



Interreg
France (Channel
Manche) England



WPT1

An innovative mixing and building method

Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin



Established by:

François Streiff - PnrMCB



**ENVIRONMENTAL
BUILDING
RESEARCH
WITH
PLYMOUTH
UNIVERSITY**



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

1 – Malaxage

1.1 Techniques actuelles

Le mélange traditionnel de la bauge était généralement réalisé par foulage au pieds, par les hommes ou les animaux. A l'époque moderne, plusieurs méthodes ont été utilisées permettant de préparer plus aisément les volumes de mélanges nécessaires. Elles ont généralement été mise au point en fonction du volume à préparer et du modèle économique du projet de construction.



Malaxage par des animaux – Chantier Meti School Rudrapur Bangladesh – Anna Heringer architecte

L'état des lieux réalisé permet en effet de distinguer les réalisations faites dans un cadre d'économie conventionnel de celles réalisées dans un cadre participatif ou d'auto-construction, accompagnée ou non. Concernant ces derniers, les process de malaxage restent assez souvent proches des techniques traditionnelles, foulage aux pieds principalement. Une bâche au sol permet de retourner le mélange qu'un petit groupe d'individu foule ensuite au pied.



Malaxage aux pieds sur bâche – , formation bauge avril 2018, Les Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau

Dans un principe de mise en œuvre particulier dit du caillibottis (Bretagne) ou du gazon (Normandie), le mélange est plus sommaire, consistant en une alternance d'une couche de paille, d'une couche de terre puis d'une couche de paille simplement foulé ensuite aux pieds pour amalgamer paille et terre en une dalle de 5 à 10cm d'épaisseur.



Malaxage pour caillibottis – chatnier Terre crue Gihslain Maetz, St Germain sur Ile (F)

Dans le cas de chantier nécessitant peu de volume, le malaxage au pied peut être utilisé par les artisans. Mais certains ont développé l'usage de la bétonnière. Cette technique fonctionne avec des mélanges fermes ou au contraire très visqueux et réalisés avec des fibres courtes (moins de 10cm de long). Les mélanges visqueux peuvent nécessiter un temps de repos pour que le mélange ressuie et se raffermisse.



Malaxage à la bétonnière - chantier de rénovation Dartmoor (UK)

Pour des chantiers plus conséquents, les entreprises ont testé plusieurs techniques.

Tracteur/chargeuse :

Le principe consiste à utiliser le relief des pneus d'un véhicule, associé à son poids propre. Le va et vient sur le mélange permet d'écraser eau/terre et fibres. Les engins de chantier munis de godet peuvent rassembler au besoin le mélange, et le retourner régulièrement. Cette technique est généralement utilisée sur une dalle propre de type dalle d'ensilage. Cela permet d'éviter la contamination du mélange par de la terre végétale par exemple.



Malaxage avec une chargeuse – Chantier Les Frères Bon, St Hymer (F)



Malaxage au tracteur sur dalle d'ensilage – Formation four à pain PnrMCB, Marchésieux (F)

Pelle mécanique :

Le mélange est réalisé non plus avec les équipement de roulement de l'engin, mais à l'aide du godet monté sur le bras de la pelle. Un mouvement de pétrissage est réalisé par le pilote permettant d'écraser, regrouper le mélange. L'aire de malaxage consiste en un simple décapage de la terre végétale, ou en le cru=eux laissé après extraction de la terre, à la manière d'une piscine de malaxage.



Chantier Kevin Mc Cabe, Keppel Gate Devon (UK)



Chantier Michel Capon, St Georges de Bohon (F)

Les malaxeurs :

Des malaxeurs planétaires sont également utilisés. Ils peuvent être montés sur un véhicule porteur, tracteur agricole par exemple. Dans ce cas le malaxage se fait souvent sur le lieu de construction. Ils peuvent être fixes dans un lieu de production, briqueterie ou dépôt d'une entreprise de maçonnerie. Dans ce cas, le mélange est transporté sur le lieu de construction.



Malaxeur planétaire mobile – Chantier de rénovation, écomusée du Daviaud (F)



Malaxeur planétaire à torchis/bauge – Briqueterie Lagrive, Glos (F)

Un malaxeur de briqueterie à double vis sans fin horizontale a également été testé en Bretagne par l'IFSTAR et le Collectif des Terreux Armoricains pour une production de mélange ferme à faible

teneur en eau. Ce procédé a tenu ces objectifs pour ce qui concerne la teneur en eau, mais n'a fonctionné correctement avec l'adjonction de fibre (paille de blé). Les essais n'ont pas été fait pour des mélanges plus visqueux, l'objectif des expérimentations visant à optimiser le rapport hauteur d'élévation/temps de séchage.



Test de malaxeur horizontal de briqueterie, projet R&D ECOMATERRE – IFFSTAR et Collectif des Terreux Armoricaïns, Nantes (F)

Des essais sur un malaxeur à axe horizontale de type vis hélicoïdale ont été également menés par l'entreprise manchoise « Les Frères Bon » en 2009. Ils n'ont pas été concluant. Le brassage avec des fibres longues de paille se faisait mal, les fibres restant coincées autour des lames hélicoïdales continues au point de bloquer le malaxeur.

Des essais semblent également avoir été faits avec des bols mélangeurs, matériel agricole permettant de brasser des fibres pour préparer l'alimentation animale. Nous n'avons pas dans le cadre de cette étude eu de retour d'expérience, mais les contacts pris dans le cadre de cobbauges avec des fabricants nous ont alerté sur la fragilité et le risque d'une usure prématurée d'un matériel conçu pour malaxer des fibres végétales, et non pour résister à un mélange plus lourd, visqueux et abrasif comme la terre.

1.2 Essais réalisés dans le cadre de cobbauges

Suite aux premiers résultats de résistance à la compression indiquant de bonne performance des mélanges faits avec de la paille de chanvre brute ou de la paille de lin brute, le PnrMCB a entrepris dans le cadre de ses essais à échelle 1 d'effectuer des mélanges utilisant différents types de matériel. Au total cinq essais ont été réalisés.

1.2.1 Pelle mécanique et paille de chanvre longue

Dans cet essai, une pelle mécanique utilisée traditionnellement en formation par le PnrMCB pour le mélange traditionnel de terre et de paille a été mobilisée. La fibre testée était pour ce premier essai de la paille de chanvre brute de récolte, c'est-à-dire longue (entre 1 et 2 m de longueur), provisionnée sous forme de round baller.

Dans le cas habituel du malaxage avec la paille, le malaxage avec le godet permet d'écraser, couper la fibre pour l'amalgamer de manière homogène à la terre plastique. Dans le cas présent, ce malaxage fin n'a pas pu être obtenu. La chènevotte s'est rapidement séparée de la fibre et cassée en morceaux de plus petites dimensions par l'action mécanique du bras et du godet. Mais la fibre libérée ne s'est pas coupée, et s'est agglomérée en amas enchevêtrés totalement impossible à disloquer. Le malaxage est devenu extrêmement difficile au point d'abimer le moteur de la pelle. Le malaxage n'a pu être mené jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Le mélange peu homogène a été mis en œuvre partiellement sur un mur d'essai.

Observation : La fibre longue de chanvre est trop résistante pour que le mélange mécanique à la pelle permette de rediviser les fibres. Le processus de malaxage en devient beaucoup plus difficile sollicitant le matériel exagérément. Le temps de malaxage en devient trop long et dangereux pour le matériel. Le mélange avec ses imperfections est extrêmement compliqué et physiquement éprouvant. L'essai n'est donc pas concluant sur une paille résistante longue.

1.2.2 Pelle mécanique et chanvre coupé

Suite à ce premier essai, un deuxième test a été réalisé avec une pelle mécanique similaire, mais en travaillant avec une paille de chanvre brute, coupée. Après un échange avec le fournisseur de chanvre (Agrochanvre), il nous a fourni une paille provenant d'un round baller découpé en 8 parts à l'aide d'un massicot, seul matériel de coupe dont sa ligne de production disposait. Les brins obtenus oscillaient entre une longueur de 10cm et une longueur maximale d'environ 60-70cm.

Observation : le malaxage a pu se faire de manière un peu plus homogène. Mais il a été long et pénible pour la machine qui là encore a cédé sous les sollicitations de puissance. Mais le phénomène d'agglomération de la fibre séparée de la chènevotte s'est également reproduit, à une échelle moindre, mais suffisamment pour rendre l'utilisation et la mise en œuvre pénible. Le mélange a été utilisé pour deux des essais de mur à échelle 1.

L'essai reste peu concluant au regard du temps passé (près de 2h pour 2.5m » de mélange), de l'énergie consommée et de la pénibilité à travailler le mélange par la suite. Le test nous laisse en revanche penser que l'utilisation d'une paille de chanvre coupée en brin court de moins de 10cm est probablement une bonne alternative. Ceux sont en effet les brins encore longs de plus de 30cm qui ont provoqué les amalgames en pelotes.



Test de malaxage pelle avec paille de chanvre brute coupée – des pelotes de fibres mal mélangées sont perceptibles

Suite à cet essai, contact a été pris avec le fournisseur de chanvre pour étudier la faisabilité d'une coupe différente de la paille brute pour obtenir des brins de 10-15cm de long. En l'état actuel, l'organisation de la chaîne de production de Barenton (F – 50) ne permet pas de découper aussi régulièrement la paille brute. La seule proposition faite est de fournir séparément la fibre en vrac dont les brins mesurent entre 7 et 20 cm de long et la chènevotte, produits respectivement pour l'isolation et les enduits isolant. S'il n'y a aucun doute sur la capacité de la chènevotte à être mélangée correctement (morceaux de 1 à 2cm de long et non filandreux), le doute est plus grand sur la laine de chanvre très filandreuse, avec des fibres rugueuses s'accrochant les unes aux autres, donc plus difficile à « carder » séparer les unes des autres pour un mélange homogène. Le risque de constitution d'amas, de pelotes reste majeur.

1.2.3 Godet malaxeur et paille brute de lin

La recherche bibliographique sur les procédés de malaxage utilisé dans le domaine agricole et du BTP a permis d'identifier les godets malaxeur et godet mélangeurs comme piste à explorer. L'intérêt réside sur ce type de matériel en la possibilité de gérer avec un seul et même engin porteur le chargement du malaxeur, le malaxage et le déversement sur la zone de construction de l'ouvrage, y compris en hauteur. Nous avons d'emblée éliminé les godets malaxeur avec pales hélicoïdales du fait de l'expérience connue sur ce type de dispositif. Cela élimine une bonne partie du matériel disponible auprès des fabricants pour Travaux Public. Trois fabricants ont été contacté, deux sur du matériel agricole, et un sur du matériel TP.



Godet mélangeur Melodys 50 – EMILY



Godet desileur mélangeur à vis verticale BMV – ROBERT



Godet malaxeur BB610 – WARZEE

Seul le fournisseur de godet TP (WARZEE) a répondu et nous a mis en relation avec un agriculteur de Normandie s'étant équipé de ce matériel pour préparer ses mélanges de bauge pour construire son habitation.

Nous avons pu réaliser en sa compagnie des tests à partir de la terre dont il disposait sur place (Courtonne-la-Meurdrac (14)), une terre fine limono-argileuse, et de fibres que nous avons apportées sur place, paille de lin brute, fibre de chanvre et chènevotte.

Le premier test a été réalisé avec la paille de lin brut en brins de 50 à 80cm de long. Après chargement du godet en terre et en eau, le malaxage a commencé pour obtenir un mélange visqueux. Une fois la bonne viscosité obtenue (jugement à l'œil en l'absence de tests sur cette terre) la paille de lin a été ajoutée. Le malaxeur branché sur le bras du tracteur permettait d'inverser le sens de rotation des pales.



Malaxage de terre et paille de lin avec godet malaxeur Warzee

Les premiers constats montrent une bonne capacité à malaxer ces pailles assez longues, plus faciles à rompre que le chanvre. L'inversion de la rotation permet de régulièrement libérer une partie des pailles restant accrochées aux pales et en particulier aux rabots fixés à leurs extrémités. Mais il en reste néanmoins une assez forte quantité. On peut évoquer sur ce point la faible puissance du tracteur alimentant le malaxeur. Ce dernier ne tourne probablement pas au maximum de sa capacité, ce qui limite probablement l'effet d'arrachement des fibres provoqué par la vitesse de rotation et le frottement, et impacte également le temps de préparation (pourtant déjà court par rapport à l'essai pelle mécanique) soit ici 15-20mn non optimisées pour 300l de mélange avec deux opérateurs (1 au commande du tracteur pour gérer les rotations, et un au chargement en fibre).

La vidange du godet se fait aisément par basculement et rotation des pales pour décrocher le mélange. Une partie modeste reste collée aux pales.



Vidange du malaxeur

Un second mélange a été réalisé en tentant l'incorporation de chènevotte et de fibre de chanvre ajoutés l'un après l'autre. Le mélange avec la chènevotte se fait sans aucun problème, de manière très homogène. Mais l'adjonction des fibres pose plus de soucis, la fibre restant en pelote difficile à séparer. Le mouvement de rotation et le frottement oriente les pelotes en cordons longs s'enroulant autour de l'axe ou des pales et difficiles à rompre. Le mélange est donc peu homogène, le déchargement compliqué avec plus de perte une partie du mélange restant accrocher aux éléments du godet.



Malaxage de terre, chènevotte et étoupe de chanvre avec godet malaxeur Warzee

1.2.4 Malaxeur planétaire fixe et paille de lin brute

Le troisième essai a été réalisé au sein de l'entreprise Meslin & fils au Neubourg (27). L'entreprise produit déjà de la bauge prête à l'emploi à partir d'une terre limono-argileuse locale et de paille de blé. Le malaxeur est un malaxeur planétaire de centrale à béton d'une capacité théorique de 1.5m », soit une production potentielle maximale de de 600l par tournée. Le malaxeur est fixe, alimenté par un moteur électrique triphasé. Le chargement se fait par un manuscopique en hauteur, et le déchargement par une trappe directement en big bag ou dans le godet du manuscopique.



Malaxeur planétaire fixe – Entreprise Meslin, Le Neubourg

Le malaxeur a subi quelques modifications le rendant plus fonctionnel pour les mélanges de terre. Un cône soudé au-dessus de l'axe centrale permet de renvoyer la terre dans l'anneau de malaxage. Les pales ont été modifiées pour éliminer une partie des rabots plat. Le brassage/malaxage en est probablement un peu moins efficace, mais les fibres restent au dire de l'artisan beaucoup moins coincées sur les pales.

Le test est fait ici avec de la paille de lin brute, donc avec une longueur de brins de l'ordre de 50-80 cm de long. Le mélange terre/eau est réalisé en premier de manière à obtenir ici une mélange plastique, plus ferme donc que le mélange réalisé avec le godet malaxeur.



Malaxage de terre et paille de lin avec malaxeur planétaire - entreprise Meslin, Le Neubourg

La paille est incorporée en cours de rotation. Cette dernière est assez rapide. Dans les premiers temps la paille reste ponctuellement accrochée aux pales, mais la vitesse de rotation et le frottement du mélange ferme fini par « nettoyer » les pales. Le mélange est beaucoup plus ferme que ce que l'artisan pratique habituellement. Il « s'assèche » en cours de malaxage, au fur et à mesure que les

brins de paille se cassent, se divisent entre fibres et anas, au point de devenir trop ferme et bloquer le malaxeur en fin de préparation.



Malaxage de terre et paille de lin avec malaxeur planétaire - entreprise Meslin, Le Neubourg

La vidange doit être partiellement faite à la main avant de pouvoir remettre le malaxeur en route pour tester sa capacité à se vider par la trappe. Cette vidange se fait parfaitement laissant l'intérieur du malaxeur assez « propre ».



Détail du mélange fibré avec de la paille de lin

Le mélange obtenu est parfaitement homogène. La fibre s'est coupée, s'est séparé formant un mélange extrêmement fibré, presque micro-fibré à l'image des bétons modernes dits à ultra haute performance. La plasticité obtenue, extrême pour le matériel, correspond à la plasticité testée sur un chantier dans le Calvados (réalisation les Frères Bon, conception Canet architecte, St Hymer) où les

murs de bauge coffrée ont été réalisés sous forme de mur trumeaux montés en 1 journée sur 2m de hauteur alors qu'une levée de bauge traditionnelle se monte sur 80cm de hauteur en général.

Ce test s'avère particulièrement concluant sur la qualité du mélange obtenu, son très bon rapport volume/temps de malaxage (15mn entre le chargement et la fin du mélange pour 600l de préparation avec un seul opérateur)

1.2.5 Malaxeur conique à malaxage multidirectionnel et paille de lin

Dans le cadre de la réalisation du mur test à l'ESITC Caen, nous avons pu tester une quatrième variété de malaxeur. Il s'agit ici d'un malaxeur dont la cuve est conique où le malaxage est réalisé par des bras périphériques et un axe central tournant en sens opposé et à des vitesses différentes. Il s'agit d'un matériel conçu pour le béton, ici dans une version de petit volume pour le laboratoire de l'ESITC.



Malaxeur conique KNIELE – ESITC Caen

Dans le cadre de ce test, la terre utilisée correspond ici à une des terres étudiées par l'ESITC, et la paille de lin a été préalablement coupée en brin de 10 à 20cm de long.

Le principe du malaxage permet d'obtenir un mélange homogène en très peu de temps. Ici chaque mélange est fait en près de 5mn, d'abord terre et eau, puis rapidement la moitié de la fibre et le reste peu de temps après, mais sur de petites quantités de l'ordre de 70l de mélange.



Malaxage terre et eau avec malaxeur conique multidirectionnel – ESITC Caen

Le mélange sorti est très homogène, avec une légère séparation anas/fibres peut être moins conséquente que dans le mélange fait dans l'essai précédent. Cela peut être du au fait que la paille était coupée.

Le temps de malaxage ramené au rapport volume/personne mobilisé est toutefois moyen. En 1h, environ 600l de mélange a été préparé à 2 opérateurs. C'est en grande partie du à l'échelle du malaxeur, et à son principe d'alimentation. Son volume a obligé à de multiples opérations chargement/déchargement. Par ailleurs, le matériel est conçu pour une alimentation en matériaux sec et fluide, à granulométrie contrôlée. La terre utilisée ici bien que séchée et grossièrement broyée n'a pas pu passer de la trémie de chargement au malaxeur. Il a donc fallu alimenter manuellement par une deuxième trémie de nettoyage interrompant à chaque manipulation le malaxage. Par ailleurs le principe de malaxage multidirectionnel nécessite plusieurs blocs moteurs situés sur un couvercle au-dessus du malaxeur, ce qui empêche une alimentation de la cuve par un déversement brut de la terre. Une trémie d'alimentation est nécessaire.



Adjonction de la paille de lin avec malaxeur conique multidirectionnel – ESITC Caen

Il en résulte donc une très bonne qualité et efficacité du malaxage lui-même, mais une conception de matériel qui n'est pas adaptée en l'état à l'utilisation de la terre et des fibres. Des adaptations seraient à étudier avec le fabricant



Détail du mélange obtenu

Un malaxeur à axe horizontal du type de celui utilisé par l'IFFSTAR était disponible et prévu dans les essais. Mais l'expérience bretonne ayant déjà démontré la difficulté à malaxer la terre et les fibres, l'essai avec les fibres plus résistantes comme le lin et le chanvre n'a pas été jugé pertinent.

1.3 Conclusions

Il ressort de ces différents essais que les fibres testées, le chanvre en particulier, sont difficiles à utiliser avec les malaxages traditionnels (pied, pelles mécanique) sans un travail préalable de coupe en brins de petites dimensions (10 à 20cm maximum). Les contacts pris avec les transformateurs de la filière linière ou chanvrière indiquent que ce travail préparatoire est compliqué dans l'organisation actuelle des filières. Il faudrait couper ces pailles lors de la récolte en adaptant du matériel agricole de type ensileuse à maïs. C'est une chose semble-t-il envisageable pour le chanvre. Mais la nature de ces plantes, notamment la teneur en silice, fait craindre aux acteurs du monde agricole beaucoup de difficulté dans le fonctionnement et une usure prématurée du matériel. Par ailleurs, concernant le lin, le projet permettait d'utiliser le lin impropre à la filière textile, donc de valoriser un déchet. Or dans le processus de transformation du lin, la détermination de sa qualité d'usage n'intervient qu'une fois le lin coupé et rouis. Il y a donc ici un parti pris à définir pour CobBauge.

En conséquence, deux malaxeurs semblent aujourd'hui les plus adaptés à un malaxage polyvalent : le godet malaxeur et le malaxeur planétaire. Le godet malaxeur permet un usage sur chantier, donc d'utiliser aisément les terres locales. Il conviendra d'essayer ce type de matériel avec un rapport de puissance plus adapté. Il conviendra également d'étudier plus finement dans une condition réelle de chantier la capacité des engins porteurs à gérer le chargement du godet, le malaxage et à monter le mélange directement sur le mur. C'est en effet dans cette capacité à être monté sur un seul engin permettant de rejoindre les différents postes de travail que réside l'intérêt principal de cet outil.

Le malaxeur planétaire semble donné les meilleurs résultats en termes de rapport volume/ temps/ qualité. Mais le principe d'alimentation électrique rend moins évident la mobilité sur chantier. Le malaxeur fixe semble, dans cette configuration, plus pertinent, mais il induit des transports de matériaux plus conséquent en particulier dans le cas du recours à une terre extraite sur le site du chantier.

Il conviendra donc de compléter ces premiers essais par un travail sur les consommations d'énergie de chacune des configurations possible de manière à déterminer le ou les cas les plus efficaces en matière de réduction des émissions de CO2 suivant les configurations de chantier prenant en compte

la provenance des terres et la distance entre le chantier de construction et la zone de malaxage, et la consommation du malaxeur.

2 - Mise en œuvre

2.1 Techniques usuelles

Mise en œuvre traditionnelle à la fourche

Ce principe de mise en œuvre requiert a minima deux personnes. La mise en œuvre se fait autant que de possible debout sur la tête du mur de manière à maîtriser la place et la disposition des mottes de terre. Une personne est donc mobilisée sur le mur, la seconde ayant la charge de lui fournir des fourchetées de terre homogènes, compactes et d'un volume le plus constant possible.

Les mottes de terre sont mises en place en les disposant d'abord sur les extrémités puis au centre. Le chevauchement des fourchetées les unes avec les autres, d'un côté à l'autre et du bas vers le haut doit être assuré en permanence pour assurer l'homogénéité du mur et éviter les fissures en coup de sabre qui créeraient des fissures et des faiblesses dans la maçonnerie. L'aplomb des deux côtés du mur doit être vérifié en permanence de manière à ne pas avoir de creux irrécupérable après, ou de débords trop importants qui outre la mobilisation excessive de matière première, risque principalement de créer un effondrement du mur.



Mise en œuvre traditionnelle à la fourche

Une fois la levée réalisée, elle doit être rebattue à coup de battons ou de manche d'outil pour rectifier l'aplomb et résorber les légers creux. Cela améliore également la densité de la terre en surface facilitant la découpe de la terre après un petit temps de séchage.

La bauge est laissée entre une demi-journée et deux jours à se raffermir sur le mur avant d'être retaillée à l'aide d'une bêche plate appelée paroir, ou d'une houe, ou encore d'un coupe-foin après avoir pris les aplombs définitifs du mur. Ce travail est particulièrement éprouvant sur le plan physique et représente quasiment un tiers du temps de mise en œuvre global du mur.



Découpe des parements du mur

Mise en œuvre traditionnelle anglaise

L'organisation du chantier est assez similaire. La bauge est prélevée au sol et est disposée ensuite sur le mur en un lit de faible épaisseur. La différence est à ce stade. Le maçon posé sur le dessus du mur déplace au besoin ce qui vient d'être posé, puis écrase au pied les mottes posées pour les lier les unes aux autres et densifier le mur. De la paille peut être ajoutée au-dessus pour limiter le poinçonnement et améliorer la tenue de la bauge encore meuble. Le maçon travaille en permanence sur ce qui vient d'être posé à la différence de la méthode normande qui revient peu sur ce qui vient d'être façonné et posé.

A l'aide de sa fourche bêche, il va également veiller à retirer le surplus de bauge des parements pour éviter l'effondrement. La matière retirée est aussitôt remise en place sur le dessus du mur.



Travail du parement à la fourche bêche

Afin de limiter le débord et d'obtenir un bel état de surface au retailage, et donc d'éviter des creux ou manques, les parements sont régulièrement battus à l'aide du talon ou du dessus de pied. Il peut également être battus au bâton, avec le plat de la fourche-bêche ou de gros maillets ou battes de bois.

Une fois la hauteur de levée obtenue, le mur est resserré à la fourche ou à la batte avant d'être retillé après un petit temps de séchage.

Le travail de retaille du mur est le même qu'en France. Les outils peuvent toutefois varier un peu ; Il ne semble pas qu'il y ait un outil spécifique de type paroir. C'est la houe ou la bêche qui sont les plus régulièrement utilisées. La bête est plus fréquemment utilisée que le bâton.

Maîtrise du rapport hauteur/largeur/plasticité du mélange.:

La plasticité du mélange conditionne beaucoup la hauteur d'élévation possible lors de la mise en œuvre. La plasticité du mélange de bauge est fonction de la granularité de la terre et principalement sa teneur en argiles, de la quantité d'eau et de la teneur en fibre apportées lors du malaxage. La levée pourra être importante pour une bauge faite avec une terre argileuse, très chargée en paille et assez ferme (levée de 1m voire plus). Elle sera beaucoup plus limitée avec une terre limoneuse, peu chargée en fibre et plus molle (30 à 50cm de hauteur). En l'absence de tests normés pour évaluer ce rapport plasticité/hauteur d'élévation, il appartient au maçon d'apprécier la limite de cette hauteur avant affaissement ou effondrement du mur. Cette évaluation se fait au ressenti de l'affaissement, de l'élargissement lors de la pose des fourchetées, ou dans le cas de la bauge « anglaise » sous le poids du maçon marchant sur le mélange.

Dans le cadre d'une étude menée en Allemagne (C. Ziegert 2003), le rapport hauteur/largeur (élancement) des levées mesuré sur des bâtiments existants (région de Leipzig) oscille entre $E=1,3/1$ et $E=1,8/1$. En construction contemporaine, pour une bonne maîtrise de la technique il faudrait éviter un rapport supérieur à $E=1,5/1$ (source : *construire en terre crue, Röhlen/Ziegert – Paris 2013 – p194*).

Variantes traditionnelles

les gazons, pâtons ou caillibotis

Le mélange de terre a été préparé plus ferme que pour la bauge mise en œuvre à la fourche et a été compacté sous forme d'un ruban d'une petite dizaine de centimètre d'épaisseur.

Des pâtons de terre sont découpés à la bêche ou avec un taille-marc selon des dimensions d'environ 20x30cm, 10x20cm dans la version contemporaine de Ghislain Maetz, suivant les secteurs géographique et l'épaisseur du mur à édifier.

Les pâtons de terre sont ensuite plaqués sur le mur soit en lits horizontaux, soit en lits obliques (opus spicatum) en mettant les pâtons de terre en quinconce pour éviter les coups de sabre.



Essais de gazons d'argile, formation en archéologie expérimentale – Lattes, 2009

Les pâtons de terre étant plus ferme, les parements sont édifiés à leur aplomb définitif. Le retaillage du mur n'est normalement pas nécessaire.

Une fois la levée mise en œuvre, les parements sont resserrés à coup de bâton.

La bauge sur lits de végétaux

Cette technique plus rare consiste à mettre en œuvre un mélange plastique de terre et d'eau, souvent dénué de tout végétaux, sur une épaisseur assez faible de 6 à 8cm, en alternance avec un lit de végétaux, paille, brande bruyère ou autre, disposés longitudinalement ou à la perpendiculaire du mur. Cette technique a été peu étudiée et par conséquent les principes de mise en œuvre sont méconnus, notamment l'éventuelle taille des parements ou utilisation de coffrages.

Mise en œuvre mécanisée à l'aide d'une pelle mécanique

Le principe s'inspire du mode de mise en œuvre anglais traditionnel.

Le mélange est déposé à l'aide du godet d'une pelle mécanique. Le mélange doit être autant que possible compacte et homogène dans le godet dès son chargement. Cela nécessite de travailler le mélange avec le godet par pression sur le tas pour resserrer la bauge, éliminer le maximum de vide.

Le mélange est déposé en retournant le godet sur le dessus du mur en veillant à ne pas le faire tomber ou à ne pas déséquilibrer les couches inférieures. Le plat du godet peut ensuite être utilisé pour tasser légèrement le mélange sur le dessus du mur ou le repositionner bien au centre du mur.

Une fois le godet retiré, le mélange est piétiné par le dessus pour amener au besoin la bauge sur les parements extérieurs. A l'aide de la fourche bêche, les excédents de bauge sont retirés et placés dans les zones de creux ou de manque avant d'être à nouveau piétinés.

Le travail de taille des parements se fait de façon traditionnelle comme évoqué précédemment.



Mise en œuvre à la pelle mécanique – Dingle dale, Kevin Mc Cabe

Mise en oeuvre de bauge coffrée

Afin d'accélérer les temps de mise en œuvre et de limiter le nombre d'étape dans la construction des murs en bauge, plusieurs essais de coffrage ont été réalisés, de manière ancienne (cf, 1ers échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue - 2003 - A Klein p 417-437), et plus récemment en Normandie en Bretagne, en Angleterre et en Suisse. Le coffrage permet sans trop de contrainte et de risque de mettre en œuvre par déversement et piétinement la bauge pour obtenir une bonne compacité. Il permet de contrôler le débord et évite d'avoir à retailler les parements.

Mais du fait de la plasticité du mélange mis en œuvre, le décoffrage s'avère être le point délicat. La force de succion exercée par la bauge sur le coffrage peut amener à des déformations du mur lors du retrait du coffrage. Différents maçons ont imaginé des stratégies différentes pour contourner ces contraintes :

- Des coffrages conventionnels, mais avec une stabilisation de la bauge. Pour accélérer le durcissement de la bauge et permettre un décoffrage rapide, au mélange terre, eau et fibre de base est ajouté un stabilisant (chaux ou ciment) lors du malaxage. Une fois mis en œuvre dans le coffrage, il faut attendre le lendemain pour décoffrer puis quelques jours avant de pouvoir remonter une banchée suivante. Ce principe se rapproche des essais de terre coulée développés actuellement par des entreprises et laboratoires de différents pays. Il reste contestable au regard de la quantité de ciment ajouté pénalisant le bilan carbone du mur et de la modification des propriétés de la terre et notamment des argiles en bloquant pour tout ou partie leur capacité à réguler l'humidité.



Bauge stabilisée coffrée – Maison individuelle, Les Frères Bon

- Des coffrages de faible hauteur. La mise en œuvre par lits de faible épaisseur permet de limiter la déformation de la levée lors du décoffrage (un peu sur le principe des moules à adobes), et d'avoir un séchage au cœur de la levée plus rapide et donc de permettre de mettre en œuvre la levée suivante plus rapidement.



Coffrage filant de faible hauteur – Cellier de cidrerie, Les frères Bon

- Des coffrages grillagés pour éviter le phénomène de succion en offrant une faible surface de contact entre la banche et le grillage métallique. Les banches peuvent être enlevées si tôt remplis, ou au contraire si la bauge est trop visqueuse, laissées en place de manière à contenir le mélange tout en lui permettant de sécher et durcir. L'écartement de la maille conditionne la finesse du parement. Une fois les banches enlevées, le parement peut être resserré à coup de bâton ou taloché.



Banches grillagés – Les frères Bon



Banches grillagés – Olivier Dargagnon

- Des coffrages en bois plein, mais en travaillant sur la plasticité du mélange. En réduisant la teneur en eau de la bauge, elle adhère beaucoup moins sur les banches qui peuvent ainsi être enlevées sans difficulté. Deux variantes de mise en œuvre ont été recensées. L'une consiste en l'adaptation de la technique du caillibottis breton. Elle a été mise au point pour faciliter la gestion de chantier réalisés en chantier participatif, donc avec une main d'œuvre non-qualifiée. Le coffrage sert de guide pour la pose en toute sécurité des blocs de bauge découpée. L'autre hybride le pisé. Le coffrage filant en hauteur est rempli d'une bauge ferme qui nécessite alors un compactage avec un fouloir pneumatique pour chasser les vides, lier les mottes les unes aux autres et homogénéiser le mur et son parement. Le coffrage coulisse aussitôt en hauteur pour réaliser la levée suivante. Des essais ont également été fait en Angleterre sur des bauges aussi fermes que les caillibottis et piétinées dans un coffrage en bois plein.



Banches bois massif – Ghislain Maetz



Banches bois massif – Les Frères Bon

2.2 Essais

L'objectif de cobbaage est d'optimiser la technique traditionnelle. Plusieurs facteurs peuvent dans le process de construction influencer sur le temps de mise en œuvre, le nombre de personnes mobilisées et la durée globale de l'élévation du mur, avec également et par conséquence une influence sur le coût du mur en bauge.

Le temps de mise en œuvre

Dans la mise en œuvre traditionnelle, l'empilement des mottes à la fourche nécessite un temps de mise en œuvre assez long. On estime qu'une équipe de trois personnes montera parement compris 7m linéaire jour pour un levée de 50 cm de large sur 50 cm de hauteur (3.5 m²/J). Dans le cas de la mise en œuvre à la pelle mécanique, le temps de mis en œuvre est divisé quasiment par deux (6.6m²/J). Une équipe de trois compagnons mettra en œuvre environ 20m linéaire fini en 1.5 jour. Dans le cas de la bauge ferme compactée coffrée, la même équipe produira un mur d'environ 3m linéaire sur 2m de hauteur (6m²/J).

La pénibilité du travail, étroitement liée au temps de mise en œuvre

La mise en œuvre à la fourche sollicite naturellement assez intensément le corps, tout comme le travail de parement, en particulier lors de l'utilisation de la bêche ou du paroir qui sollicite le dos en obligeant à un déport du buste dans le vide au-delà de l'aplomb du mur. Le travail de taille au coupe foin est tout aussi pénible. En ce sens les solutions coffrées offrent une alternative intéressante. Elles permettent de créer le parement définitif lors de la mise en œuvre, et dans une moindre mesure d'économiser du mélange. C'est donc une part de travail pénible évitée, quand bien même il reste la mise en place des banches. Il faut noter toutefois que dans la version compactée, l'utilisation du fouloir pneumatique utilisé pour le pisé est assez éprouvante.

De ces constats, nous avons orienté l'ensemble de nos essais sur des solutions coffrées offrant plus de potentiel d'optimisation avec un bon rapport gain de temps/pénibilité.

2.2.1 Premier mur test

Mise en œuvre

Le premier essai a été réalisé lors d'une formation bauge organisée par Amaco aux grands ateliers de l'île d'Abeau. Les premiers résultats de mesure de performances thermique et mécanique laissant entrevoir l'impossibilité de n'avoir qu'un unique mélange répondant tout à la fois à la résistance mécanique et à la résistance thermique, il s'agissait de tester la mise en œuvre de deux mélanges différents dans un même coffrage. La partie isolante étant prévue pour être en extérieur afin d'optimiser la masse thermique de la partie porteuse, elle nécessitait la réalisation à terme d'un enduit. Nous avons donc opté pour un essai avec un banche grillagé. Le maillage étant lâche (5x5cm), pour éviter que le mélange allégé terre/chènevotte ne passe au travers du grillage nous avons appliqué au préalable une trame de verre d'un maillage plus resserré (8x8 mm).

Côté bauge porteuse, nous avons souhaité tenter un coffrage bois plein de manière à obtenir un parement le plus plan possible pour constituer le parement définitif.

Le mélange porteur a d'abord été mis en œuvre sur une quinzaine de cm d'épaisseur, contre le banche bois et sur une profondeur de 30 cm en laissant une réserve d'une vingtaine de cm pour la partie isolante. Les mottes de terre ont été plaquées dans le fond du banche et piétinées pour rendre la couche homogène et compacte. Cette jonction a été travaillée en la chanfreinant de manière à ce que les deux parements soient harpés sur la hauteur du banche. Le mélange allégé, ici réalisé avec une barbotine de terre et de la chènevotte a ensuite été mis en place dans la réserve laissée entre la bauge porteuse et le banche grillagé, légèrement compacté à l'aide d'un fouloir manuel. Avant de réaliser la couche suivante sur le même principe, une corde de chanvre a été placée en zigzag à la jonction entre les deux parements pour assurer une liaison mécanique.



Une fois le coffrage entièrement rempli, le bloc a aussitôt été démoulé. Aucun problème pour retirer le banche grillagé et la trame à maille fine. Le relief est marqué et permettra vraisemblablement l'accroche d'un enduit. Le banche bois a pu également être retiré sans trop de difficulté en le faisant glissé parallèlement au parement pour éviter l'arrachement. La déformation semble minime, mais il faut noter que le bloc était de petite dimension (1m de long, 80cm de hauteur, 50cm de profondeur), ce qui a probablement permis un décoffrage aussi aisé. Avec une surface de contact plus conséquente, la force de succion de la bauge aurait probablement rendu la tâche plus difficile et les déformations du mur plus probable.



Constat

La mise en place des mottes de bauge et leur foulage au pied est assez aisé. Le remplissage de la partie allégée également. La phase mise en place de la corde de liaison des parements fait perdre du temps. Il conviendra d'étudier son utilisation.

Une fois le bloc décoffré, on peut constater la relative irrégularité des lits de bauge porteuse et de bauge allégée. La réserve façonnée fait osciller l'épaisseur de la partie isolante entre 15 et 25cm rendant donc la performance thermique du mur aléatoire.

Après séchage, le bloc a présenté une déformation assez importante, la tête du mur semblant s'être déportée latéralement. Le bloc, réalisé sur une palette, ayant été déplacé frais, il était difficile d'établir si la déformation était due à un tassement différentiel entre la partie porteuse et la partie isolante, ou si elle était due au déplacement. En revanche aucune séparation entre les deux parements n'était perceptible.



2.2.2 Deuxième mur test

Mise en œuvre

Le second essai a été réalisé dans un contexte plus proche de celui d'un chantier. Les terres utilisées correspondaient à celles étudiées par l'ESITC et UoP. FR3 a été utilisée pour la terre allégée en raison de sa très forte teneur en argile, et FR2 pour la bauge porteuse. La fibre utilisée était la paille de chanvre brute coupée en brin de 10 à 60cm de longueur pour la partie bauge porteuse. La Chênevotte a été utilisée pour la partie isolante.

FR3 a été mise à tremper pendant 3 jours dans des bacs remplis d'eau, malaxée une fois par jour avec un malaxeur électroportatif pour délier correctement les argiles. La veille de la mise en œuvre, la barbotine de terre a été tamisée grossièrement (maille de 8mm) pour éliminer les congglomérats non délayés. La teneur en eau a ensuite été contrôlée et ajustée pour obtenir un disque de 12cm avec 100ml de barbotine versée sur une surface plane. Afin de voir la limite entre les tests de laboratoire et la pratique de chantier, 100ml de barbotine ont été mis en étuve pour déterminer le poids sec de terre et évaluer la quantité en volume de chènevotte à mettre.



La barbotine et la chènevotte ont ensuite été malaxées ensemble dans un petit malaxeur planétaire de chantier à raison de 200l de chènevotte pour 40l de barbotine. Le mélange a été laissé à ressuyer une nuit.



La bauge porteuse a été préparée à la pelle mécanique (cf 1.2.3) le lendemain en même temps que le coffrage était mis en place. Concernant ce dernier, les banches métalliques grillagées ont été testées sur les deux faces. La face recevant le mélange isolant a comme pour le premier essai été habillée d'une trame de fibre de verre. La face recevant la bauge a été recouverte d'un grillage en métal déployé afin de tester un maillage plus fin que le grillage 5x5cm utilisé. La maille était ici de 2x1.5cm. La base du mur était constituée d'une planche de contreplaqué épais de 2m de long par 70 d'épaisseur.



Les deux mélanges ont été ici mis en œuvre sur le même principe que le premier essai, avec une partie porteuse en moyenne de 45cm d'épaisseur et une partie isolante de 25cm. Le mur a été monté sur 1.1m de hauteur. Il a été décoffré le lendemain sans difficulté particulière.



Constat

Comme pour le premier essai, la mise en œuvre en façonnant la réserve pour la partie isolante ne permet pas d'avoir une bonne régularité des deux parties. La préparation de la barbotine avec la terre argileuse s'avère fastidieuse du fait de la forte teneur en argile de la terre.

En revanche la maille du grillage en métal déployé donne de bons résultats. La bauge passe peu au travers et permet d'obtenir une surface plane mais suffisamment rugueuse pour recevoir un enduit de finition.

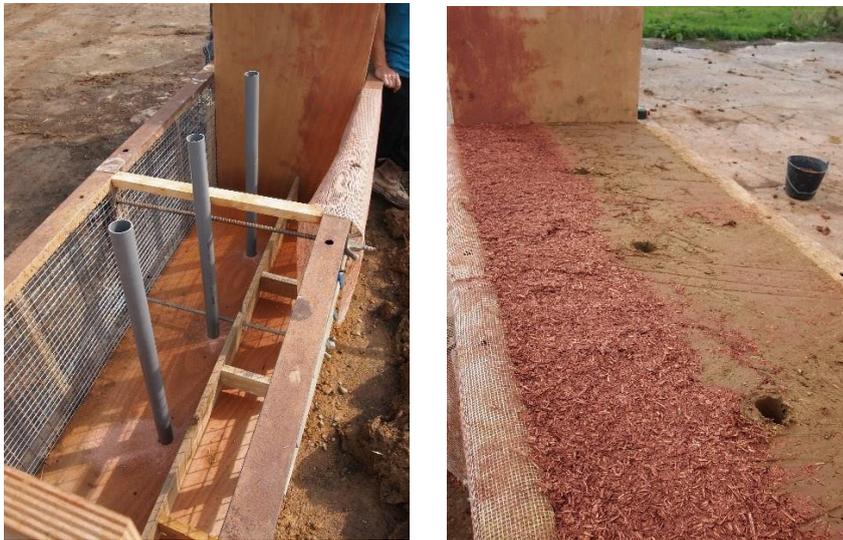


2.2.3 Troisième mur test

Mise en œuvre

Les matériaux sont exactement les mêmes que sur le test 2. L'essai ici a été concentré sur l'amélioration du procédé de mise en œuvre pour permettre d'obtenir une plus grande régularité des épaisseurs porteur/isolant. La grille de métal déployé a été ici remplacée par une grille carrée de maille 2x2cm. Enfin pour tester une émise lors de la formation de l'Isle d'Abeau et de la réalisation du mur test 1, nous avons cherché à voir s'il était possible d'optimiser le séchage du mur à cœur en créant des cavités verticales permettant de faire circuler l'air depuis le soubassement.

Des coffrages en bois ont été réalisés pour disposer dans le fond du coffrage et créer la réserve pour la partie isolante. Ces formes en bois permettent également de régler l'épaisseur de la couche de bauge mise en œuvre. Des tubes PVC de 5cm de diamètre espacés de 50cm sont fixés verticalement depuis des trous faits dans le contreplaqué de soubassement.



La mise en œuvre se fait toujours sur le même principe, la réserve en bois étant enlevé une fois la bauge mise en œuvre. La tranche de la bauge est juste rebattue sommairement pour donner une forme trapézoïdale à la couche. Le mélange isolant est ensuite mis en œuvre. Ce mur a été monté sur 75cm uniquement. Les tubes PVC ont été aussitôt enlevés, assez facilement.



Constat

Les coffrages secondaires permettent d'obtenir des épaisseurs de parement régulières sans impacter le temps de mise en œuvre. Les deux murs test 2 et 3 ont été équipés chacun de trois sondes permettant de mesurer le taux d'humidité à différentes profondeurs, de façon à évaluer l'impact des creux ménagés dans le mur 3. Après 2 mois de mesure, il n'y a pas de différence constatée. La ventilation statique, ou non forcée, n'a apparemment pas d'impact sur le séchage au cœur du mur. En revanche les creux semblent avoir provoqué la formation de fissures.

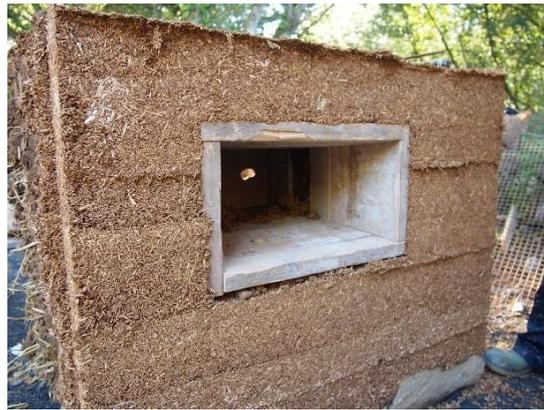
2.2.4 quatrième mur test

Mise en œuvre

Ce mur a été réalisé dans le cadre du Clayfest. Il n'avait pas pour but de tester le principe de mise en œuvre mais de commencer à aborder la mise en œuvre de détail. Le coffrage utilisé était un coffrage bois pour le pisé, muni sur une face d'un grillage. Le mur était monté en L de 1m x1m pour pouvoir gérer un angle, et sur une de ses extrémités d'une réserve pour réaliser une feuillure en vue d'implanter une menuiserie.



Le coffrage a été rempli selon les principes précédents du mur 3. Afin de permettre l'accroche de la menuiserie, une pièce de bois en queue d'aronde a été noyée dans la bauge. Après une trentaine de cm d'épaisseur, un coffrage bois a été mis en place sur une des branches du L pour créer une ouverture. Arrivé au niveau supérieur du coffrage, une couche de bauge a été mise en œuvre sur environ 5cm d'épaisseur avant d'y noyer des branches épaisses pour créer l'armature du linteau. La même chose a été faite au niveau du remplissage isolant.



L'ensemble a été décoffré le jour même assez aisément. Un léger affaissement s'est produit au niveau du linteau de la bauge porteuse.

Constat

Les principes de traitement des détails seront à affiner en fonction de la jonction avec la partie isolante de manière à éviter les ponts thermiques. Mais les principes de mise en œuvre sont somme toute similaires aux principes de la bauge traditionnelle. Au niveau du traitement du linteau, des essais complémentaires seront à effectuer. L'ouverture peu large ici aurait dû permettre une réalisation sans problème d'un linteau en bauge armé. Ici vraisemblablement l'usage de simples branches vertes n'était pas approprié. Une partie de la partie isolante s'est effondrée au-dessus du linteau. Mais le mur ayant été réalisé dans un site public et étant resté sans surveillance quelques temps, on ne peut définir précisément la cause de cette rupture.



2.2.5 cinquième mur test

Mise en œuvre

Ce mur a été réalisé dans le cadre de la fête de la science à l'ESITC Caen. Le mur a été monté à échelle $\frac{1}{2}$ de manière à pouvoir être utilisé en chambre climatique une fois terminé, soit sur 2m de long et 30cm de large. De manière à obtenir la surface la plus plane possible, nous avons testé sur ce mur des coffrages traditionnels pour béton, cadre aluminium avec contreplaqué filmé. Contre le

contreplaqué a été mis en place le grillage en métal déployé de manière à limiter la surface de contact entre la bauge et le banche, et pouvoir décoffrer plus facilement.



Les mélanges ont été réalisés avec les malaxeurs de l'ESITC (cf 1.2.5). Le mélange allégé a cependant été réalisé avec du roseau broyé suite aux résultats mesurés par l'ESITC et l'UoP sur les performances thermiques. La mise en œuvre s'est faite comme pour les tests 3 & 4. La seule différence réside dans l'utilisation d'un petit fouloir pneumatique permettant de compacter la terre sur une faible largeur. Cet outil c'est montré particulièrement intéressant pour éviter d'avoir à piétiner le mélange, donc permettre de travailler en sécurité depuis un échafaudage.



Constat

Les banches sont restés en place 4 jours avant le décoffrage. Ils ont été enlevés assez facilement, et les grillages ont été enlevé aussitôt. la bauge n'avait pas particulièrement durci ce qui confirme l'intérêt des banches grillagés pour faciliter le séchage de la bauge avant décoffrage.



Le mur a subi un affaissement juste après le décoffrage et un début de basculement. Après analyse, il s'agit d'un problème d'élançement du mur. En effet le coffrage a été rempli jusqu'en haut, ce qui en rapport avec l'épaisseur correspondait à un mur de 160 cm de haut soit un élançement $E=h/e=5.33$ si l'on ne prend en compte que la partie porteuse. Or la limite que nous ayons atteinte lors d'expériences précédentes étaient $E=5.45$ dans le cas d'utilisation de coffrages grillagés et d'une mise en œuvre par temps chaud et sec avec décoffrage un jour après la mise en œuvre, et un $E=5$ dans le cas de la bauge ferme compactée au fouloir pneumatique dans des coffrages pleins, et un $E=3$ dans le cas du mur test 3. Il était donc tout à fait probable que ce mur vacille avec une bauge restée plastique.



3 – Conclusion – Proposition d'un procédé de mise en œuvre

Ces 5 expérimentations menées sur ces 5 murs nous permettent de cerner les différentes pistes d'optimisation de la mise en œuvre de la bauge. L'utilisation du coffrage grillagé semble être la plus pertinente pour sécuriser la mise en œuvre et permettre de monter les murs avec un élançement deux fois plus important que dans la bauge traditionnelle, et sans travail de taille des parements. L'utilisation des coffrages permet un chargement efficace du coffrage avec un godet d'engin (ou les godets malaxeurs). Néanmoins ces banches ne sont adaptées que pour une finition enduite, ou nécessitent de retravailler la surface rapidement après décoffrage. A moins de pouvoir adapter la peau du coffrage.

C'est en ce sens qu'a été travaillé le projet de coffrage avec l'entreprise Maloisel. Pour permettre une plus grande adaptation du procédé CobBauge aux savoir-faire des entreprises conventionnelles, le

coffrage définitif a été travaillé à partir des banches béton classiques. La cadre aluminium a été conservé et adapté pour permettre de glisser plusieurs peaux différentes : un contreplaqué filmé, un contreplaqué simple ou un métal déployé monté sur un cadre léger. Les coffrages peuvent être assemblés de manière conventionnelle pour permettre un travail en linéaire ou en hauteur, rester en place pour permettre à la bauge de se raffermir avant décoffrage. Le banche est également adapté pour permettre le temps de ce séchage d'y encastrer une structure articulée permettant de couvrir le dessus de la levée réalisée.

En l'absence d'une filière en capacité de produire une paille de chanvre coupée en brins courts, il semble que le lin soit la fibre la plus adaptée aux malaxeurs testés. Il faudra néanmoins sur cet aspect du malaxage procéder à des essais complémentaires en situation réelle pour estimer les temps de mise en œuvre de manière plus réaliste et valider ainsi les temps de mise en œuvre et les gains par rapport à la technique traditionnelle ou les adaptations déjà tentées.

Le recours à un coffrage intermédiaire intérieur est essentiel pour assurer la bonne régularité des couches et des épaisseurs de chaque parement. En revanche des tests complémentaires seront nécessaires pour déterminer si sur le long terme et pour un séchage complet, les deux parements restent joints et s'il n'y a pas de tassement différentiel entre les deux parements de mur. Ces tests seront également nécessaires pour évaluer ce même comportement lors de la mise en charge des murs (mise en place d'une poutre ou d'un plancher par exemple). Cela permettra d'évaluer si le recours à des cordes intercalées entre les couches de bauge est intéressante ou si d'autre dispositif sont à imaginer.