter leur résistance. Ils imitaient en quelque sorte la technique du béton romain à la recherche de meilleures performances que la chaux aérienne seule, généralement pas ou peu adaptée aux fondations car trop tendre.

III) Hygrométrie, point de rosée, frein-vapeur, capillarité :

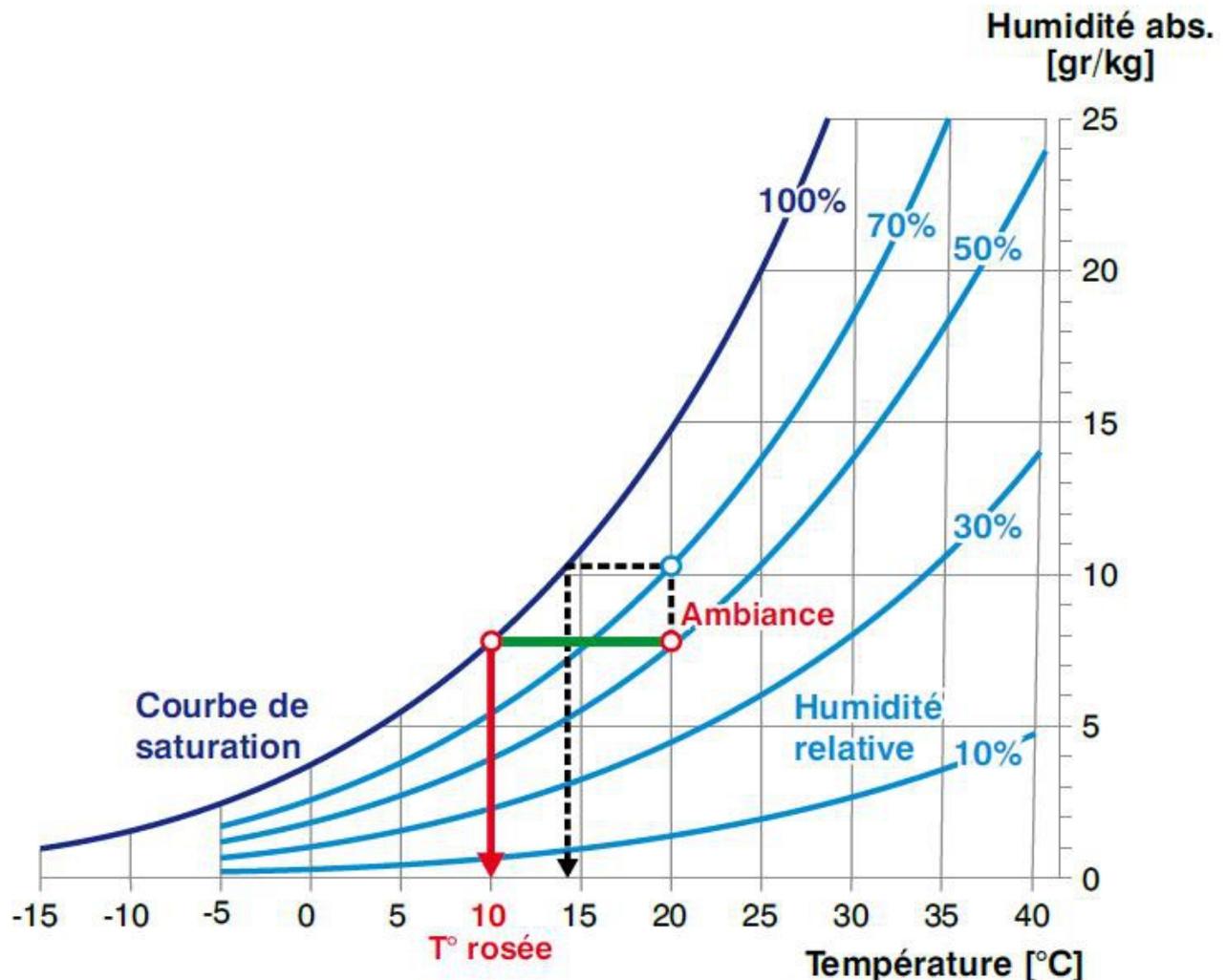
L'hygrométrie désigne la quantité d'humidité relative présente dans l'atmosphère. Le taux d'humidité relative indique ainsi le pourcentage de saturation de l'air en humidité. Un taux d'humidité relative de 50% revient à dire que l'air est à 50% de sa saturation en humidité. On estime ainsi que : l'humidité relative de l'air peut varier de 35 à 70% sans causer d'inconfort et de désagréments particuliers. Au-dessous de 20%, l'air nous paraît trop sec car on ressent un assèchement des muqueuses. Jusqu'à 80% l'ambiance reste supportable si la température n'est pas trop élevée. En été, la sensation d'inconfort est plus grande dans l'air humide que dans l'air sec, puisque l'évaporation de la sueur qui régule notre température de peau est ralentie. En effet, contrairement à l'air sec, l'air déjà chargé en humidité n'est pas très ouvert à accueillir une nouvelle humidité provenant d'un corps humain.

Cette notion d'hygrométrie est très importante pour la rénovation/construction d'espaces habitables pour différentes raisons :

- Le confort de l'atmosphère d'une pièce à vivre (cf. plus haut).
- La gestion de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant et de sa condensation.

De la condensation à l'intérieur d'une maison peut très rapidement être la source de grosses pathologies au sein d'un bâtiment et provoquer des surcoûts énergétiques et de réparations (dégradation précoce d'isolants, apparition de moisissures, pourrissement de la charpenterie...). Pour remédier à cela il faut découvrir ce qu'est un point de rosée et savoir maîtriser son apparition.

Tout d'abord, il faut comprendre que l'air contient toujours de la vapeur d'eau : plus un air est chaud, plus il peut en stocker et à l'inverse, plus un air est froid, moins il peut en stocker. Ainsi, un air chaud comportant un taux d'humidité relative de 50% verra ce taux augmenter en refroidissant et inversement. On peut aussi noter que la pression partielle de vapeur d'eau ne sera pas la même dans un air chaud et un air froid ayant les mêmes taux d'humidité relative. Considérons un air dont le taux d'humidité relative (THR) est de 100%, l'air est saturé en vapeur d'eau : c'est là qu'intervient le phénomène de condensation. L'air, trop chargé d'humidité va avoir tendance à en relarguer par condensation sur une surface ou autre. Si cet air se trouve dans une habitation par exemple, on va se retrouver avec des murs et des surfaces humides. Il va falloir aérer pour évacuer l'air trop humide et le remplacer par de l'air non saturé en humidité. Ainsi, à force, ce nouvel air va potentiellement être capable de recapturer les gouttelettes issues de la condensation précédente par évaporation. On peut également essayer de chauffer l'air de la pièce pour élever sa capacité de stockage d'humidité, ce qui va abaisser son THR, stopper le phénomène de condensation et potentiellement provoquer l'évaporation des fameuses gouttelettes. Ce n'est pas grave si cette situation n'est que passagère et vite traitée, mais cela peut devenir très problématique si il y a récurrence ou une trop longue exposition à la condensation.



Lien entre saturation, hygronomie et température de l'air. (Source : easy-therm.fr)

Vous l'aurez compris, il y a condensation et apparition de gouttelettes pathologiques dès que l'on atteint un THR de 100%. Dans nos régions tempérées, on considère que l'air intérieur est toujours plus humide que l'air extérieur à cause des activités humaines : la transpiration des habitants, la respiration, la prise de douche, de bains, la cuisine, le séchage du linge... Mais en général, le THR de 100% n'est que rarement atteint à température constante car on dispose souvent d'une bonne ventilation ou de matériaux régulateurs d'hygronomie : la terre crue est par exemple un excellent hygro-régulateur (elle va toujours avoir tendance à équilibrer le THR autour des 35-70%, pile la fourchette de confort de l'Humain). Le THR de 100% est généralement atteint par refroidissement de l'air, ce qui va abaisser la capacité de stockage d'humidité et donc augmenter le THR jusqu'à atteindre 100% et provoquer de la condensation. Dans une maison non ou mal isolée, ce refroidissement est généralement engendré par temps froid par l'intermédiaire des murs, des fenêtres ou autres surfaces communiquant avec l'extérieur. De l'air à température ambiante (20°C) va se refroidir au contact d'un mur froid et une partie de son humidité va se condenser rapidement car cet air ne sera plus en mesure de la stocker. C'est ainsi qu'apparaissent fréquemment des moisissures sur les murs donnant sur l'extérieur dans les maisons mal isolées des années 70 par exemple. Le différentiel de température entre l'air chaud intérieur et le froid extérieur provoque de la condensation par abaissement de la capacité de stockage d'humidité de l'air intérieur.

Le point de rosée est le moment auquel l'air est suffisamment refroidi pour que son THR atteigne 100%. Ici, le point de rosée se trouve à la surface de la face intérieure du mur car le mur est suffisamment froid. En revanche, plus on isole le mur par l'intérieur, plus on décale le point de rosée vers l'extérieur du mur. D'après END, il y aura forcément un point de rosée

quelque part dans le mur, surtout en hiver. Il y aura donc forcément, à un moment ou un autre, de l'eau liquide au sein du mur, ce qui va le détériorer, détériorer l'isolant etc... La démarche de END consiste en accepter ce point de rosée tout en faisant en sorte que l'humidité créée sera correctement évacuée notamment par capillarité. C'est maintenant que tout devient compliqué : il faut à la fois bien isoler pour éviter des pertes de chaleur, et gérer les excès d'humidité qui découlent du gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur. Plus une chaux est aérienne, plus on dit qu'elle est perspirante (elle est étanche à l'air mais laisse passer la vapeur d'eau) or on cherche à faire des enduits à la fois solides et perspirants. On voit là que la chaux hydraulique présente un bon compromis par rapport à la chaux aérienne pure (trop tendre) et le ciment (pas assez perspirant). On cherche aussi à favoriser la migration de la vapeur d'eau vers l'extérieur avec des notions de steam diffusion :

La valeur S_d , la résistance à la diffusion de vapeur, désigne l'épaisseur de la couche d'air équivalente à la diffusion (en mètres) La valeur S_d se calcule de la manière suivante : $S_d = \mu \times d$ (m) dans laquelle d est l'épaisseur du matériau exprimée en mètres

Exemple : panneau d'isolation en fibre de verre de 100 mm pour l'extérieur avec $\mu = 1,3$

$$S_d = 1,3 \times 0,1 \text{ m} = 0,13 \text{ m}$$

Pour que la vapeur d'eau puisse migrer à travers une paroi il faut que la *valeur S_d* du matériau qui se trouve à l'intérieur de la maison soit plus élevée (en général on s'accorde sur un facteur 5) que la *valeur S_d* du dernier des matériaux qui constitue la façade. Il faut en outre qu'aucun des matériaux qui constituent la façade n'ait une *valeur S_d* plus élevée que la *valeur S_d* du premier des matériaux ce qui constituerait un frein à cette migration.

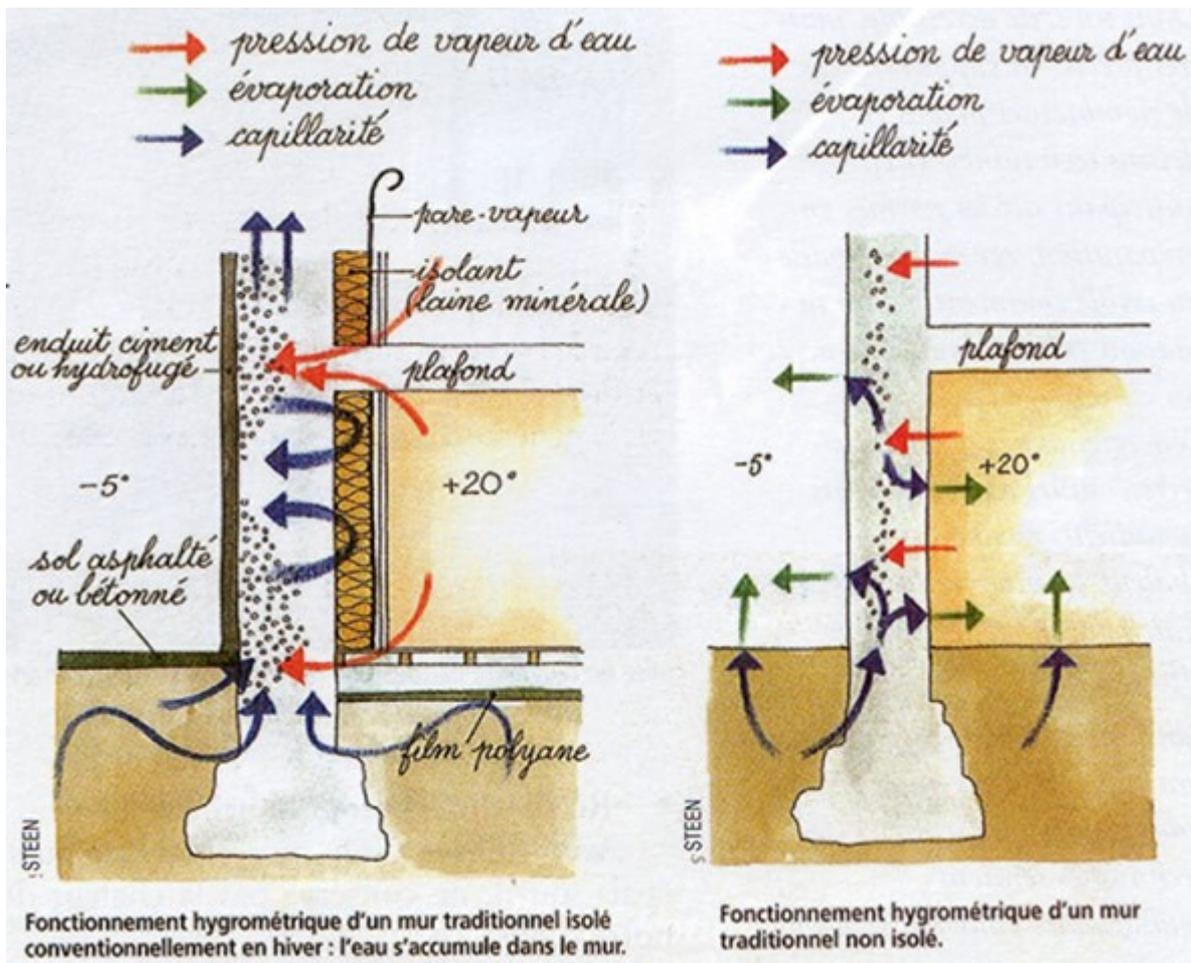
On recherche des isolants capillaires et perspirants, qui ne font qu'un avec le mur (enduit isolant à la perlite dans le chantier de la semaine 1). On recherche des murs solides et capillaires (les murs en pierre en rénovation du bâti ancien le sont particulièrement). Finalement, Jean-Pierre Oliva et ce schéma du site Tiez-Breiz résument très bien une partie des problématiques que j'ai évoqué plus haut :

" Pour bien comprendre, il faut savoir que l'air chauffé dans une habitation en hiver est en surpression par rapport à l'extérieur. Cet air cherche, un peu comme dans un pneu gonflé, à sortir de son logement, et comme il est chaud, il contient plus de vapeur d'eau que l'air froid. Il en résulte que, au fur et à mesure qu'il se rapproche de l'extérieur, il se refroidit et la vapeur se condense : c'est le point de rosée. Dans une maison en pisé par exemple, on peut avoir des tonnes d'eau en transit dans le mur sans qu'il y ait liquéfaction de la terre grâce à la capillarité. Celle-ci tracte les molécules d'eau vers les deux côtés du mur - intérieur et extérieur - où elles pourront s'évaporer.

Ce phénomène est souvent saisonnier : en hiver l'eau se condense, et en été, l'évaporation rafraîchit l'air intérieur par changement de phase.

Ce mur peut vivre des siècles si on le traite de façon correcte. Par contre, si on l'isole par l'intérieur, la condensation se fait alors dans l'isolant. Avec les isolants fibreux amorphes comme les laines minérales, l'eau s'accumule entre les fibres, ruine les capacités isolantes de ceux-ci et les détériore rapidement.

Alors, pour empêcher l'air chargé d'humidité de pénétrer dans la paroi (de l'intérieur vers l'extérieur), on pose un film étanche à l'air et à la vapeur d'eau qu'il contient du côté chaud de l'isolant, le fameux « pare-vapeur ». Mais cela n'est pas satisfaisant car ce film n'est jamais parfaitement continu : outre les raccords entre lès et les aléas de la pose, il est interrompu par les planchers, les refends, les baies vitrées. Comme un entonnoir, le pare-vapeur concentre donc la vapeur d'eau vers ces points faibles et, simultanément, il empêche l'évaporation car les défauts qui ont laissé entrer l'air en surpression n'offrent pas assez de surface d'évaporation à l'humidité qui s'est condensée. Le pare-vapeur est en fait un « pare-évaporateur » qui emprisonne l'eau dans le mur, et conduit à sa détérioration rapide. "



F. Tour d'horizon de différentes techniques constructives intéressantes

Durant ce stage et ma documentation pendant mes recherches personnelles, j'ai pu apercevoir et découvrir beaucoup d'anciennes et diverses techniques de construction écologiques et performantes qui m'ont marquées. Je vais essayer de vous en faire voir une petite partie, pour prouver la richesse, la cohérence et la compétitivité du domaine de l'écoconstruction.

I) Tadelakt :

Outre ses qualités esthétiques incomparables, le tadelakt est parfaitement imperméable et en même temps ouvert à la vapeur d'eau. Il est particulièrement adapté aux pièces d'eau (salle de bain, douche, hammam, vasque...) comme le démontre la tradition marocaine depuis des centaines d'années.

Le tadelakt est un enduit composé de chaux pure à laquelle on ajoute des pigments afin d'obtenir les teintes désirées. Sa mise en oeuvre est très exigeante, on le considère comme l'aboutissement du savoir-faire du stucateur.



Photo de la salle de bain de mon maître de stage. Il s'est construit lui-même cette magnifique cabine de douche en tadelakt.

II) Construction avec isolation paille, paille qui peut être porteuse :

C'est sans doute le mode constructif le plus cohérent dans nos régions tempérées si l'on regarde l'impact environnemental, la durabilité et la performance hygrothermique.

Les ballots de fibres végétales compactées sont insérés dans une structure rigoureusement conçue pour les accueillir. Ils peuvent aussi être agencés de manière à être porteurs.

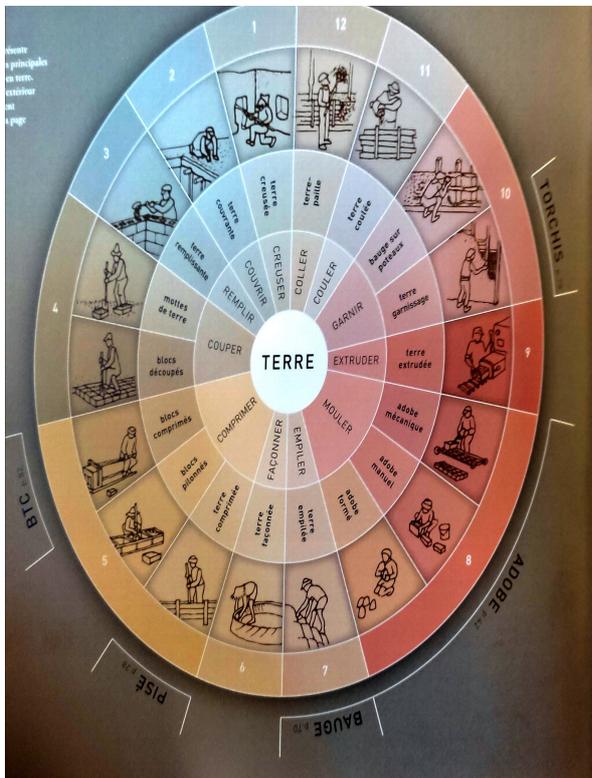
Les fibres en vrac peuvent également être banchées à condition d'être stabilisées avec un liant tel que l'argile ou la chaux.



Photo de la construction de la maison de mon maître de stage. Elle est faite en paille porteuse : tout le poids du toit (qui est très lourd en plus car toiture végétalisée) repose sur des bottes de pailles !

III) Bâti en terre crue :

La construction en terre crue est très variée et répandue. Une majorité des Humains actuels vivent dans des habitats en terre crue et il en existe autant que de cultures différentes à travers le Monde. En effet, c'est le matériau le plus universel et le plus disponible avec la pierre et le bois. Chaque région possède sa propre terre avec ses propres caractéristiques qui permettent des types de construction très précises et performantes à leur manière. Ainsi, les plus vieux gratte-ciel (29 m) ont été construits en terre crue au 16^è siècle à Shibam au



Yémen : « Le manhattan du désert »

Vue d'ensemble de toutes les techniques de bâti en terre existantes. Photo d'une double-page du livre « Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture » de Laetitia Fontaine et Romain Auger

IV) Poêle de masse :

Un poêle de masse permet un chauffage constant et régulier d'une construction. Il suffit bien souvent de charger le poêle une fois par jour et de ne plus s'en occuper pour garantir une température constante dans une maison bien isolée grâce à l'inertie thermique de la masse du poêle. Associée à la technologie des Rocket Stove (Poêle Dragon) qui opèrent une seconde combustion très performante des gazs encore hautement inflammables de la combustion « classique » (le combustible qui brûle dans le foyer), on peut atteindre des sommets en performances énergétiques d'une construction. Et tout cela en se passant d'énergies fossiles et de composé ultra-technologiques.



Poêle de masse construit par END chez un particulier.

G. Conclusion

En somme, ce stage m'a apporté énormément de précieuses connaissances et d'expérience enrichissantes. Je vois désormais que tout est possible, on peut considérablement limiter notre impact sur la planète tout en conservant le confort si cher à notre époque moderne. Je vois que « la masse » est faisable et qu'il ne faut pas obligatoirement directement faire appel à des grosses machines pour produire des grosses quantités (à l'échelle d'une maison) de matière. Je vois que l'on peut trouver infiniment de solutions dans l'alternative... Pour finir, je tiens tout particulièrement à remercier mon maître de stage : M. Camille Bonhert qui a su m'enseigner et m'inculquer son goût pour l'artisanat de qualité.