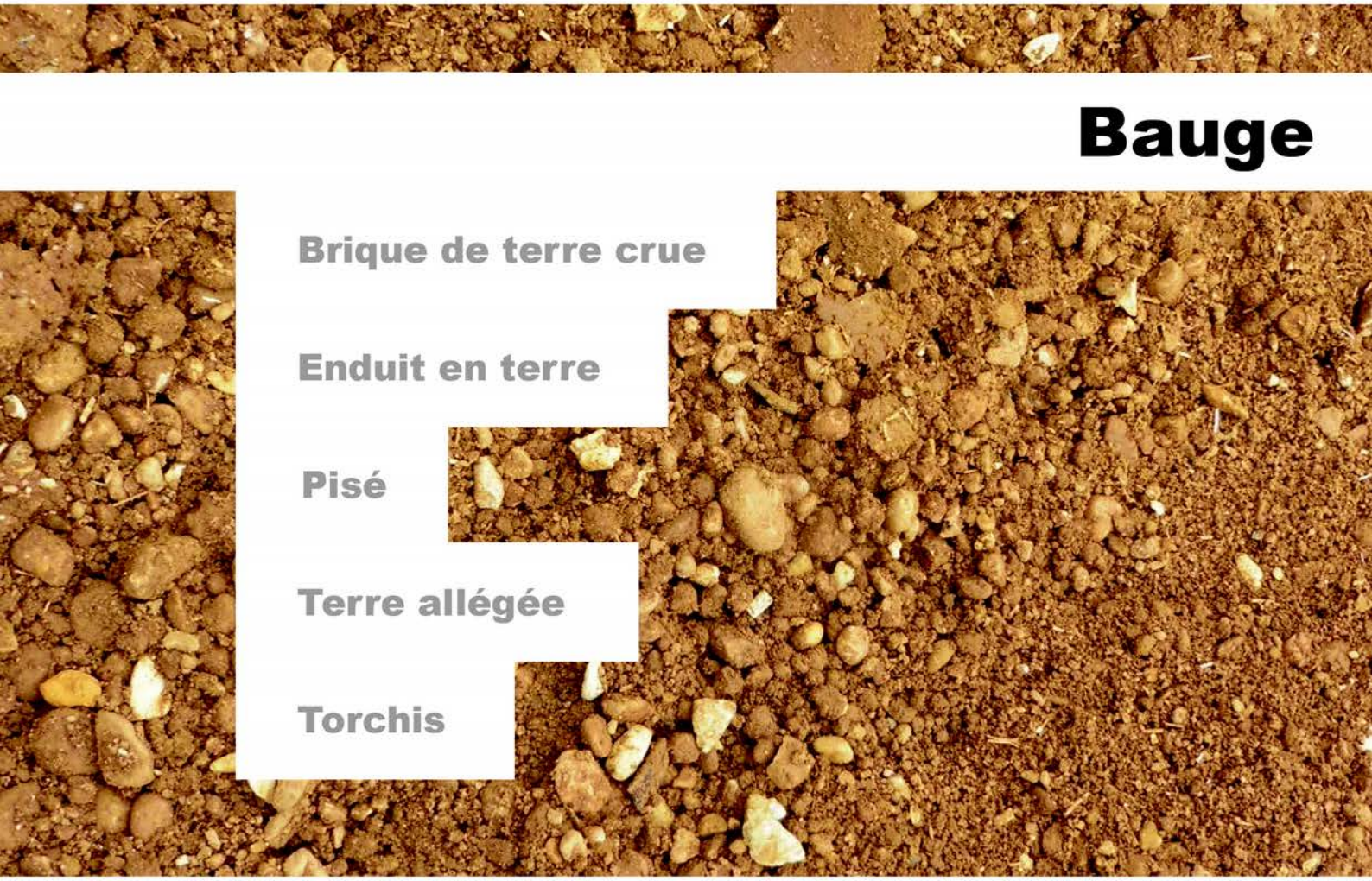


Guide des bonnes pratiques
de la construction en terre crue

édition du 13 décembre 2018

Sous la direction d'un collectif composé de :
ARESO
ARPE Normandie
AsTerre
ATOUTERRE
CAPEB
Collectif Terreux Armoricains
FFB
Fédération des SCOP du BTP
Maisons Paysannes de France
RÉSEAU Ecobâtir
TERA

Les guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue ont été rédigés sous la direction collective de :

- ARESO (Association Régionale d'Écoconstruction du Sud-Ouest)
- ARPE Normandie (Association Régionale pour la Promotion de l'Écoconstruction)
- AsTerre (Association nationale des professionnels de la Terre crue)
- ATOUTERRE (Collectif de professionnels de la construction en terre crue de Midi-Pyrénées)
- CAPEB (Confédération des Artisans et Petites Entreprises du Bâtiment)
- CTA (Collectif Terreux Armoricains)
- FFB (Fédération Française du Bâtiment)
- FÉDÉSCOP BTP (Fédération SCOP du Bâtiment)
- MPF (Maisons Paysannes de France)
- Réseau Écobâtir
- TERA (Terre crue Auvergne-Rhône-Alpes)

Préambule commun à tous les guides

L'utilisation de la terre crue dans les chantiers de bâtiments, qu'ils soient d'hier ou d'aujourd'hui, présente des avantages environnementaux et culturels de première importance. Faire connaître la terre, développer son utilisation et promouvoir ses atouts, contribue à la réduction de l'impact environnemental du secteur du bâtiment. Cette démarche permet d'autre part des restaurations de qualité, à la fois performantes et respectueuses de l'architecture du bâtiment, ainsi que la valorisation du patrimoine bâti.

Les terres résultent d'une transformation de la roche mère sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions climatiques et à la vie animale et végétale, opérant sur des temps géologiques longs. Elle est constituée physiquement de grains de tailles très variables dont les plus fins, constitutifs de l'argile, ont des capacités de collage importantes issues de leur forte affinité avec l'eau. Ainsi, au sein du matériau terre, l'argile, quand elle est mélangée à l'eau, enrobe les grains de taille supérieure et les tient ensemble dans une matrice. Après séchage, elle constitue le principal agent de cohésion de la terre. Le matériau terre est recyclable, et continuera à l'être pendant longtemps -parce que les liaisons sont réversibles- si la terre n'est pas mélangée à des matières non recyclables.

La terre est utilisée depuis bien longtemps par les humains pour construire leurs abris. En France, une partie significative du patrimoine en élévation date au minimum des 15ème-16ème siècles (bâti en colombage-torchis, en terre massive, …). Le fait probablement le plus remarquable est que les humains ont mis au point des méthodes de construction à base de terre crue très diverses, accordées à des fonctions et des formes architecturales tout aussi variées. Ces bâtiments sont en lien avec le sol local. Ceux qui nous sont parvenus sont pérennes. En effet, les constructions encore en usage aujourd'hui témoignent de l'immense pertinence des acteurs anciens qui ont su empiriquement, au fil des générations, retenir et transmettre tout ce qui constituait leur savoir-faire sur la construction en terre.

Cette diversité du paysage bâti est en effet à mettre en lien avec l'existence de « bonnes pratiques », reconnues par les entreprises de construction en terre et essentielles à la durabilité du bâtiment. C'est ce que les présents guides s'attachent à présenter.

Les guides de bonnes pratiques mettent à disposition des lecteurs du 21ème siècle l'état des connaissances sur les pratiques et les mises en œuvre diverses, reconnues et validées par les praticiens du bâtiment. Ils traitent de la partie émergée de l'iceberg des connaissances. Donc, ce qui n'est pas traité ici ne doit pas être considéré comme interdit, tant les techniques de construction à base de terre crue ont été et sont variées.

La diffusion de ces connaissances, objet des guides, s'adresse principalement aux professionnels non encore sensibilisés, afin que leur regard et leur pratique évoluent. Mais ces guides peuvent aussi intéresser les praticiens expérimentés qui souhaitent parfaire ou ordonner leurs savoirs et savoir-faire. Ces guides se veulent également être des documents de référence qui permettent aux acteurs de disposer d'un corpus technique favorisant les échanges entre eux et l'assurabilité de leurs réalisations comportant de la terre crue.

Il est à remarquer que les techniques de la construction en terre, qui nécessitent peu ou pas de mécanisation, vont dans le sens d'une culture du développement soutenable qui appelle à la modération de la tendance mécaniste et à un retour vers plus de travail humain, alors même que la pression économique incite à l'utilisation grandissante de machines. Ceci n'est toutefois valable que pour les mises en œuvre traditionnelles pas ou peu mécanisées. Pour les autres modes de mise en œuvre, il est important de mesurer leur impact environnemental. Cette démarche de sobriété est en parfaite cohérence avec une progression de l'emploi relocalisé dans les petites entreprises.

Aujourd'hui, la construction en terre reste logiquement dans le sillon d'une moindre utilisation d'énergie incorporée, d'une très faible émission de gaz à effet de serre, d'une relocalisation de l'économie et d'une fertile intensité sociale. En quelques années, la terre qui n'était dans le bâtiment qu'un matériau « exotique » ou « dépassé », est devenu un solide objet d'intérêt scientifique en même temps qu'un matériau de construction d'avenir.

Avant-propos commun à tous les guides

Les guides de bonnes pratiques[1] de la construction en terre crue* sont des documents normatifs*, c'est-à-dire qui « donnent des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats ». Ils constituent une référence pour l'ensemble des professionnels concernés directement ou indirectement par le bâtiment. Ce sont des textes consensuels issus d'un processus collectif qui a réuni les différents métiers en rapport avec la construction mettant en œuvre les techniques de terre crue utilisées en construction neuve et en restauration de l'ancien[2].

Le matériau terre étant multiple de par la diversité des terres et les techniques de mise œuvre, édicter des règles uniques valables pour tous et partout ne pouvait être la méthode correcte, le savoir-faire étant déterminant. Les praticiens de la construction en terre se sont donc réunis par technique pour exposer leurs bonnes pratiques afin qu'elles servent de référence.

Les guides de bonnes pratiques sont au nombre de six, reprenant six techniques de terre crue en vigueur :

- les torchis
- les briques de terre crue
- le pisé
- la bauge
- la terre allégée
- les enduits en terre

Il est à noter que le guide de bonnes pratiques des enduits en terre concerne les enduits sur supports autres que la paille ou les supports composés de terre crue pour lesquels des Règles Professionnelles[3] existent déjà .

L'objectif majeur des guides est de contribuer à créer des rapports de confiance entre les praticiens - concepteurs, bâtisseurs, ingénieurs, etc. -, et les maîtres d'ouvrages, bureaux de contrôle, assureurs et autres professionnels qui sont parties prenantes dans des ouvrages en terre crue. Les guides peuvent les aider à juger de la qualité des réalisations. Le succès des ouvrages en terre crue tient en effet à la co-réalisation des projets sur la base d'un partenariat établi le plus en amont possible entre leurs différents acteurs.

Dans les cas où les éléments fournis par les constructeurs ne suffisent pas à résoudre des problèmes de conception et de dimensionnement, les guides ont été conçus pour ouvrir la discussion afin d'aider à l'aboutissement des projets.

Ces guides ne sont cependant pas des manuels pédagogiques et ne se substituent ni à une formation, ni à un apprentissage, et la pratique de la matière reste le seul moyen d'acquérir des compétences réelles.

---

1 - Un glossaire commun à tous les guides de bonnes pratiques sur les techniques en terre regroupe les termes spécifiques aux constructions en terre crue ; ils sont en annexe commune et signalés par un astérisque* (voir p. 49).

2 - Rappel des précautions à prendre en cas d'intervention sur un bâtiment édifié avant 1948 : (Extrait de l'avant-propos commun à tous les NF DTU) «Le marché de travaux doit, en fonction des particularités de chaque projet, définir dans ses documents particuliers, l'ensemble de dispositions nécessaires qui ne sont pas définies dans les NF DTU ou celles que les contractants estiment pertinent d'inclure en complément ou en dérogation de ce qui est spécifié dans les NF DTU. En particulier, les NF DTU ne sont généralement pas en mesure de proposer des dispositions techniques pour la réalisation de travaux sur des bâtiments construits avec des techniques anciennes. L'établissement des clauses techniques pour les marchés de ce type relève d'une réflexion des acteurs responsables de la conception et de l'exécution des ouvrages, basée, lorsque cela s'avère pertinent, sur le contenu des NF DTU, mais aussi sur l'ensemble des connaissances acquises par la pratique de ces techniques anciennes.»

3 - Casaux, F., Marcom, A., Meunier, N., & Morel, J.-C. (2013). Règles professionelles - Enduits sur supports composés de terre crue (French code of practice for plasters for earthen walls). (C. de Gramont, T. Kremer, & E. Guillier, Eds.) (Le Moniteur). Paris (France): réseau Ecobatir, FFB, SCOP BTP, ENTPE.

En revanche, afin de ne pas bloquer les innovations, il a été choisi de privilégier **l'approche performantielle** qui consiste à définir les contraintes auxquelles est soumis l'élément d'ouvrage particulier, puis à concevoir et réaliser celui-ci en fonction. Les descriptions de moyens sont par conséquent soit absentes, soit très généralistes, soit placées en note ou encadré (texte non normatif) afin que ces moyens ne soient pas considérés comme les seules bonnes pratiques au détriment d'autres potentiellement capables d'aboutir au même résultat.

Un guide de bonnes pratiques détermine les performances que doit atteindre un ouvrage contenant de la terre crue et constitue de ce fait une référence pour rédiger un cahier de clauses techniques générales applicables contractuellement.

L'établissement des clauses techniques particulières repose sur la réflexion et l'expérience de la personne responsable de la construction en terre crue et fait l'objet d'une négociation entre les différentes parties intéressées au projet.

Bauge

Préambule commun à tous les guides....3
Avant-propos commun à tous les guides....4
Contributeurs....9
Article 1. Domaine d'application....11
Article 2. Cycle de production de la bauge....11
2.1 Extraction et préparation....11
2.1.1 Choix de la terre....11
2.1.2 Extraction de la terre....12
2.1.3 Préparation et stockage de la terre....12
2.2 Production du mélange de bauge....12
2.2.1 Composants....12
2.2.2 Mélange....14
2.3 Analyse et préparation du support en restauration....17
2.4 Mise en œuvre....17
2.4.1 Préparation des éléments....17
2.4.2 Bauge préfabriquée....17
2.4.3 Bauge coffrée....17
2.4.4 Transport de la matière sur le mur....18
2.4.5 Assemblage entre éléments....18
2.4.6 Dimensions du mur, d'une levée....19
2.5 Parement et séchage....19
2.5.1 Parement....19
2.5.2 Triquage*....19
2.5.3 Protection....20
2.5.4 Séchage....20
Article 3. Éléments de dimensionnement....20
3.1 Réactions à l'eau....20
3.2 Caractéristiques hygrothermiques*....21
3.3 Comportement au feu....21
3.3.1 Combustibilité....21
3.3.2 Tenue au feu....21
3.3.3 Coupe-feu....22
3.4 Comportement hydro-mécanique....22
3.4.1 Évolution de la résistance mécanique*....22
3.4.2 Caractéristiques mécaniques....23
3.4.3 Vérification de la portance d'un mur....25
3.4.4 Dimensionnement des surfaces d'appui....26
3.5 Stabilité....26
3.5.1 Élancement*....26
3.5.2 Augmentation de la stabilité par l'emprise au sol....27
3.5.3 Augmentation de la stabilité par les planchers et toitures....28
3.5.4 Résistance aux poussées* latérales....29

Article 4. Détails techniques.....30
4.1 Assise de l'élément d'ouvrage.....30
4.1.1 Contraintes mécaniques*.....30
4.1.2 Gestion de l'eau.....31
4.2 Élévations et hauts de murs.....35
4.2.1 Contraintes mécaniques*.....35
4.2.2 Gestion de l'eau.....41
4.3 Ouvertures et franchissements*.....41
4.3.1 Contraintes mécaniques*.....41
4.3.2 Gestion de l'eau.....44
Annexe.....47
Bibliographie.....47
Glossaire de la construction en terre crue.....49
Procédure de révision.....55

Contributeurs

Membres du comité de rédaction

M	Auvé Fabrice	
M	Bosi Grégory	
M	Capon Cédric	
M	Daubas Loïc	
M	Delagrée Mickaël	
M	Dugelay Samuel	*Coordinateur*
MME	Duvauferrier Triphine	
M	Grisel Edouard	
M	Hamard Erwan	
M	Junalik Robert	
M	Le Roux Jean-Luc	
M	Maetz Ghislain	
MME	Miranda Santos Marta	*Graphismes*
M	Miranda Sergi	*Illustrations*
M	Mouraud Corentin	
MME	Robert Anna	
M	Ruellan David	
M	Streiff François	

Liste des contributeurs

Adam	*Evelyne*
Astier	*David*
Auvé	*Fabrice*
Baffou	*Dominique*
Berthaut	*Olivier*
Blandin	*Pierre*
Bodin	*Sébastien*
Bon	*Sébastien*
Bosi	*Gregory*
Bouyer	*Laurent*
Caignon	*Edith*
Capon	*Cédric*
Chatillon	*Emmanuelle*
Dargagnon	*Olivier*
Daubas	*Loic*
Delagree	*Mickaël*
Divet	*Éric*
Dugelay	*Samuel*
Duran	*Adriana*
Duvauferrier	*Triphine*
Even	*Hervé*
Galès	*Hervé*
Grisel	*Edouard*
Hamard	*Erwan*
Hamel	*Batiste*
Hellouin de Menibus	*Arthur*
Heno	*Sébastien*
Jude	*Adelin*
Junalik	*Robert*
Kervella	*Rozenn*
Le Guern	*Malo*
Le Paih	*Amélie*
Le Roux	*Jean Luc*
Lecoeur	*Alexandre*
Ledeuc	*Yannick*
Leguen	*Lauredan*
Lequertier	*Anne*
Letouzé	*Yohann*
Levaudoux	*Bernard*
Maetz	*Ghislain*
Maloisel	*Ludovic*
Marcom	*Alain*
Marquand	*Dominique*
Martin	*Sarah*
Masson	*Yvon Marie*
Mayo	*Jean Pierre*
Meslin	*Dominique*
Meslin	*Julien*
Miranda Santos	*Marta*
Mouraud	*Corentin*
Pontoizeau	*Didier*
Popot	*Sophie*
Pradenc	*Henri*
Rigassi	*Vincent*
Robert	*Anna*
Ruellan	*David*
Savary	*Emanuel*
Scialpi	*Giulia*
Stiti	*Klaoula*
Streiff	*François*
Terres	*Anastasia*
Tirel	*Sylvain*
Vaillant	*Cécile*
Vantorhoudt	*Guillaume*
Vasdari	*Olga*
Villain	*Victor*
Zied	*Gharby*

Article 1. Domaine d'application

Ce Guide de Bonnes Pratiques étant basé sur une approche performantielle, il permet de prendre en compte la diversité des variantes de construction en bauge qui sont couvertes par le présent Guide.

Par bauge, nous entendons de la terre crue* :

- mise en œuvre à l'état plastique* pour élever directement un mur,
- amendée ou non en fibres, dans la mesure où la densité* reste supérieure à 1,3,
- sans stabilisant d'origine minérale (chaux, ciment).

Est également pris en compte dans ce guide la bauge préfabriquée qui consiste à préparer des levées de bauge non directement en place et à venir ensuite les assembler.

Le présent guide ne couvre pas les ouvrages* enterrés, la bauge ayant un comportement à l'eau ne lui permettant pas de résister correctement à ces contraintes.

Dans les autres cas, même si la présence dans la région d'un patrimoine en bauge est un bon indicateur quant à la convenance de la terre, des professionnels et du climat à cette technique, il est tout à fait envisageable de construire en bauge partout en France, y compris dans les territoires d'outre-mer.

Le type de maîtrise d'ouvrage* (publique ou privée), la destination de l'ouvrage* (notamment les Établissements Recevant du Public) ou la typologie des bâtiments ne changent pas le comportement du matériau et ce Guide est donc clairement à la destination de ces différents cas de figure.

Article 2. Cycle de production de la bauge

2.1 Extraction et préparation

2.1.1 Choix de la terre

La présence de patrimoine en bauge sur un secteur géographique est un indicateur de convenance des terres disponibles localement. Cependant, de très nombreux types de terre peuvent être utilisés pour la réalisation d'éléments en bauge en adaptant la mise en œuvre et la conception de celle-ci en fonction de l'élément d'ouvrage* à produire.

Les terres limono-argileuses sont particulièrement adaptées à la bauge. Mais l'analyse du patrimoine existant montre que le recours à tout type de terre est également possible moyennant une adaptation des ouvrages, des mélanges et de la mise en œuvre.

Seules sont à écarter les terres dont la présence de matière organique est décelable par contrôle visuel ou olfactif et celles ne présentant pas de cohésion*.

NOTE 1 : La présence d'éléments grossiers est rarement problématique le cas échéant la terre peut être tamisée.
NOTE 2 : La présence de matière organique peut être soulignée visuellement par une couleur sombre ou verte et elle est confirmée par une odeur d'humus.

2.1.2 Extraction de la terre

Le choix du matériau pour la construction doit être réalisé par la personne en charge* de la mise en œuvre. Si l'extraction est réalisée par un tiers, la présence du professionnel est recommandée afin de garantir le tri correct des terres.

Les terres à bâtir* peuvent provenir :

- de terrassements sur le site de construction, de terrassements de chantiers avoisinants ou de terre de découverte de carrière,
- du lavage des matériaux de carrière,
- du recyclage d'anciens murs en terre.

En ce qui concerne les terres de terrassements, la couche supérieure du sol, la terre végétale, ne convient pas pour la construction et doit être mise de côté avant l'extraction de la terre à bâtir*. La profondeur d'extraction de la terre à bâtir* doit être validée par un professionnel compétent.

Dans le cas de terres provenant du lavage de matériaux de carrière, les professionnels compétents doivent s'assurer que les éventuels traitements chimiques utilisés pour faciliter le lavage des matériaux en carrière n'ont pas d'impact sanitaire ou technique lors des phases de mise en œuvre et de vie de service de l'ouvrages*.

Dans le cas du recyclage de terre d'anciens murs, une attention particulière doit être portée sur la présence potentielle de sels due à l'usage de l'ancien bâti. Les parties potentiellement contaminées se situent généralement juste au-dessus du soubassement* et ne doivent pas être utilisées comme terre à bâtir*.

2.1.3 Préparation et stockage de la terre

La terre à bâtir* est mise en œuvre à l'état plastique*. À cette fin, elle peut être laissée dehors afin que les intempéries apportent l'eau nécessaire pour obtenir cet état hydrique. Cela peut également permettre, l'hiver, de briser les mottes grâce au gel.

Une désagrégation* des mottes peut favoriser la pénétration de l'eau dans l'ensemble de la matière lorsque la terre à bâtir* est sèche et/ou très argileuse ou dans le cas du recyclage d'un ancien mur.

NOTE : Dans le cas d'un stockage prolongé, vérifier que la terre ne s'est pas végétalisée.

2.2 Production du mélange de bauge

2.2.1 Composants

2.2.1.1 Eau

La terre est mise en œuvre à l'état plastique* avec de grandes variations à l'intérieur de cet état.

Plus la teneur en eau* est importante (plastique mou*, voire visqueux), plus le mélange est facile à réaliser, mais moins il est possible de réaliser des levées de hauteur importantes et plus le temps de séchage est long. En outre, il y a plus de tassement* et de retrait* ce qui entraîne éventuellement de la fissuration et une matière plus poreuse après séchage et donc moins résistante.

A l'inverse, lorsque la teneur en eau* est faible (plastique ferme*, voire humide), la bonne cohésion* entre les éléments est plus difficile à assurer.

NOTE : Toute eau exempte de polluants organiques convient pour la confection du mélange de bauge. Les propriétés physiques (pH, forces ioniques, etc.) et les composants de l'eau (sels calcaires, chlore, etc.) influencent l'effet des stabilisants, adjuvants* organiques, sels et cendres sur la bauge si la terre est très argileuse. Mais, en l'état actuel de nos connaissances, ces effets n'ont pas été mesurés.

2.2.1.2 Fibres

La bauge n'est pas nécessairement fibrée. Cependant des fibres peuvent être ajoutées au mélange. Les fibres ont pour rôle :

- d’augmenter la cohésion* du mélange de bauge à l’état frais pour faciliter sa mise en œuvre dans le mur,
- de limiter la fissuration lors du retrait* au séchage,
- d’augmenter la résistance au cisaillement* du mur et ainsi d’améliorer son comportement mécanique, notamment dans les angles et dans le cadre de contraintes sismiques.

Toutes les fibres végétales sont utilisables quels que soient leur longueur et leur degré de séchage.

NOTE 1 : La paille de blé longue et sèche prédomine du fait de sa disponibilité et de sa proximité. D’autres fibres sont utilisées : paille d’orge, paille d’avoine, paille de lin, chiendent, fenouil, fougères, eupatoire, chanvre, roseau, jonc de marais, iris de marais, ajoncs, etc.
NOTE 2 : l'usage de fibres non végétales ou animales modifie la recyclabilité du matériau.

Les fibres qui présentent des signes de pourrissement avant ajout dans le mélange de bauge sont exclues. La putréfaction entraîne des odeurs, l'apparition de taches dans les enduits, et des baisses de résistance mécanique*. La pourriture se détecte par contrôle visuel (fibres noires ou démarrage de moisissures grises ou blanches) et contrôle olfactif (odeur de champignon, de moisi).

Les quantités de fibres employées sont très variables selon la terre à bâtir* employée et le résultat souhaité.

NOTE 3 : Les teneurs en fibres sont généralement en masse de l’ordre de 1 à 2% du poids de terre sèche.

2.2.1.3 Granulats

Si besoin, les terres à bâtir* très fines peuvent être amendées en granulats* (sables grossiers, graviers) ou mélangées à des terres graveleuses. L'ajout de granulat* :

- permet de limiter la fissuration lors du retrait* au séchage,
- joue le rôle de dégraissant* dans le mélange de bauge et par conséquent augmente son ouvrabilité, limite le retrait*, mais aussi la cohésion* du mélange,
- augmente la rugosité de la surface des murs pour favoriser l’accroche des enduits.

NOTE 1: Les granulats* biosourcés comme la chènevotte par exemple peuvent également être employées et ont le même effet.
NOTE 2: Les granulats* de pouzzolane et de chènevotte par exemple ont également la propriété d’alléger le mélange.

2.2.1.4 Stabilisants

L'emploi de stabilisants peut augmenter la résistance à l'eau et à l'abrasion des murs en bauge. Les stabilisants végétaux et d’origine animale (ferments, sang, urine, bouse de vache, crottin de cheval) peuvent être utilisés.

Le matériau terre crue est par nature réversible. Il en résulte que les matériaux de construction en terre stabilisée, dont la solubilité dans l'eau ou la résistance sont modifiées par d'autres agents liants ou l'ajout de substances chimiquement actives, ne font pas l'objet de ces Guides

Des essais de convenance en préalable à l'emploi d'un nouveau stabilisant et/ou d'une nouvelle terre doivent être effectués. Il est important de questionner auparavant l'utilité de leur utilisation par rapport aux contraintes réelles subies par l'élément d'ouvrage* et la résistance de celui-ci sans amendement.

2.2.1.5 Impact des proportions des composants

	Augmentation de la teneur en eau*	Ajout de fibre	Augmentation de la teneur en argiles* de la terre
Facilité de mélange	Facilite le mélange	Complique le mélange surtout pour certains modes de malaxage	Les argiles* rendent le mélange plus difficile à réaliser
Plasticité* / Malléabilité	Fluidifie la matière	Durcit le mélange	La teneur en argile* permet de conserver la malléabilité sur une plage de teneur en eau* plus large.
Hauteur des levées	Réduit la hauteur possible des levées car la matière est plus lourde et plus fluide	Permet de monter plus haut car les fibres retiennent la matière	La teneur en argiles* permet de monter plus haut car elles assurent une meilleure cohésion* des composants de la terre
Affaissement	Plus important	Moins important	Moins important dans le cas d'une forte teneur en argile*
Temps de séchage	Plus long	Variable suivant les fibres utilisées	Les argiles* augmentent le temps de séchage car elles nécessitent plus d'eau pour sa mise en œuvre
Retrait*	Augmente le retrait* et par conséquent la fissuration.	Diminue la fissuration	Les argiles* augmentent le retrait* car elles nécessitent plus d'eau pour leur mise en œuvre
Densité*	Diminue la densité*	Diminue la densité*	Neutre, dépend surtout de la répartition granulaire
Cohésion*	Augmente la cohésion* finale en permettant lors du malaxage de délier les argiles* et un meilleur enrobage des grains et des fibres, mais en excès la diminue en créant des vides et des fissures de retrait*	Augmente la résistance à la traction* mais trop de fibres fragmente la matière et diminue la résistance à la compression*	Les argiles* assurent la cohésion* de la matière et l'augmentent tant qu'elles ne créent pas de retrait* excessif
Résistance à l'eau		Augmente la résistance à l'arrosage	Les argiles* améliorent la résistance à l'eau

Tableau 1 - Impact du type de terre, de la teneur en eau* et de la teneur en fibres sur le mélange de bauge

2.2.2 Mélange

Le mélange des différents constituants à l'état plastique* requiert un effort de pétrissage qui peut être réalisé de différentes manières et avec différents outils.

Le mélange est souvent mis en œuvre directement, mais il peut être laissé à reposer avant sa mise en œuvre, pour diminuer sa teneur en eau* ou donner le temps aux argiles* de se réhydrater.

NOTE : En cas de correction granulaire et/ou d'ajout de fibre, la terre est mélangée aux granulats* minéraux puis à l'eau et enfin aux fibres

Les principaux modes de mélange sont détaillés ci-après à titre informatif.

Piétinement

Le mélange est piétiné à même le sol ou sur des panneaux puis ramené et/ou retourné. Il peut également être opéré sur une bâche qui permet de ramener et retourner le mélange plus facilement.

Le piétinement est parfois réalisé par des animaux (cheval de trait).

Rendement : 1 à 2 m^3 par jour au pied suivant la dureté* du mélange.

Type de mélange : Possibilité de faire des mélanges très durs.

Général: Tous mélanges possibles.

Malaxeur à hélice

Il s'agit de malaxeurs portatifs équipés d'une ou deux pales hélicoïdales. Il est préférable d'avoir 2 pales pour les mélanges plastiques* qui sont alors assez aérés. Le mélange est réalisé dans un contenant indépendant.

Rendement : 1 à 3 m^3 par jour suivant la dureté* du mélange.

Type de mélange : Mélange aéré mais potentiellement assez ferme. Mélange des fibres très complexe voire impossible.

Général: Portatif et polyvalent.

Bétonnière

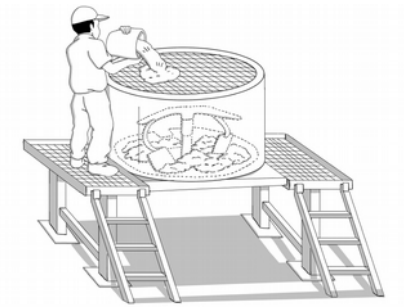
Une cuve sur laquelle sont fixées des pales tourne sur un axe incliné. La terre est mélangée par retournement. Ces malaxeurs sont très adaptés pour le béton et peuvent être utilisés avec une terre très mouillée (visqueux).

Rendement : 2 à 5 m^3 par jour suivant la capacité.

Type de mélange : Mélange très mou voir visqueux. Difficulté à mélanger les fibres.

Général: Peu coûteux et polyvalent mais nécessite de fortes teneurs en eau*.

Malaxeur à cuve verticale



Des pales sont fixées sur un axe vertical qui tourne dans une cuve. Parfois les pales sont fixes et la cuve tourne. Il peut être important d'avoir un système de réglage des pales afin de s'adapter au type de terre et à sa teneur en eau*.

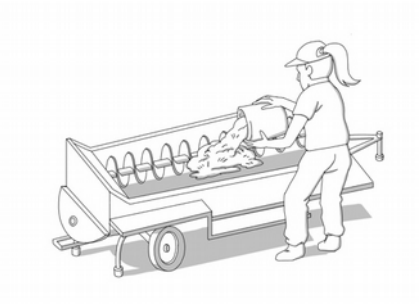
Rendement : 5 à 20 m^3 par jour suivant la capacité de la cuve.

Type de mélange : Mélange humide, plastique mou* et visqueux. Pas de mélange plastique ferme*. Le fibrage peut être délicat suivant pales et types de fibres. Dans le cas du pétrin (crochet de malaxage), il est possible de faire des mélanges fermes mais le malaxeur n'accepte aucun caillou.

Général: Peu coûteux et polyvalent dans la mesure où ils sont utilisés dans la filière béton et

peuvent être facilement trouvés d'occasion.

Malaxeur à cuve horizontale



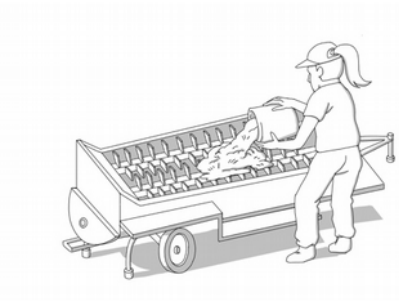
Les pales (sans couteaux) sont fixées sur l'axe horizontal qui tourne dans la cuve. Le mélange est écrasé sur les parois et se fait en retombant dans la cuve.

Rendement : 5 à 20 m^3 par jour suivant la capacité de la cuve.

Type de mélange : Mélange liquide à dur. La rapidité de l'évacuation est facilitée par une inclinaison de la machine posée sur cale et cric. Le fibrage à 10cm maximum facilite le mélange.

Général: Matériel d'occasion assez disponible.

Malaxeur continu à palette



Ce type de malaxeur est composé de 2 axes à palettes qui poussent la matière et l'écrasent. Ce type de malaxeur est utilisé dans la filière terre cuite (poterie, briques et tuiles) pour réaliser des mélanges plastiques très fermes*.

Rendement : Jusqu'à 20 m³ par jour

Type de mélange : Tout mélange plastique*, même ferme. Fibrage parfois délicat.

Général: Mélanges durs possibles mais déplacement difficile.

Godet malaxeur

Des pales hélicoïdales sont montées sur un axe horizontal qui tourne à l'intérieur d'une cuve. Cette cuve peut être fixée au bras d'un engin de levage, ce qui permet d'amener le mélange sur le lieu de sa mise en œuvre.

Rendement : Jusqu'à 20 m³ par jour

Type de mélange : Mélange mou et peu homogène. Difficulté à mélanger les fibres. Sauf si les pales se rapprochent plus de celles que l'on trouve dans les malaxeurs à cuve horizontale

Général: Fonctionne mal pour ce type de mélange

Engins de creusage/levage

Écrasement avec tracteur équipé d'un chargeur, minipelle, tractopelle, pelleteuse.

Sur une dalle ou sur le sol directement, le mélange peut être écrasé par le déplacement des roues de l'engin, puis si besoin retourné avec le chargeur pour être de nouveau écrasé. Le godet rétro permet aussi de creuser directement la terre à bâtir*, et réaliser le mélange dans un trou en écrasant la matière. Le chargeur permet d'acheminer les mélanges à proximité du mur, voire directement au-dessus du mur.

Rendement : 5 à 50 m³ par jour

Type de mélange : Mélange mou à ferme. Peut casser les fibres

Général : Outil polyvalent. Rendement important mais nécessite une zone/surface adéquate

Autres malaxeurs

D'autres types de matériels agricoles sont parfois utilisés, généralement en raison de leur présence et de leur polyvalence : malaxeur à queue de cochon, chargeur avec godet à griffes, autre malaxeur à fourrage, rotavateurs, épandeurs à fumier.

2.3 Analyse et préparation du support en restauration

Dans le cadre d'une restauration, de multiples paramètres peuvent être analysés, contribuant à la compréhension du fonctionnement actuel du bâti et des désordres potentiels. Les principaux sont :

- l'environnement : apports d'eau et drainages*, vent dominant et protection au vent,
- l'équilibre du bâti : système constructif, ouvertures, charpentes, dallages,
- les modifications : rajout d'un bâtiment, fosse, trottoir, drainage*,
- les pathologies du bâti : usure, érosion, fissures,
- les désordres liés à la mise en œuvre.

Avant d'entamer la réparation d'un mur en bauge, les éventuelles causes de pathologies doivent être traitées en premier et aucune autre intervention ne doit être réalisée avant que l'effet du traitement de ces pathologies ne soit stabilisé.

Dans un second temps, il faut s'assurer de la bonne cohésion* des parties rajoutées avec les parties anciennes. Il s'agit d'enlever ou refixer les parties instables, dépoussiérer les surfaces et préparer les interfaces en humidifiant la surface et/ou en appliquant un gobetis de terre.

Il est parfois nécessaire de retailler, recouper le mur pour retrouver une assise horizontale ou créer une forme d'ancrage par exemple dans le cas des fissures. La mise en place de pièces de bois (pinoches*) peut renforcer cette liaison entre parties anciennes et parties neuves.

2.4 Mise en œuvre

2.4.1 Préparation des éléments

Le façonnage d'éléments à partir du mélange peut servir à donner de la cohésion* à la matière et à faciliter le transport de la terre jusqu'au mur.

La préparation des éléments peut se faire :

- à la main : boules,
- à la fourche, à la bêche, au racloir, en découpant les éléments dans le mélange étalé au sol : caillebotis, pâtons, gazons,
- à la pelle mécanique.

La forme la plus classique d'élément à partir du mélange est une galette de 20 à 30 cm de côté par 5 à 10 cm de hauteur. Toutefois les formes réalisées sont variables et dépendent du mode de préparation, du mode de transport jusqu'au mur et de l'assemblage qui sera réalisé.

Les éléments peuvent être claqués et retournés ou lissés en compressant pour assurer une bonne cohésion* de la motte.

2.4.2 Bauge préfabriquée

Si les éléments sont séchés avant leur mise en place, il s'agit normalement de la technique de l'adobe. Cependant, quand ces éléments sont de grande taille et réalisés selon la technique de la bauge, leurs dimensions importantes nécessitent une manutention par des équipements de levage. Dans ce cas, nous parlons de bauge préfabriquée.

2.4.3 Bauge coffrée

La technique de la bauge ne requiert généralement pas de coffrage*. Cependant l'utilisation d'éléments de coffrage* peut permettre de supprimer la phase de recoupe de la bauge.

Les éléments de coffrage* sont pleins ou ajourés. Dans le cas d'un coffrage* plein, la bauge ne peut pas sécher, la teneur en eau* et le mode de mise en œuvre doivent empêcher que la matière ne s'affaisse lors du décoffrage. Dans le cas d'un coffrage* ajouré, la bauge peut sécher.

Le décoffrage peut être fait directement après le remplissage ou après un temps de séchage dans le cas de coffrages* ajourés. Il varie en fonction de la consistance du mélange, des conditions climatiques, du besoin de mettre en charge* le mur et du besoin de retoucher la surface du mur (resserrage, lissage).

Il faut noter que l'usage de coffrages* limite ou complique les possibilités de forme que l'état plastique* de la terre permet.

2.4.4 Transport de la matière sur le mur

Le mode de transport est directement lié au type d'élément façonné. Les petits éléments calibrés pour être facilement transportables sont jetés à la main ou à l'aide d'une fourche. Suivant la distance et la manière de travailler, il peut y avoir deux personnes ou plus. Il a également été mentionné l'usage de monte-charge pour porter les éléments.

Les éléments de taille importante peuvent être préparés et transportés jusqu'au mur avec des moyens mécaniques.

La matière est parfois transportée en vrac à l'aide de godets. La cohésion* est alors réalisée au niveau du mur.

2.4.5 Assemblage entre éléments

La continuité de la matière au sein du mur et donc la résistance d'ensemble, notamment aux angles doit être assurée. Pour cela trois moyens peuvent être mis en œuvre : l'appareillage* des éléments dans le mur, le compactage* des éléments entre eux et le fibrage.

2.4.5.1 Appareillage* des éléments

Les techniques d'appareillage* dépendent de la forme des éléments mais le croisement est souvent d'au moins 1/3 de l'élément.

Une technique particulière consiste à mettre en place les éléments à 45° (arêtes de poisson ou opus spicatum*) de manière à limiter les éventuelles fissurations dues au retrait*. Cela permet également une meilleure ergonomie de travail.

2.4.5.2 Compactage* des éléments

Pour compacter les éléments entre eux et assurer une bonne cohésion* entre éléments, plusieurs techniques peuvent être utilisées :

- les éléments peuvent être foulés au pied après leur mise en place dans le mur, technique la plus fréquente,
- les éléments peuvent être massés à la main après leur mise en place dans le mur,
- les éléments peuvent être tassés avec le godet d'une pelle mécanique après leur mise en place dans le mur.

Attention, plus la terre est ferme (faible teneur en eau*), plus il est difficile de liaisonner les éléments de cette manière. L'homogénéité ou la liaison n'est souvent qu'apparente et il convient de s'assurer de son efficacité.

Une attention doit être portée à ne pas trop travailler la terre pour ne pas qu'elle se ramollisse et « ventre » (rhéofluidification).

2.4.5.3 Fibrage

Les fibres peuvent assurer la continuité de matière, aussi bien à l'intérieur de chaque élément qu'entre les éléments et sur l'ensemble d'une levée.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- fibres positionnées en alternance avec les rangs de terre,
- fibres passant d'un élément à l'autre.

2.4.6 Dimensions du mur, d'une levée

Le mélange mis en œuvre étant plastique*, un mur doit être réalisé par étape avec un temps de séchage entre chacune d'elle. Ces couches successives sont appelées « levées ».

La hauteur constatée des levées varie de 10 cm à 100 cm. Elle dépend du mode de mise en œuvre et notamment :

- de la largeur du mur, plus le mur est large, plus il peut être haut,
- de la teneur en eau* de la terre, plus la terre est mouillée, plus elle s'affaisse et moins il est possible de monter haut,
- du fibrage, qui apporte de la cohésion* au mélange de bauge à l'état frais, surtout lorsque les fibres sont positionnées perpendiculairement au mur,
- du degré de compactage* et de pétrissage effectué sur le mélange en place dans le mur, plus la matière est retravaillée en place, plus elle a tendance à s'affaisser,
- de la taille, de la forme et de la mise en place des éléments.

L'épaisseur constatée des murs varie de 10 à 120 cm. Le mur a parfois du fruit* : il est plus épais en bas qu'en haut. Le choix de cette épaisseur dépend de :

- la stabilité du mur (chapitre 3.5)
- les contraintes de mise en œuvre (les personnes œuvrant sur le mur, la largeur des éléments, les moyens mécaniques éventuels),
- les contraintes subies par l'ouvrages*.

2.5 Parement et séchage

2.5.1 Parement

Le parement consiste à recouper la surface du mur afin de lui donner sa forme finale. Les surépaisseurs générées à la mise en œuvre du mur sont ainsi supprimées et la surface du mur est aplanie. Cette recoupe est réalisée à l'aide d'un outil tranchant. Le parement est parfois remplacé ou complété par un triquage* de la surface du mur.

NOTE : Le parement peut être effectué à l'aide d'un paroir (sorte de bêche), d'une bêche, d'un coupe foin, d'une scie à foin et avec des outils de taille de pierre s'il est réalisé une fois que le mur est sec.

Cette opération n'est pas systématique et elle est rare si le mur a été coffré.

Le parement peut être réalisé à différents stades de séchage du mur :

- le jour même en prenant soin de ne pas déstructurer le mur ou le faire s'affaisser par vibration de la matière,
- après un temps de séchage suffisant permettant de ne pas « arracher » la terre avec les fibres,
- une fois sec, auquel cas il faut utiliser des outils de taille plus coupants (outils de taille de pierre).

Ce travail à sec peut dégrader et déstructurer la surface du mur, en particulier dans le cas de terres graveleuses.

2.5.2 Triquage*

Le triquage* consiste à battre la surface du mur. Il est réalisé à l'aide d'un outil en bois.

NOTE : Le triquage* peut être réalisé à l'aide d'une perche de châtaignier, d'un manche en bois, d'un maillet, d'un fléau.

Le triquage* n'est pas systématique. Il peut contribuer à :

- resserrer et densifier la matière en surface afin de rendre le mur plus résistant aux agressions superficielles telles que l'arrosage et l'abrasion,
- resserrer les fissures de retrait* qui se forment au séchage,
- modifier l'esthétique du mur en rentrant les gros grains et fibres et en créant un relief plus ou moins régulier,

- créer une rugosité favorisant l'accroche des enduits.

Le triquage* se fait généralement lorsque la bauge est à l'état plastique ferme*, après un certain temps de séchage. S'il est réalisé quand la bauge est trop molle, il provoque un affaissement de la levée (ventre). S'il est réalisé alors que la bauge a trop séché, la matière est non déformable et le triquage* est inefficace, voire il désagrège la surface et l'abîme.

Le temps entre la mise en œuvre et le triquage* dépend notamment du type de terre à bâtir* employé (plus elle est argileuse, plus le séchage sera long), de la teneur en eau* lors de la mise en œuvre et des conditions de séchage.

2.5.3 Protection

Les murs ne sont pas systématiquement protégés entre deux levées, en fonction de la durée d'exposition aux intempéries, de la météorologie, et du type de terre à bâtir* employé. Toutefois, une attention particulière doit être portée sur le risque d'accumulation et de concentration d'eau à certains endroits. Si une protection est appliquée, elle doit concerner le dessus du mur et assurer la ventilation et le séchage des parties latérales du mur.

Une fois le mur fini, une réception doit être faite par le charpentier qui prend alors la responsabilité de la protection du mur. Il est alors important de bien préciser les risques et précautions à prendre.

NOTE : Les éléments de protections utilisés peuvent être des bâches armées étirées, des planches, des tôles sur tasseaux ou encore de la paille, fibres longues orientées vers l'extérieur.

2.5.4 Séchage

Un temps de séchage est nécessaire entre la réalisation de deux levées afin que celle du dessous ait atteint une cohésion* suffisante pour supporter celle du dessus. Ce temps de séchage, très variable, dépend du type de terre à bâtir* employé, de la teneur en eau* à la mise en œuvre, de l'épaisseur du mur, de la météorologie.

NOTE 1 : À titre indicatif, le temps le plus couramment relevé est de 3 semaines.
NOTE 2 : vérifier que la levée ne s'affaisse plus grâce à l'application d'une charge* sur le dessus : poids du maçon (chapitre 3.4.1).

Article 3. Éléments de dimensionnement

3.1 Réactions à l'eau

La terre, et par conséquent la bauge, a une forte capacité d'absorption* d'eau qui lui confère ses propriétés hygrothermiques*. L'eau, dans certains cas, occasionne aussi des désordres dont il faut se prémunir :

- l'arrosage (pluie) peut créer une érosion de surface qui a plus de conséquences esthétiques que structurelles,
- l'accumulation d'eau à l'intérieur du mur peut altérer ses propriétés mécaniques, voire conduire à l'effondrement de la structure.

En ce qui concerne l'eau, il conviendra donc de minimiser les apports et maximiser les évaporations :

- l'eau provenant du sol crée les plus grosses pathologies et une attention particulière sera portée sur le drainage* et les remontées capillaires (chapitre 4.1),
- les intempéries peuvent apporter de grandes quantités d'eau sur les surfaces horizontales et inclinées qui seront protégées (chapitre 4.2),
- pour maximiser les évaporations, il est recommandé de limiter les revêtements de surface et de maximiser la perméabilité à la vapeur d'eau* de ceux mis en place ou existants, généralement pour des raisons esthétiques ou d'usage (chapitre 4.2 et 'Règles professionnelles enduits sur supports composés de terre crue').

3.2 Caractéristiques hygrothermiques*

Les propriétés hygrothermiques* de la bauge sont présentées dans le Tableau 2 -

Propriété	**Symbole**	**Valeur moyenne mini**	**Valeur moyenne maxi**	**Unité**	**Source**
Densité*	d	1,3	1,8	SU	Définition
Masse volumique* sèche	ρ	1400	1800	$kg.m^{-3}$	Définition
Conductivité thermique*	λ	0,4	0,6	$W.m^{-1}.K^{-1}$	ACSCNI*
Chaleur spécifique	c	1000	1500	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	(Oliva et Courgey, 2010)
Capacité thermique volumique*	ρc	400	750	$Wh.m^{-3}.K^{-1}$	Calcul
Diffusivité thermique*	D	0,22	0,28	$x10^{-6}m^{2}.s^{-1}$	Calcul
Effusivité	E	12	21	$Wh^{0,5}m^{-2}.K^{-1}$	Calcul
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ	4	10	m	(Oliva et Courgey, 2010)
Coefficient d'absorption* d'eau	w	6	13	$kg.m^{-2}.h^{0,5}$	(Ziegert, 2013)

Tableau 2 - Caractéristiques hygrothermique* de la bauge

Cela confère à la bauge :

- une très forte inertie thermique* permettant de l'utiliser pour créer de la masse thermique à l'intérieur des bâtiments (murs accumulateurs, murs trombe, poêle de masse),
- une très forte capacité d'absorption* de la vapeur d'eau permettant de réguler l'hygrothermie* à l'intérieur des espaces et rendre ceux-ci agréables à vivre,
- une forte diffusivité thermique* permettant son utilisation pour les murs extérieurs ensoleillés (exposition sud),
- une effusivité thermique* moyenne qui permet de garder la terre apparente dans les pièces de vie.

3.3 Comportement au feu

3.3.1 Combustibilité

De par son caractère minéral, la terre à l'état sec est incombustible, classé conventionnellement A1 (ex M0), sans nécessité d'essai préalable, dans la même catégorie que pierre, produits céramiques, briques, etc.

De manière générale si la terre sèche contient de la fibre, elle reste incombustible tant que la masse volumique* est supérieure à 1300 $kg.m^{-3}$.

3.3.2 Tenue au feu

Concernant la tenue au feu, nous avons constaté sur l'ensemble des chantiers ayant pris feu qu'il n'y avait pas de pathologies liées au feu au niveau des murs. Les seules pathologies à ce niveau-là provenant des interventions des pompiers et du mouillage des murs. Ainsi, nous avons observé que les propriétés de la terre se conservent pendant au moins 2h, sans essais certifiés à l'appui.

3.3.3 Coupe-feu

La forte capacité de la terre à absorber des calories grâce à l'eau résiduelle qu'elle contient fait d'elle un matériau coupe-feu mais, tout comme pour la tenue au feu, il n'y a pas eu encore d'essais certifiés en France.

3.4 Comportement hydro-mécanique

3.4.1 Évolution de la résistance mécanique*

La résistance d'un mur en bauge est très dépendante de la teneur en eau* du matériau en œuvre. Elle varie et passe par plusieurs stades spécifiques tout au long de son séchage. Des essais de terrain empiriques sont utilisés pour évaluer la résistance des éléments de bauge au cours du séchage.

Nous proposons ici cinq états de la bauge au cours de son séchage et des différentes phases d'un chantier :

3.4.1.1 Bauge plastique*

C'est l'état de la bauge au moment de sa mise en œuvre. Quand la matière vient d'être mise en place, elle supporte son propre poids et éventuellement le poids du maçon qui la met en œuvre et comprime ainsi la matière. Aucune autre charge* ne lui est appliquée.

3.4.1.2 Bauge ferme

C'est l'état de la bauge après un premier temps de séchage de l'ordre de 3 semaines (mais ce temps peut être très variable, chapitre 2.5.4). Le maçon monte dessus sans constater de déformation. C'est à ce moment qu'est mise en œuvre la levée suivante.

Cet état de la matière permet de supporter une levée de bauge réalisée dans les règles de l'art mais également certaines toitures et planchers.

3.4.1.3 Bauge en cours de séchage

Lorsque la levée supérieure a suffisamment séché pour recevoir une levée supplémentaire, les levées inférieures ont également séché et on considère que leur résistance en compression* est suffisante pour recevoir cette nouvelle levée en plus des charges* déjà appliquées.

Cela se vérifie dans la pratique, mais également sur les études reliant la résistance en compression* à la teneur en eau* du mur.

3.4.1.4 Bauge humide

La bauge s'est tassée, densifiée et a perdu suffisamment d'eau pour supporter les charges* courantes qui lui seront appliquées au cours de la vie de l'ouvrage* (charges des éléments d'ouvrages*, charges* d'exploitation, charges* climatiques). On admet que sa résistance est d'au moins la moitié de sa résistance à l'état sec.

La vérification de ce degré de séchage se fait généralement par l'application d'une pression* avec le pouce qui ne doit pas révéler de déformation de la matière. Ce test est à relativiser dans le cas de conditions de séchage extrêmes (chaleur et vent importants) qui n'assurent pas une bonne homogénéité du séchage et du durcissement entre les faces externes du mur et le cœur de la levée.

Attention, à cet état de séchage, la bauge reste très sensible à l'eau et il convient de bien la protéger pour éviter une reprise d'eau qui diminuerait sa résistance en compression*.

3.4.1.5 Bauge sèche

Le séchage complet de la bauge se prolonge sur un temps assez long et dépendant notamment des conditions météorologiques. Il est estimé à 2 années. La matière finit son retrait*, sa résistance augmente et on peut enduire.

Une fois que la matière est sèche à cœur, elle est moins sensible à l'eau car l'humidité est absorbée puis dissipée par l'ensemble du mur qui sèche ensuite. Il y a moins de risque de reprise d'eau.

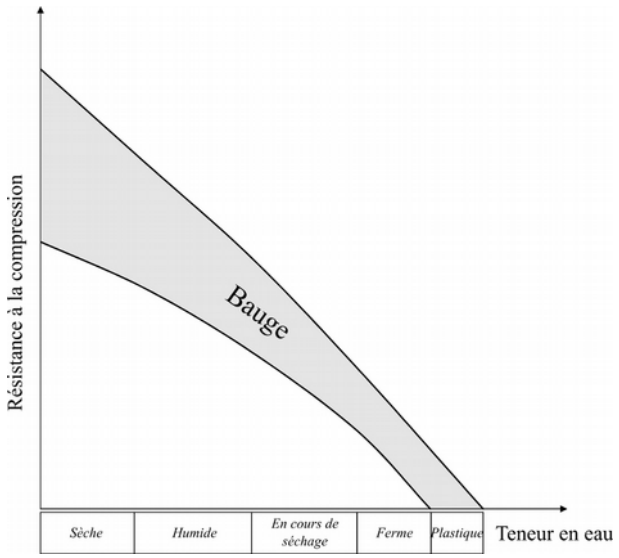


Figure 1: évolution de la résistance en compression en fonction de différents états de la matière d'après (Saxton,1995)

3.4.2 Caractéristiques mécaniques

La principale qualité mécanique d'un mur en bauge est sa résistance à la compression*, c'est pourquoi dans cette partie les contraintes exprimées sont uniquement des contraintes en compression*.

Les autres propriétés mécaniques de la bauge sont :

- une faible résistance à la traction* et par conséquence au cisaillement* (charges ponctuelles), à l'arrachement (fixations, angles) et à l'abrasion (usage),
- une bonne ductilité*, c'est à dire une bonne capacité à se déformer sans rompre, très lié à la présence de fibres,
- son amplitude de mouvements, essentiellement au séchage, mais également pendant la vie du bâtiment et ce, dans toutes les directions.

Les performances mécaniques de la bauge proposées dans cette partie, sont issues d'essais sur le patrimoine et de données fournies par des professionnels (Tableau 3 et Tableau 4).

La matière première et sa mise en œuvre étant par essence non homogène, les propriétés mécaniques d'un mur en bauge sont variables et dépendantes notamment :

- du type de terre, du type de fibres et de la teneur en fibres,
- de la qualité de la mise en œuvre,
- de la teneur en eau*.

Concernant la teneur en eau*, il est indispensable de dissocier les différentes résistances du matériau aux différents stades de son séchage (chapitre 3.4.1).

Le dimensionnement d'un ouvrage* en bauge doit donc être réalisé à l'aide des caractéristiques et des performances de la bauge correspondant à l'état de la matière au moment de sa sollicitation. Le chargement maximal d'un ouvrage* en bauge ayant lieu généralement à l'état humide de la matière (chapitre 3.4.1.4), ses performances mécaniques augmenteront jusqu'à son séchage complet. De plus, son poids propre diminuera sensiblement en réduisant la teneur en eau*. Il est donc important de souligner que les ouvrages* en bauge seront généralement dimensionnés à l'état humide et sur dimensionnés à l'état sec. Cette propriété en fait des ouvrages* particulièrement robustes et durables.

NOTE : une attention toute particulière devra être prise concernant les choix techniques des éléments entraînant des charges* ponctuelles, il est recommandé de dimensionner ces éléments afin de ne pas provoquer de pathologies sur l'ouvrage* (Article 4.).

3.4.2.1 Caractéristiques mécaniques à l'état sec

Les études menées sur une grande variété d'échantillons ont montré une forte liaison entre la densité* du matériau en œuvre et ses propriétés mécaniques à l'état sec. Elles donnent une résistance à la rupture* en compression* comprise entre 0,6 et 1,5 MPa* pour des échantillons secs avec une masse volumique* variant de 1400 à 1800 $kg.m^{-3}$.

Les préconisations de l'Article 4. sur les détails techniques visent notamment à anticiper les mouvements du matériau et prémunir celui-ci des accumulations d'eau qui entraîneraient une baisse trop importante de sa résistance mécanique*.

Temps de séchage	**Masse volumique***	**Résistance mécanique***
1 – 3 (ans)	1400 – 1800 (kg/m^3)	0,6 – 1.5 (MPa*)

Tableau 3– Caractéristiques de la bauge à l'état sec

Rappel : Les valeurs proposée dans le Tableau 3 correspondent à la résistance de la bauge à l'état sec, elles ne donnent donc pas les performances du matériau en cours de chantier (chapitre 3.4.1.5).

Pour des mélanges de bauge dont la masse volumique* est inférieure à 1400 $kg.m^{-3}$, présentant d'importantes zones de décohésion* (contrôle visuel) ou réalisées avec une terre trop peu argileuse (essais de terrain sur la terre ou un échantillon de bauge), il est nécessaire de réaliser des essais afin d'évaluer la performance mécanique de la bauge sèche.

3.4.2.2 Caractéristiques mécaniques aux états humides

Les performances mécaniques de la bauge aux états humides peuvent être validées par des tests proposés dans le guide (chapitre 3.4.1). Les valeurs indiquées dans le Tableau 4 s'appuient sur les expériences passées et actuelles pour une bauge réalisée dans les règles de l'art. Elles sont également mises en parallèle avec les valeurs obtenues à l'état sec (Tableau 3).

Caractéristiques aux états humides	**Plastique* (3.4.1.1)**	**Ferme (3.4.1.2)**	**Humide (3.4.1.4)**
Masses volumiques maximale	2240 kg/m^3	2000 kg/m^3	1900 kg/m^3
Résistance mécanique*	négligeable	Rd_f : 0,04 MPa*	Rd_h : 0,3 MPa*

Tableau 4 – Caractéristiques de la bauge aux états humides

Rappel : C'est aux états humides que la bauge reçoit l'essentiel de ses chargements (chapitre 3.4.1).

Les masses volumiques et les résistances mécaniques proposées dans le Tableau 4 prennent en compte la teneur en eau* apportée pour le travail de la matière pour des cas défavorables. Ces valeurs peuvent très sensiblement varier d'un mélange à un autre. Elles permettent de dimensionner un ouvrage* en bauge en sécurité. Pour optimiser son dimensionnement, des tests peuvent être menés afin de réduire la masse volumique* maximale et augmenter la résistance à la compression* de calcul.

Aux états humides, la bauge peut accepter des tassements* importants (chapitre 4.2.1.1).

NOTE : La réalisation d'un muret test ou de plusieurs éléments de bauge peuvent permettre d'évaluer les qualités du futur mélange. Il sera pertinent de relever la masse volumique* plastique*, ferme puis sèche (Tableau 3) ainsi que la largeur minimale des levées.

Pour des mélanges de bauge dont la masse volumique* sèche est inférieure à 1400 kg.m^{-3}, présentant d'importantes zones de décohésion* (contrôle visuel) ou réalisés avec une terre trop peu argileuse (essais de terrain sur la terre ou un échantillon de bauge), il est nécessaire de réaliser des essais afin d'évaluer la performance mécanique de la bauge à l'état humide.

3.4.3 Vérification de la portance d'un mur

Une méthode de dimensionnement simple et communément employée consiste à vérifier que l'ensemble des masses mises en jeu pour un projet donné ne génère pas de pression* supérieure à 0,2 MPa* à l'état humide en considérant que celles-ci se répartissent uniformément dans la matière.

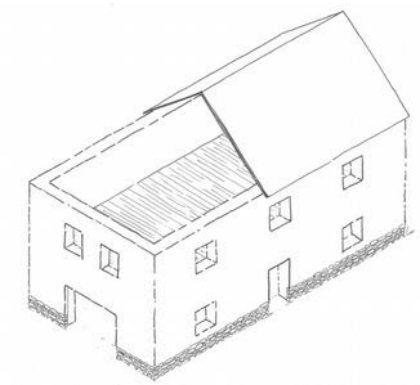
Cette méthode permet une vérification de la résistance en compression* de l'ouvrage* en bauge qui est suffisant dans la plupart des configurations, à savoir :

- des murs d'une épaisseur minimale de 30 cm,
- un bâtiment de moins de 10m de haut,
- des ouvertures représentant moins de 1/3 du mur en surface et distantes d'au moins 1m entre elles et par rapport aux angles,
- à moins de 500 m d'altitude et avec des vents de moins de 150 km/h (charges climatiques inférieures à 160 kg/m²),
- un usage courant (charges d'exploitation inférieures à 150 kg/m²).

Quand celle-ci n'est pas suffisante pour dimensionner ou démontrer la portance d'un mur, alors les valeurs et méthodes décrites au paragraphe précédent seront utilisées pour un dimensionnement plus fin.

Exemple 1: Vérification des masses surfaciques locales

Soit un bâtiment en R+1, c'est-à-dire 6 m de hauteur et de 12 x 6 m d'emprise au sol avec des murs de 50 cm d'épaisseur et 30 % d'ouvertures à partir de 1 m du sol.
Ici nous vérifions les charges à 1m du sol, c'est à dire au niveau des ouvertures, là où les pressions* réparties sont les plus importantes.*



Dans notre cas :

b : épaisseur du mur en bauge = 0.5m
h : hauteur du mur en bauge à prendre en compte= 5m
O : taux d'ouverture à 1m du sol = 30 %
lc/2 : demi porté de la charpente bois = 3m
lp/2 : demi porté du plancher bois = 3m
pc : charges surfaciques de la toiture + charges* climatiques = 250kg/m²*
pp : charges surfaciques du plancher bois + surcharges d'exploitation = 200kg/m²*
γbh : masse volumique de la bauge à l'état humide = 1900 kg/m3*
Gc : charge de la toiture sur le mur gouttereau* = = 750 kg/ml*

Gp : charge du plancher sur le mur gouttereau* = = 600 kg/ml*

Gbh : poids propre du mur de bauge à l'état humide = = 4750 kg/ml

On vérifie l'égalité :
*Rp/h : Résistance de la bauge en prédimensionnement humide= 0,2MPa**

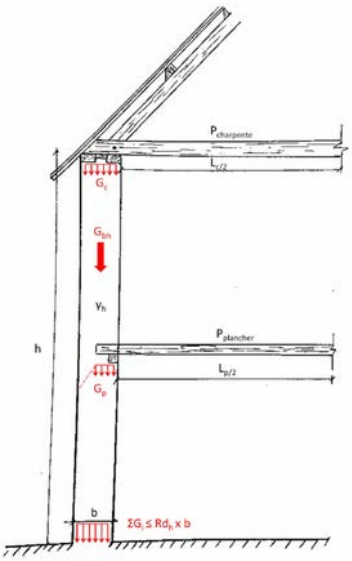


Figure 2: Vérification des masses surfaciques locales

3.4.4 Dimensionnement des surfaces d'appui

Afin d'éviter des désordres, il convient de répartir les charges* des différents éléments en appui sur les murs en bauge. Pour cela, un calcul de pression* peut être réalisé. Ce calcul a pour but de vérifier que la pression* appliquée est inférieure à 0,03 MPa* à l'état ferme (pas encore humide) le stade de séchage le plus souvent atteint au moment de la pose de la toiture, d'un solivage ou autre.

Si la bauge a eu le temps de sécher plus ou si celle-ci semble plus résistante que cette valeur de prédimensionnement, une étude de la résistance réelle de la bauge est nécessaire.

Exemple 2 : Dimensionnement des pièces de répartition

Nous reprenons le bâtiment de l'exemple 1
Dimensionnement des pièces d'appui pour le plancher bois
Pour le plancher bois :Gc = 750 kg par ml
On vérifie l'égalité :
*Rp/f : Résistance de la bauge en prédimensionnement ferme = 0,03MPa**
a : longueur de contact minimal de dissipation : a ≥ = 0,25 m
L'assemblage pourra donc être dimensionné pour obtenir une surface de contact supérieur à 0,25 m² si la toiture est installée à l'état ferme, soit une lisse de 25 cm de largeur.

3.5 Stabilité

La stabilité de l'ouvrage* doit être assurée à tout moment, depuis la phase de construction jusque pendant la phase de déconstruction.

Cette stabilité est donnée notamment par :

- le rapport entre sa hauteur et son emprise au sol,
- les éléments connexes qui viennent la renforcer (planchers, toitures).

Nous considérons qu'en absence de précisions, celui-ci peut être soumis à des efforts latéraux dit courants, qui sont :

- un vent inférieur à 150 km.h^{-1},
- un usage courant : personnes, animaux et objets en appui sur les murs,
- un faux aplomb inférieur à 5 % de l'épaisseur du mur (indépendamment du fruit* potentiel).

Tout comme pour la résistance à la compression*, les règles de dimensionnement ci-après sont valables pour des configurations 'courantes', à savoir :

- des murs d'une épaisseur minimale de 30 cm,
- un bâtiment de moins de 10 m de haut,
- des ouvertures représentant moins de 1/3 du mur en surface et distantes d'au moins 1m entre elles et par rapport aux angles.

Ces règles de dimensionnement ne prennent pas en compte les contraintes sismiques.

3.5.1 Élancement*

Dans les cas décrits ci-dessus, la stabilité d'un élément en bauge peut être donnée par son élancement* λ qui est le rapport entre sa hauteur h et son épaisseur e.

$$\lambda = h / e$$

Il est à noter que l'élancement* peut être calculé en tout point du mur et est alors le rapport entre la hauteur restante de mur au-dessus du point considéré et l'épaisseur du mur à cet endroit. Ainsi, un mur avec du fruit* peut avoir un élancement* constant.

Cet élancement* doit être inférieur ou égal à 5 en tout point du mur.

Dans la mesure où la stabilité est ensuite renforcée par des éléments connexes (planchers, toitures, retour d'angle ou contrefort*, chapitre 3.5.2), l'élancement* peut être porté à 10.

Dans ce cas, plusieurs précautions sont indispensables pendant la phase de construction :

- étayer le mur pour augmenter sa stabilité,
- renforcer la protection à l'eau,
- limiter les accès aux abords du mur afin d'éviter les chocs accidentels.

Exemple 3:

Un mur de 50 cm d'épaisseur et de 2,5 m de hauteur a un élancement de :*

λ = 250 / 50 = 5
Il est donc stable en l'absence de charges latérales particulières.*

Sa stabilité devra cependant être renforcée par une toiture ou un plancher avant son exploitation.

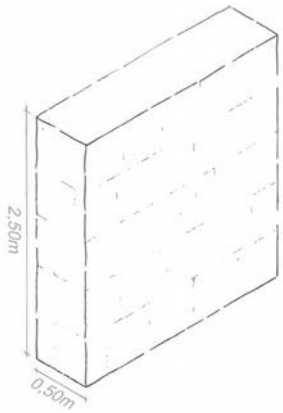


Figure 3: Calcul d'élancement simple

3.5.2 Augmentation de la stabilité par l'emprise au sol

3.5.2.1 Murs de refend*

Dans la mesure où plusieurs murs sont dans des plans différents (mur pignon, mur gouttereau*, mur de refend*) et liés entre eux, ils renforcent mutuellement leur stabilité.
Ce renforcement est d'autant plus important que les murs sont proches :

- Si D ≤ 10e, l'élancement* maximal peut être de 7,
- Si D ≤ 6e, l'élancement* maximal peut être de 10,
- (où D= distance entre murs, e = épaisseur, voir Exemple 4).

Pour pouvoir prendre en compte ce renforcement de stabilité, il est primordial :

- que les ouvertures pratiquées dans le mur soient distantes d'au moins deux fois l'épaisseur de celui-ci,
- de garantir une bonne liaison aux angles entre les murs, voire de le renforcer à l'aide d'agrafes* ou tout autre procédé remplissant la même fonction (chapitre 4.2.1.2).

Exemple 4 :

Si e= 50 cm et D= 4m,

D < 10e (4m < 10×0,5m)

l'élancement peut alors être de 7, soit une hauteur de 3,5 m*

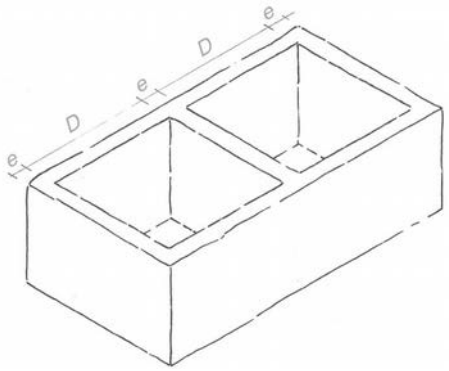


Figure 4: Influence des murs de refend sur la stabilité

3.5.2.2 Contreforts*

Les contreforts* permettent également de renforcer la stabilité.
Ce renforcement dépend de :

- la longueur libre rectiligne, notée D, dans les mêmes proportions que pour les murs de refend*,
- de la longueur des contreforts* ou de la profondeur de la courbure, notée p.

Si la longueur du contrefort* p est d'au moins 2 fois l'épaisseur du mur, nous pouvons considérer que celui-ci joue le même rôle qu'un mur de refend*. Si celui-ci est plus court, le renforcement est proportionnel à la longueur du contrefort* (Tableau 5).

Valeurs de l'élancement* λ maximum :

	p ≥ e	**p ≥ 2e**
D ≤ 6e	λ ≤ 7	λ ≤ 10
D ≤ 10e	λ ≤ 6	λ ≤ 7

Tableau 5 - Influence de l'emprise au sol sur la valeur d'élancement*

Exemple 5 :

Soit un mur :

- de 30 cm d'épaisseur (e = 30cm),

- avec des contreforts espacés de 150 cm (D= 150 cm ≤ 6e)*

- de 30 cm de longueur (p = 30 cm ≥ e)

L'élancement maximum est de 7, c'est à dire une hauteur maximale de 210 cm.*

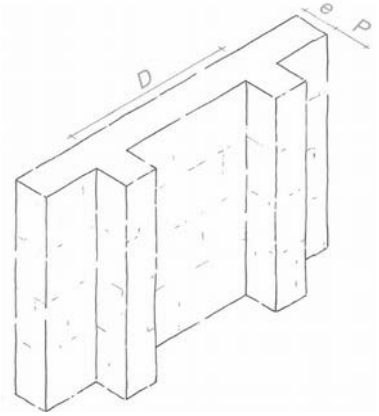


*Figure 5: Contreforts**

3.5.2.3 Courbure

Par extension, la courbure des murs produit les mêmes effets sur la stabilité que les murs de refend* et les contreforts*. Le dimensionnement en est cependant plus délicat.

Nous pouvons cependant considérer que dans le cas d'un bâtiment circulaire, nous pouvons appliquer les règles de dimensionnement du 3.5.2.1 avec D = 2R où R est le rayon de courbure.

Dans le cas du mur courbe seul, une approximation est possible en faisant les calculs sur un mur avec contrefort* délimitant la même surface.

3.5.3 Augmentation de la stabilité par les planchers et toitures

Les planchers et toitures, à partir du moment où ils sont contreventés et solidaires des murs, permettent de transférer les charges* latérales appliquées à un mur aux murs qui lui sont perpendiculaires.

Dans ce cas, ils augmentent la stabilité du mur et l'élancement* maximal du mur est doublé (soit 10 pour un mur simple et jusqu'à 20 pour un mur pignon avec 2 gouttereaux* rapprochés, voir Exemple 6).

Exemple 6 :

Reprenons l'exemple précédent :
e= 50 cm et D= 4m, D ≤ 10e (4m ≤ 10×0,5m)
l'élancement peut alors être de 7 grâce à la présence des murs perp*

Si le bâtiment est surmonté d'une toiture contreventée et en appui su !**
peut être doublé, soit 14.

Les murs peuvent ainsi avoir une hauteur de 7m (haut du pignon)

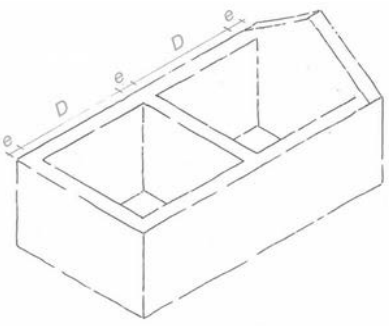


Figure 6: Influence de la toiture sur la stabilité des murs

Pour assurer une bonne liaison entre la toiture ou le plancher et le mur, il est recommandé :

- d'avoir une importante surface de contact entre la toiture ou le plancher et le mur, ce qui permet :
    - de répartir les charges* de celui-ci,
    - transférer les efforts à l'ensemble des murs,
    - augmenter les surfaces de contacts et donc le frottement.
- de charger les pièces d'appui grâce à :
    - la charge* de la toiture notamment dans le cas de charpentes traditionnelles avec couverture en tuiles, ardoises ou chaume,
    - la masse du mur dans le cas des planchers.

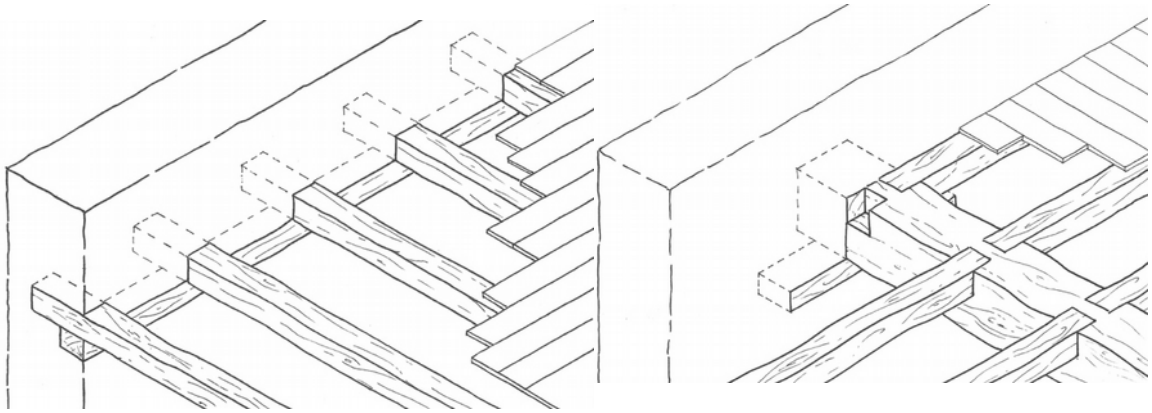


*Figure 7: Exemple de planchers faisant diaphragme**

3.5.4 Résistance aux poussées* latérales

Des éléments extérieurs peuvent exercer des forces latérales qui s'ajoutent aux forces courantes (vent, usages, faux aplomb) :

- les arcs, voûtes et coupoles,
- des usages particuliers,
- un vent supérieur à 150 km/h ou autres aléas climatiques.

Ces poussées* latérales appliquées sur l'élément d'ouvrage* en bauge se combinent avec les descentes de charge* dues notamment à la masse de la bauge et aux éléments d'ouvrage* en appui (toitures, planchers).

Si la résultante des forces est en dehors du tiers central du mur, cela peut créer des contraintes de tractions* qui peuvent être nuisibles à la bonne tenue du mur. Afin d'éviter ce risque, il est recommandé que la résultante des forces exercées sur l'élément d'ouvrage* soit contenue dans le tiers central du mur.

NOTE: Pour limiter ou éviter les risques de basculement, il est possible :

- de reprendre les forces horizontales par des entraits complémentaires ou autre élément travaillant à la traction*, notamment dans le cas des toitures,
- charger le mur au-dessus de la zone d'application des charges* horizontales de manière à ramener la résultante des forces dans le tiers central (cas des arcs, voûtes et coupoles).

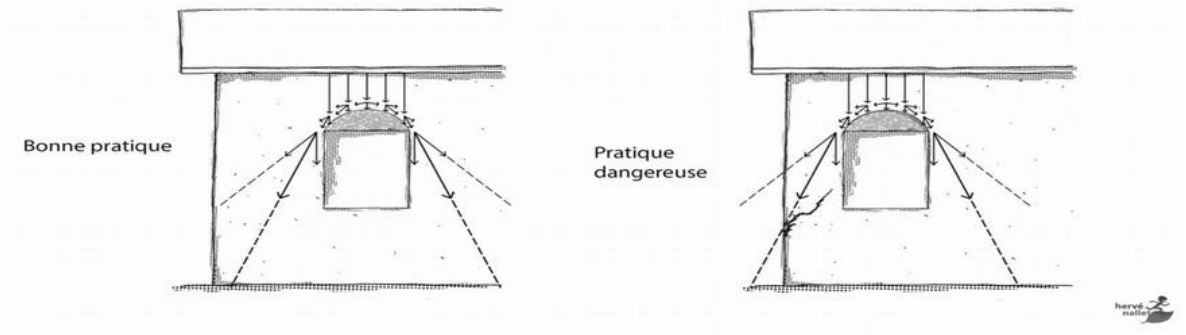


Figure 8 - Incidence du report des charges sur les appuis (jambages) d'une ouverture et positionnement aux angles*

Article 4. Détails techniques

Dans ce chapitre, nous avons rassemblé les détails techniques courants nécessaires à la bonne tenue dans le temps des ouvrages* en bauge. Les solutions proposées dans les figures sont données à titre indicatif et ne sont pas exhaustives.

Sont traités dans l'ordre : la base des murs, les élévations et le sommet des murs, les ouvertures.

4.1 Assise de l'élément d'ouvrage

4.1.1 Contraintes mécaniques*

4.1.1.1 Fondations

La densité* de la bauge sèche est comprise communément entre 1,4 et 1,8 soit 1400 à 1800 kg/ m³ (Tableau 3). Lors de sa mise en œuvre, elle peut parfois atteindre les 2000 kg.m^{-3} avec le poids de l'eau.

Cela doit être anticipé lors du dimensionnement des fondations ou autre élément supportant les éléments en bauge afin d'éviter tout tassement différentiel* qui pourrait entraîner l'apparition de fissures.

4.1.1.2 Surfaces d'appui

Lors de son séchage, la bauge se tasse et a donc un mouvement vertical.

Si la surface sur laquelle le mur s'appuie n'est pas stable et horizontale (soubassement* à redents*, ressaut), le tassement différentiel* peut entraîner une fissuration.

Afin de prévenir ce risque, Il est recommandé de limiter les tassements différentiels* au sein d'un même élément de bauge (mur monolithique).

NOTE 1 : le tassement* d'une levée de bauge est en moyenne de 2%. Il varie en fonction de la granulométrie de la terre, de la proportion de fibres et de la teneur en eau* du mélange mis en œuvre.
NOTE 2 : pour limiter ou éviter les tassements différentiels*, il est possible :

- d'avoir une surface d'appui parfaitement horizontale,
- de prévoir une séparation verticale (joint de rupture) entre les murs au droit de chaque changement de hauteur (chapitre 4.2.1.1),
- de réaliser des mises à niveau avec de la bauge et de laisser celle-ci faire son tassement* avant de continuer à monter le mur. Dans ce cas, des répartiteurs de charge* devront être intégrés au cœur de la levée suivante au-dessus des ruptures du niveau inférieur.

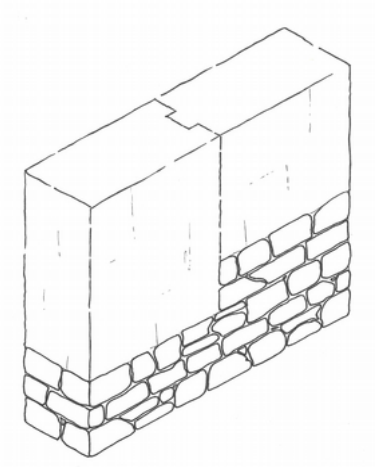


Figure 9: Soubassement en escalier avec séparation entre deux trumeaux* de bauge*

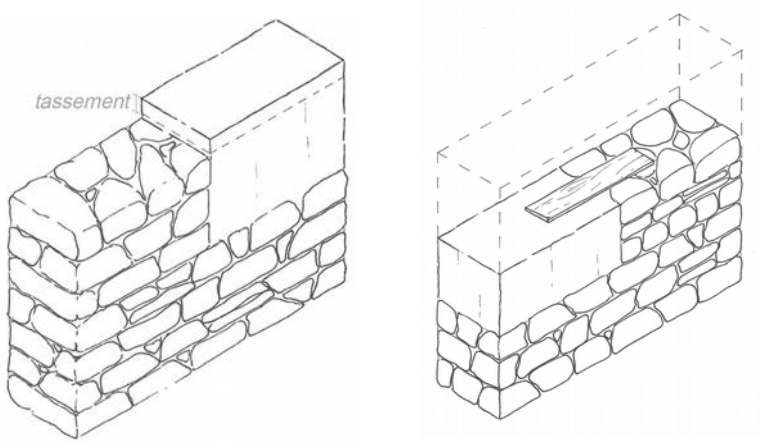


Figure 10: Soubassement en escalier avec bauge pour récupérer les niveaux, en attente de tassement**

4.1.2 Gestion de l'eau

4.1.2.1 Drainages* et abords directs

L'eau présente sous le bâtiment peut :

- s'accumuler dans le sol, ce qui peut altérer la résistance de celui-ci et provoquer des désordres structurels,
- s'évaporer à travers les sols du bâtiment ce qui peut créer un inconfort thermique,
- remonter à travers les murs par capillarité* (chapitre 4.1.2.2).

Ces 3 phénomènes occasionnent des désordres si les quantités d'eau sont importantes. Afin de prévenir ces risques, il est recommandé de limiter les apports d'eau sous le bâtiment.

NOTE 1: Afin de limiter la quantité d'eau sous le bâtiment, il est recommandé :
d'installer un système de drainage* permettant d'éloigner l'eau provenant du ruissellement*,

- d'éloigner les eaux collectées en toitures,
- de traiter les abords du bâtiment avec des revêtements de sol perméables afin de favoriser l'évaporation de l'eau en excès,
- de ménager des pentes aux abords du bâtiment afin d'éloigner les eaux provenant du ruissellement* sur les murs.

Voir des exemples illustratifs en Figure 12 à Figure 15.
NOTE 2 : Dans la mesure du possible, si un drain* doit être posé, il est recommandé de positionner celui-ci à 80 cm au moins des fondations afin de ne pas déstabiliser celles-ci (et au maximum à 1,50 m).

4.1.2.2 Soubassements* et remontées capillaires

L'eau présente dans le sol remonte dans les murs par capillarité* et une partie de cette eau est évacuée par évaporation.

Lorsque les remontées capillaires sont trop importantes, le phénomène d'évaporation n'est pas assez rapide (période hivernale par exemple) et l'eau s'accumule dans le mur entraînant une réduction de résistance de celui-ci.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de limiter les apports d'eau dans la bauge par capillarité*.

NOTE : Pour limiter les remontées capillaires, le soubassement* du mur en bauge peut :

- soit être composé de matériaux non capillaires (béton de ciment suffisamment dosé), (exemple Figure 12)
- soit être séparé de la bauge par une barrière capillaire (membrane bitumineuse, zinc), (exemples Figure 13, Figure 14 et Figure 15)
- soit être d'une hauteur suffisante pour mettre le mur en bauge au-dessus des remontées capillaires. Dans ce cas, le soubassement* doit permettre l'évaporation naturelle de l'humidité. (exemple Figure 11)

En ce sens, aucune barrière étanche à la vapeur d'eau à l'extérieur comme à l'intérieur du bâtiment ne doit être mise en œuvre verticalement contre cette surface (pas d'enduit étanche sur le soubassement*).

4.1.2.3 Rejaillissement*

Dans le cas d'un arrosage (pluie par exemple), l'eau peut rebondir sur le sol et venir percuter le mur au-dessus de la zone de ruissellement*. Cela peut entraîner un ruissellement* sur le mur de bauge, donc une érosion prononcée et une humidification de la terre entraînant un affaiblissement de la résistance du mur. Il est donc recommandé de protéger l'élévation en bauge des rejaillissements* d'eau.

Un risque similaire existe dans le cas d'épisode neigeux pouvant amener une stagnation de neige au contact des murs en bauge. Au moment de la fonte la bauge peut s'imprégner par capillarité*.

NOTE: pour protéger le mur des rejaillissements*, il est possible de :

- traiter la surface horizontale afin de limiter le phénomène de rebond (surface amortissante, pente),
- dimensionner la protection du pied de mur de façon à mettre la partie en bauge hors d'atteinte de l'eau.

Voir des exemples illustratifs en Figure 11 à Figure 15.

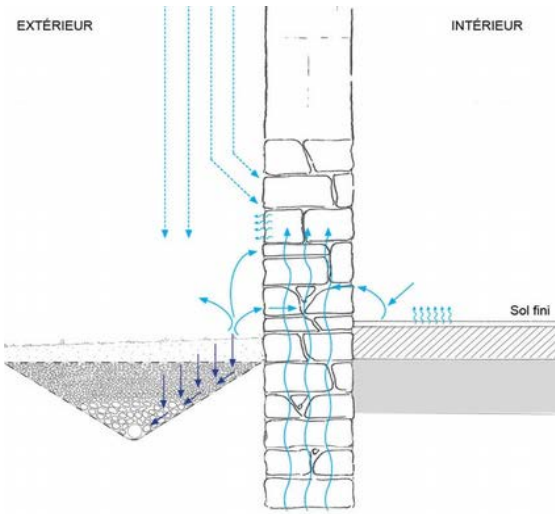


Figure 11: Fondation et soubassement en pierre, sol en terre enherbée en pente (10%) + drain* enterré*

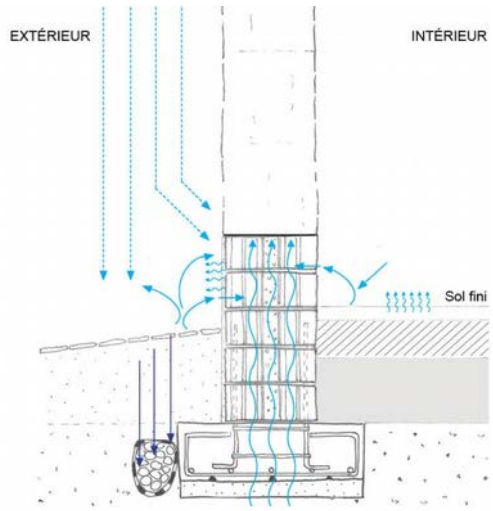


Figure 13: Fondation BA, soubassement en briques isolés, sol en pierre sur sable, géotextile/gravier*

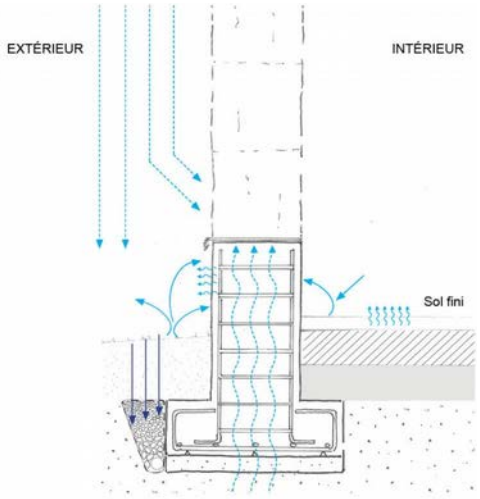


Figure 12: Fondation soubassement BA, sol en terre enherbée, drain* le long des fondations*

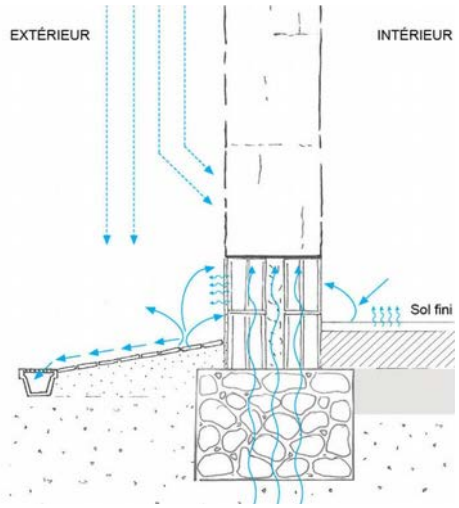


Figure 14: Fondation pierres, soubassement isolant, sol en pierre, canal drainant*

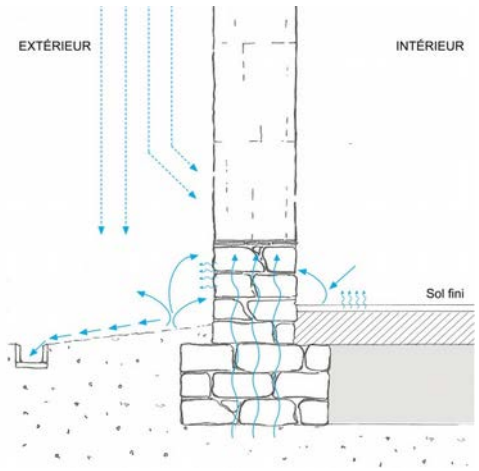


Figure 15: Fondation soubassement pierres, sol enherbé et canal de pierres*

4.1.2.4 Jonction avec un plan incliné

Toute jonction entre le plan vertical d'un mur en bauge et une autre surface horizontale ou inclinée est susceptible de générer un écoulement et/ou une stagnation d'eau (jonctions murs/sols, murs/plancher, plan de travail, balcon, plans de couverture). L'eau présente sur cette surface (eau de pluie, eau de lavage) peut être amenée à ruisseler sur la partie du mur en contact avec le plan.

Ce ruissellement* peut :

- apporter beaucoup d'eau au mur, ce qui fragilise la bauge,
- arracher de la matière lorsque l'eau est en mouvement.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de protéger les murs en contact avec une surface horizontale ou inclinée susceptible de recevoir de l'eau. La hauteur de la garde au sol doit être adaptée aux configurations, mais ne doit pas être inférieure à 5 cm.

NOTE : Pour protéger les murs du ruissellement*, il est possible :

- de bâtir la garde au sol avec un matériau résistant à l'eau : briques cuites, pierres, béton,
- de rapporter une protection (jonction avec un plan de travail) : faïence, terre cuite.

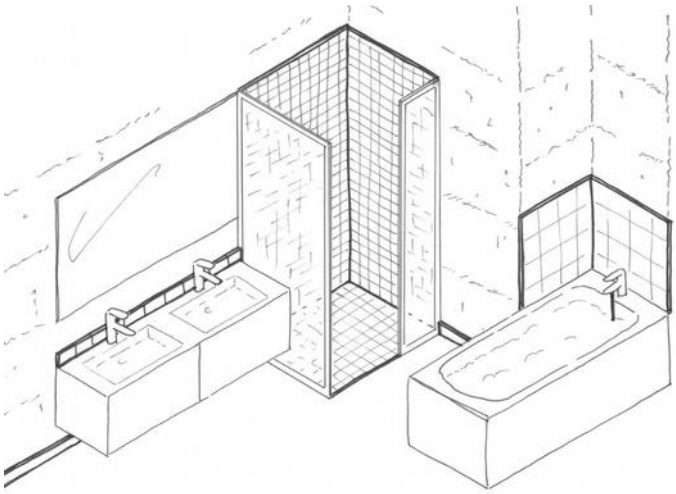


Figure 16: Exemples de protection de jonction entre le mur en bauge et une surface horizontale ou inclinée

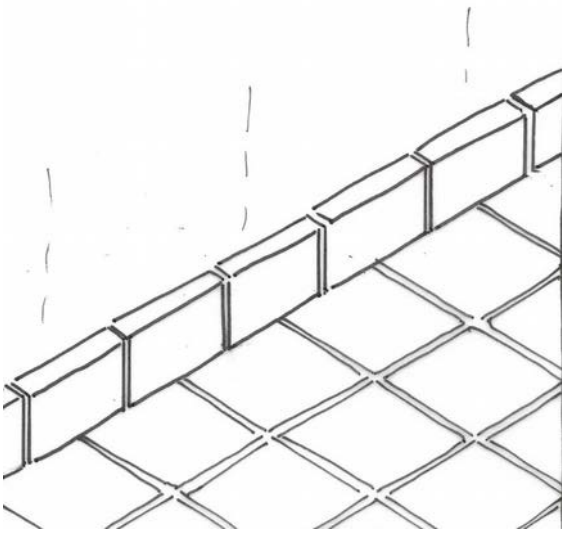


Figure 18: Jonction sol/mur

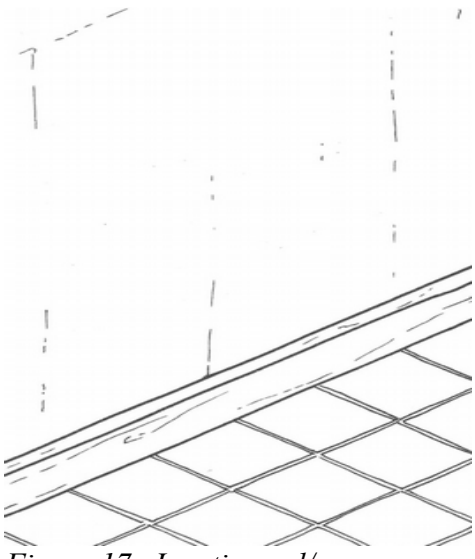


Figure 17: Jonction sol/mur

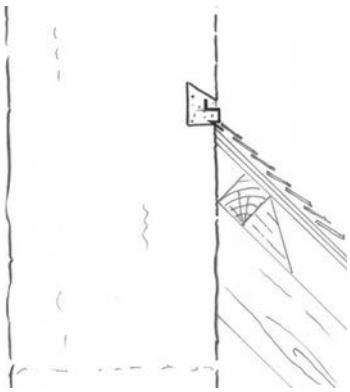


Figure 19 – Jonction Toiture/Mur

4.2 Élévations et hauts de murs

4.2.1 Contraintes mécaniques*

4.2.1.1 Liaisons entre éléments d'ouvrage

La bauge subit lors de son séchage un tassement* vertical.

Si celle-ci est connectée à un autre élément d'ouvrage* via un système de fixation ne permettant pas ces mouvements (chevilles bois verticales, pointes), il y a risque :

- de rupture des fixations,
- de fissuration horizontale de la bauge au niveau des fixations.

De la même manière, deux éléments d'ouvrage* :

- composés de matériaux différents (pierre, bois, autre technique de terre, terre cuite),
- chargés différemment,
- réalisés à des moments différents,
- plus ou moins pleins (présence d'ouvertures),
- sont susceptibles d'avoir des mouvements verticaux différents qui entraîneraient les mêmes pathologies.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de ne pas liaisonner les murs ou de la faire avec des systèmes qui permettent les mouvements verticaux.

NOTE: Pour permettre les mouvements, notamment verticaux, du mur, les liaisons suivantes peuvent être réalisées :

- saignée* verticale dans le mur réalisé en premier permettant à la bauge de venir en incrustation dans le mur.
- fixation d'une pièce de bois verticale sur le premier mur que la bauge va venir entourer,
- fixation horizontale souple permettant un léger mouvement et mise en place après les principaux tassements*. Si la liaison est en métal, il est recommandé d'utiliser un acier galvanisé.

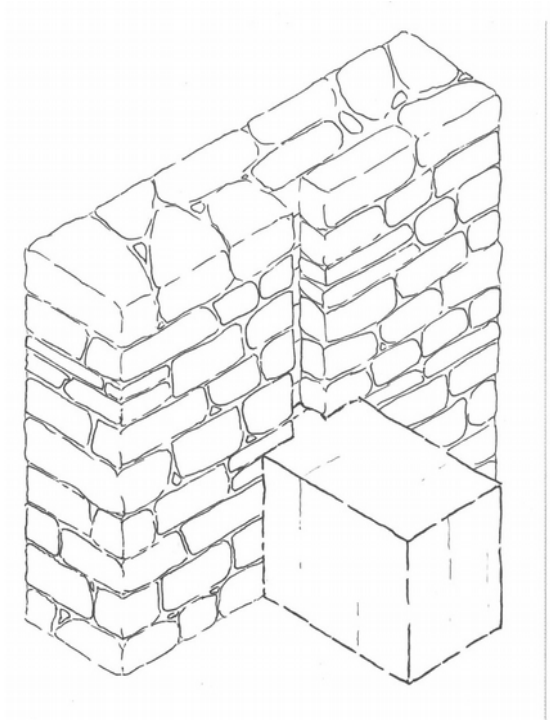


Figure 20: Mur en pierre avec saignées de 5×5 cm ou 10×10 cm dans lequel le mur vient rentrer.*

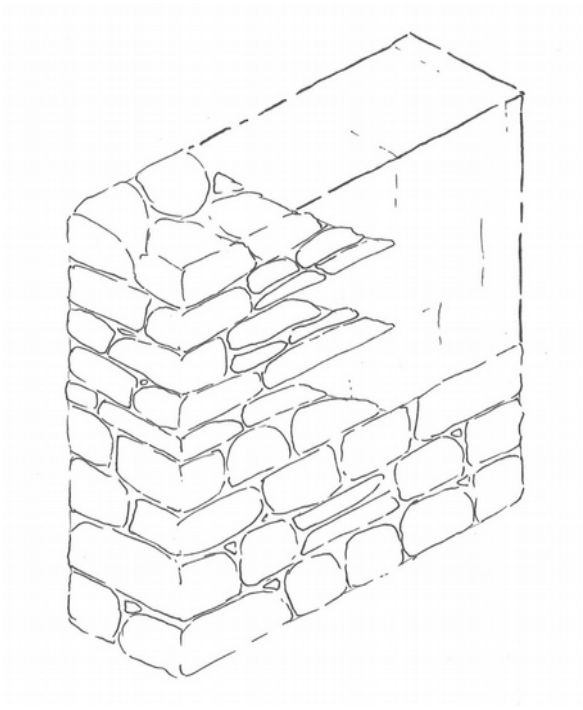


Figure 21: Jonction pierre/bauge

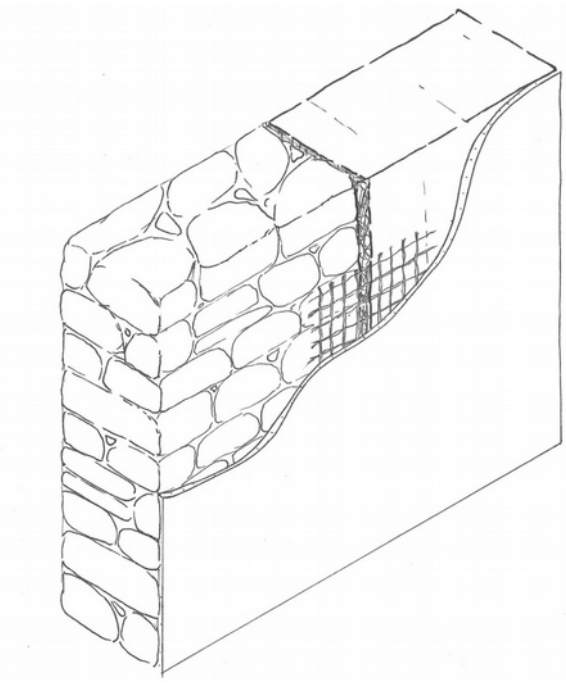


Figure 22: Joint droit et enduit

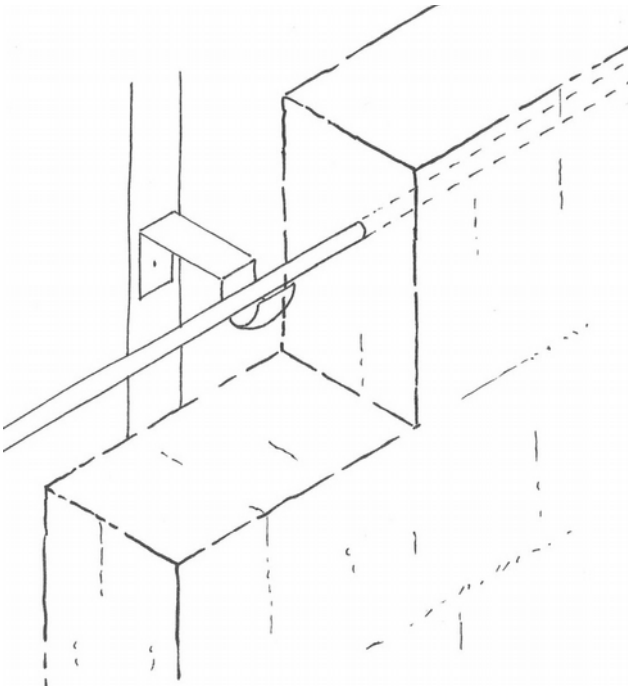


Figure 23: Liaison souple

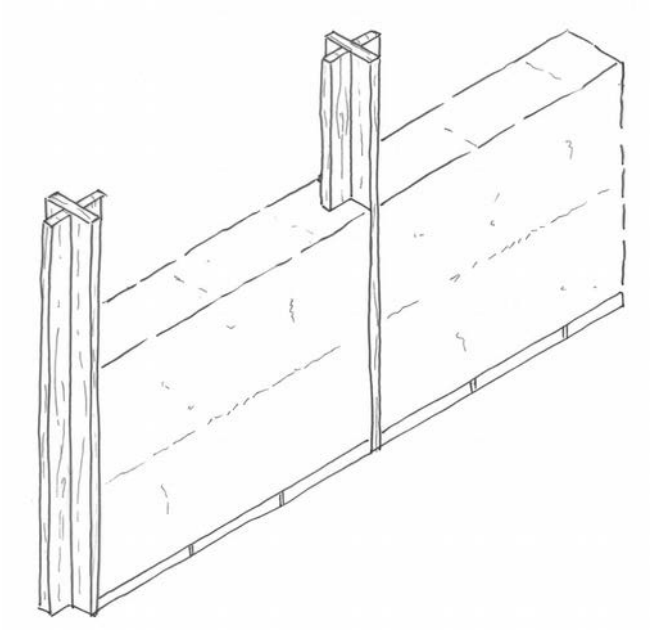


*Figure 24 - Ossature bois en 5*15 cm sur laquelle est fixé un tasseau (3*4cm). La bauge vient en remplissage de l'ossature*

4.2.1.2 Agrafes*

Les angles sont une zone particulièrement sollicitée par :

- d'éventuelles poussées* malencontreuses de toiture,
- des mouvements de basculement d'un mur dus à divers facteurs,
- le renforcement de la stabilité des murs (chapitre 3.5.2).

Il est donc important de garantir une bonne cohésion* entre les deux murs à ce niveau-là.

NOTE : Cette liaison peut être assurée par :

- l'appareillage* des éléments lors de la construction du mur (chapitre 2.4.5),
- l'insertion de fibres longues et résistantes en traction* dans le mur lors de la construction (chapitre 2.5.3),
- l'insertion d'agrafes* à l'intérieur du mur pendant la construction,
- l'ajout d'éléments résistants à la traction* (bois) en haut de mur rendus solidaires de celui-ci par une charge* appliquée (toiture),
- l'ajout d'agrafes* extérieures au mur, notamment en cas de réparations,
- reprise avec des adobes.

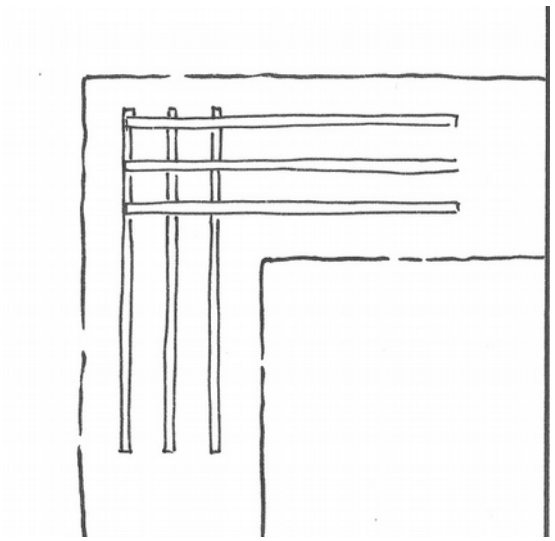


Figure 25: Agrafe en noisetier, roseau, bambou ou osier*

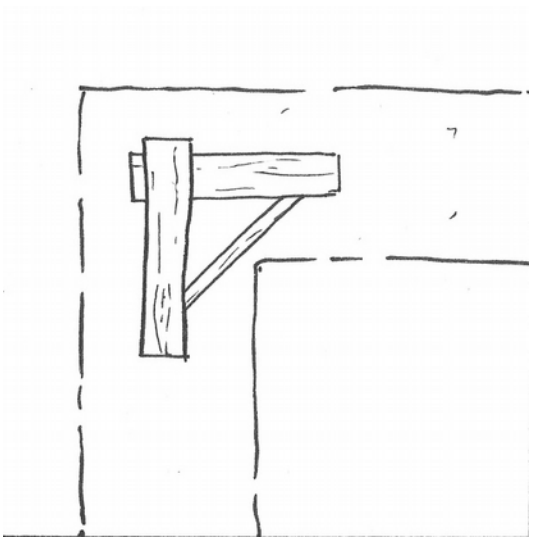


Figure 26: Agrafe en chêne ou châtaigner*

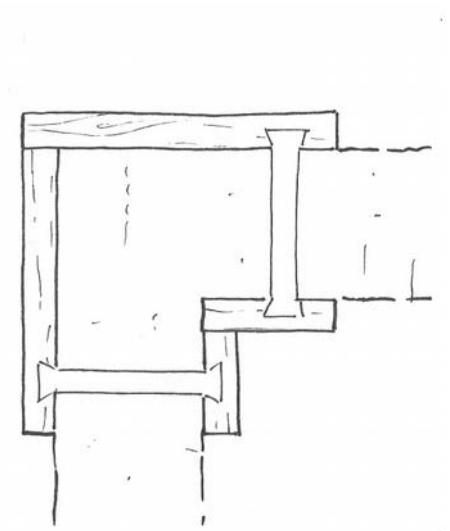


Figure 27: Agrafe extérieure*

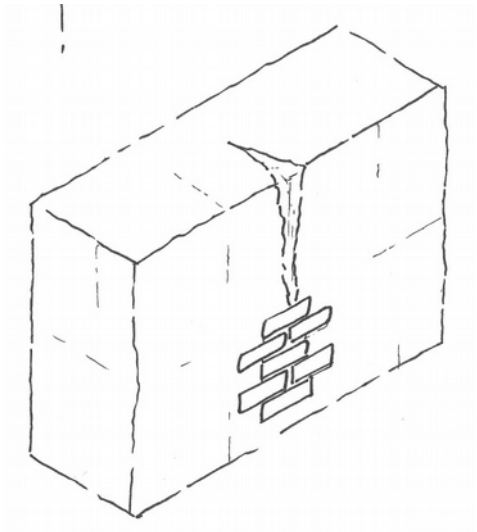


Figure 28: Reprise en adobes

4.2.1.3 Angles

Les angles des murs sont des zones recevant potentiellement des chocs et des contraintes d'arrachement.

La terre ayant une faible résistance à la traction*, ces chocs peuvent entraîner des arrachements et endommager les arêtes.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de ne pas soumettre d'arêtes vives en bauge à des contraintes mécaniques*.

NOTE : Pour ne pas risquer l'endommagement des arêtes de mur, celles-ci peuvent être :

- mises hors d'atteinte des chocs et contraintes potentielles : partie haute des murs,
- d'une forme limitant les risques d'arrachement : arrondi, chanfrein,
- réalisées avec un autre matériau et dans ce cas, il convient d'anticiper les mouvements de tassement* de la bauge au séchage,
- protégées par un autre élément : baguette d'angle, enduit.

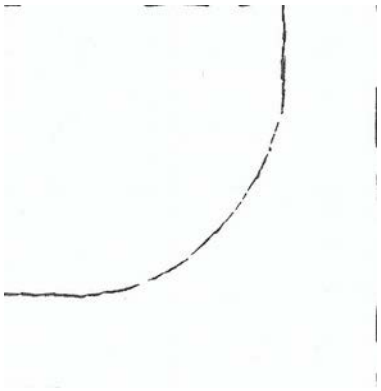


Figure 29: Angle arrondi

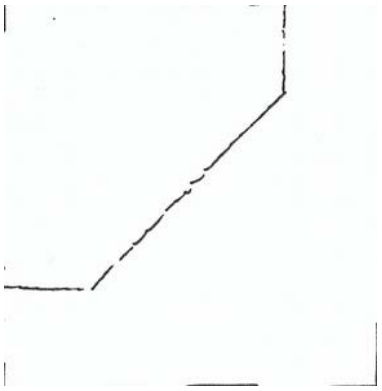


Figure 30: Angle chanfreiné

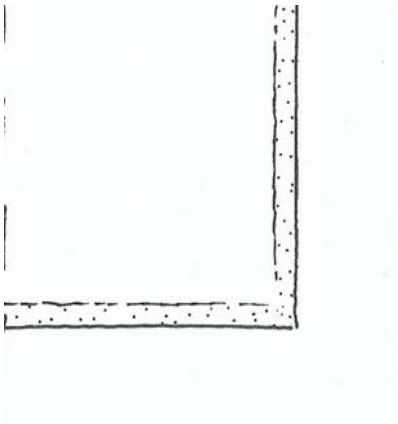


Figure 31: Protection par enduit

4.2.1.4 Application de charges

De nombreux éléments d'ouvrages* peuvent être supportés par les murs en bauge : toiture, planchers, linteaux, poutres, poteau, corbeaux.

Si la surface d'appui de ces éléments est trop faible, il en résulte une forte pression* (rapport charge/surface d'appui) qui peut générer de la fissuration et donc potentiellement une fragilisation du mur.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de limiter la pression* exercée par les pièces en appui à 0,04 MPa* en chargement à l'état ferme et 0,3 MPa* à l'état humide (Tableau 4).

Lorsqu'une charge* est appliquée sur le tiers extérieur d'un mur, elle peut générer sur la partie opposée une contrainte de traction* qui peut fragiliser le mur.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé que la résultante des forces appliquées au mur reste dans le tiers central de celui-ci.

NOTE: Les charges* importantes peuvent être appliquées au mur via des pièces de répartition permettent d'augmenter la surface d'appui et donc diminuer la pression* générée.

Ces pièces seront, dans la mesure du possible, centrées sur le mur afin de conserver la résultante des forces dans le tiers central du mur.

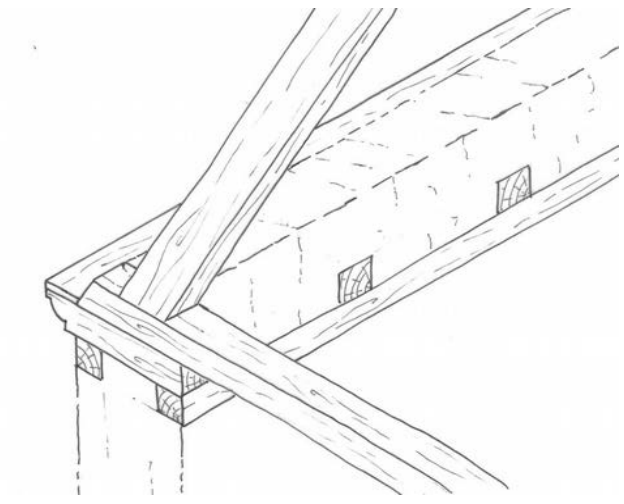


Figure 32: Exemple d'appui de toiture

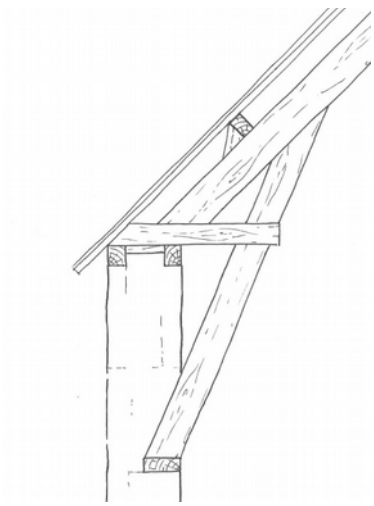


Figure 33: Exemple d'appui de toiture

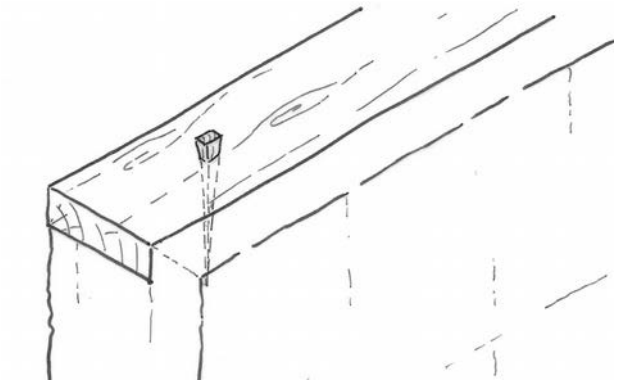


Figure 34: Simple sablière

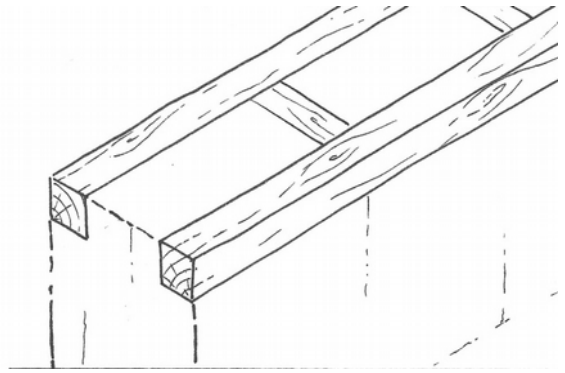


Figure 35: Double sablière ou baltage

4.2.1.5 Fixations

Si une charge* lourde est fixée dans la bauge, celle-ci soumet le mur à des contraintes de traction*/cisaillement*.

Si la charge* est trop lourde, la fixation peut ainsi s'arracher.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé d'adapter le type de fixation à la qualité de la bauge et à la charge, sachant que plus la charge* est importante, plus elle doit solliciter un volume de bauge important.

En cas de doute (charge lourde et bauge fragile), il peut être réalisé un essai de mise en charge* de la fixation.

NOTE: Les objets peuvent être fixés dans la bauge à l'aide :

- de vis à bois entrée directement dans le matériau sans pré-trou ni chevilles dans la mesure où les charges* sont faibles et sans trop serrer,
- d'éléments de meilleure résistance (brique cuite, pierre, bois) inséré dans le mur,
- d'ossatures intégrées dans la bauge,
- de tiges filetées traversant le mur et enserrant celle-ci entre deux pièces permettant un serrage (pièce à fixer d'un côté, plaque ou croix de l'autre).

Il est également possible de poser les éléments au sol ou de les suspendre (chauffe-eau, vaisselier).

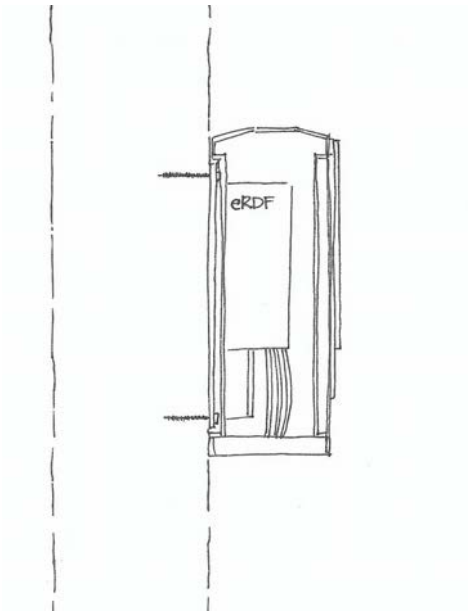


Figure 36: Fixation par vis

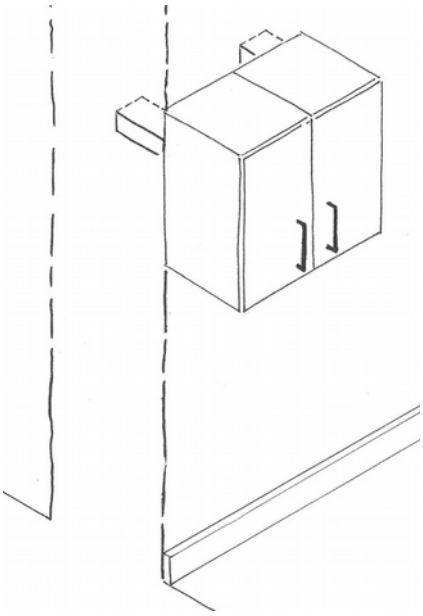


Figure 37: Fixation sur élément rapporté

4.2.2 Gestion de l'eau

4.2.2.1 Accidents de surface

Lorsque le mur est arrose (pluie par exemple), une partie de l'eau est absorbée et le surplus ruisselle sur le mur.

Si plusieurs matériaux sont apparents en surface (pierre et terre par exemple), la plus grande fragilité de la terre est susceptible de générer une érosion de celle-ci et des creux au pourtour des éléments « durs ».

Si il y a un point d'arrêt (surface horizontale ou en pente créée par l'érosion), l'eau stagne à cet endroit et s'accumule, entraînant une dégradation accélérée.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de limiter les accidents de surface (matériaux différents, saillies) sur les murs exposés au ruissellement*.

NOTE : Pour limiter les phénomènes d'érosion concentrée, il est possible :

- de ne pas avoir d'éléments en saillie,
- si plusieurs matériaux sont présents dans le mur, prévoir un débord de la partie en bauge afin que son érosion ne crée pas de surfaces d'arrêt,
- de protéger les pièces incrustées dans le mur par un système de couverture éloignant l'eau du mur,
- de prévoir qu'en cas d'infiltration d'eau, celle-ci ait plutôt tendance à ressortir.

4.2.2.2 Protection des hauts de mur

Les surfaces horizontales ou inclinées soumises aux intempéries sont une source d'infiltration d'eau dans le mur très importante qui ne peut généralement pas être compensée par l'évaporation naturelle du mur sous nos climats.

L'eau s'accumulant dans le mur, le matériau change d'état hydrique et perd ses propriétés mécaniques, ce qui entraîne la destruction du mur.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé de protéger toute surface horizontale ou inclinée par un système de couverture.

4.2.2.3 Protection de la surface du mur

L'arrosage (pluie) d'un mur en bauge peut créer, s'il est important en fréquence et quantité, une érosion de surface. Cette érosion ne revêt généralement qu'un caractère esthétique sauf si le mur est très exposé ou l'élément d'ouvrage* de piètre qualité (terre très peu argileuse, porosité* importante, peu de fibres). Dans ce cas, l'érosion peut devenir suffisamment importante pour générer à moyen terme des désordres structurels.

Afin de prévenir les érosions trop importantes, il est recommandé de limiter les arrosages trop importants et trop fréquents des murs en bauge.

NOTE : pour limiter les arrosages, il est possible de :

- faire déborder les toitures et couvertines suffisamment pour mettre le parement à l'abri des pluies courantes,
- appliquer un traitement de surface auquel cas, se référer aux Règles Professionnelles Enduits sur Supports Composés de Terre Crue,
- installer un bardage, auquel cas, il est important de prévoir une lame d'air entre le mur et le bardage afin d'éviter une condensation et des accumulations d'eau.

4.3 Ouvertures et franchissements*

Les ouvertures concentrent plusieurs contraintes déjà traitées dans les chapitres précédents mais qui sont rassemblées ici pour plus de lisibilité.

4.3.1 Contraintes mécaniques*

4.3.1.1 Franchissement*

Lors de la création d'une ouverture (porte, fenêtre), le franchissement* peut être réalisé à l'aide :

- d’un linteau composé de matériaux travaillant à la flexion comme le bois,
- d’un arc composé de matériaux travaillant à la compression* comme la pierre, la terre crue* ou cuite,

La charge* des éléments supportés par ce franchissement* est alors transférée :

- aux éléments d’appui de l’ouverture via des jambages* maçonnés ou en bois,
- aux murs adjacents

Afin de limiter les risques d'apparition de fissures, voir de plus importantes pathologies, il est recommandé de répartir les charges* afin de respecter les pressions* maximales recommandées pour la bauge (Article 3.).

NOTE : pour limiter la pression*, il est possible :

- d'augmenter la surface d’appui des linteaux afin de répartir suffisamment la charge,
- de mettre en place un arc qui transforme une partie des contraintes verticales en contraintes horizontales qui se répartissent dans le mur adjacent (arc de franchissement*, arc de décharge*, linteau arqué),
- de combiner ces deux dispositifs, le linteau permettant de faciliter la réalisation des huisseries, l'arc permettant de transférer l'essentiel des charges* horizontalement aux murs adjacents, ce qui répartira la contrainte.

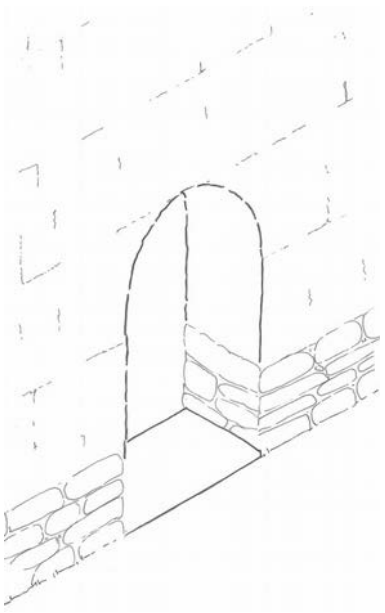


Figure 38: Arc en bauge

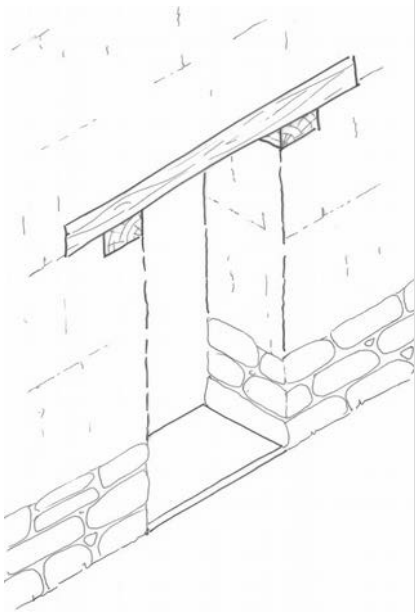


Figure 39: Linteau bois sur sommier

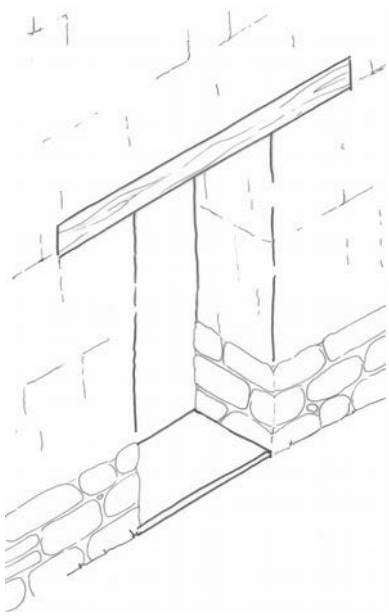


Figure 40: Linteau à large débord

4.3.1.2 Fixation des huisseries

Les portes et les fenêtres étant en mouvement, elles créent des contraintes dynamiques au niveau de la jonction entre les dormants et le mur.

Cela peut créer des fissures au niveau des points d’accroche, voire un arrachement des dormants et une attention particulière doit être portée au mode de fixation de ceux-ci (chapitre 4.2.1.5).

NOTE : pour limiter les risques de fissuration ou d''arrachement, il est possible de fixer les dormants :

- à un précadre rendu solidaire du mur par encastrement,
- à une embrasure composée de matériaux résistants à ces contraintes (pierres, briques cuites),
- à des matériaux résistant à ces contraintes (pierres, briques cuites, bois) noyés dans le mur.
- Le dormant est parfois fixé directement dans la bauge, à ce moment-là, il est fixé sur une feuillure au milieu du mur et les pattes de fixations sont dimensionnées en fonction.

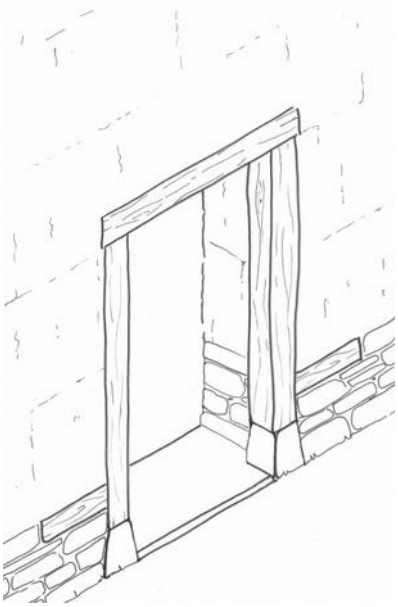


Figure 41: Simple carré en bois

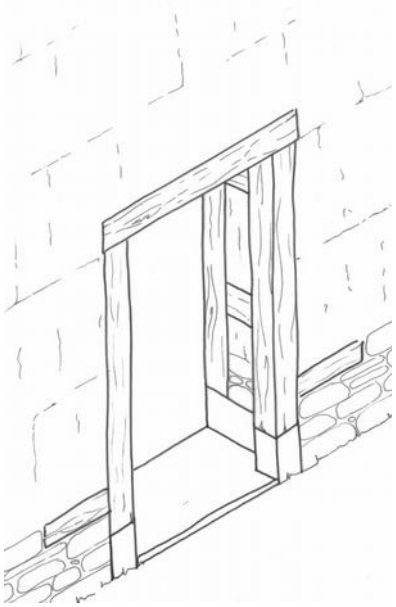


Figure 42: Double carré en bois

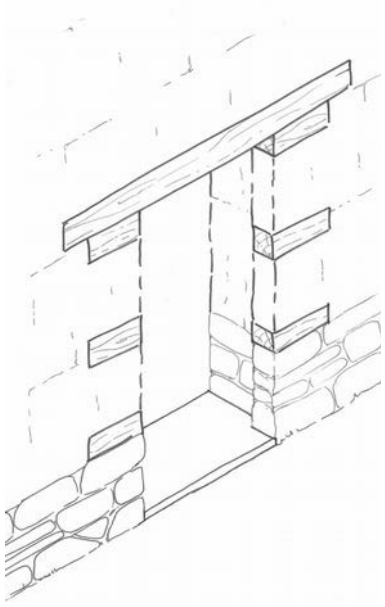


Figure 43: Taquets bois en linteau

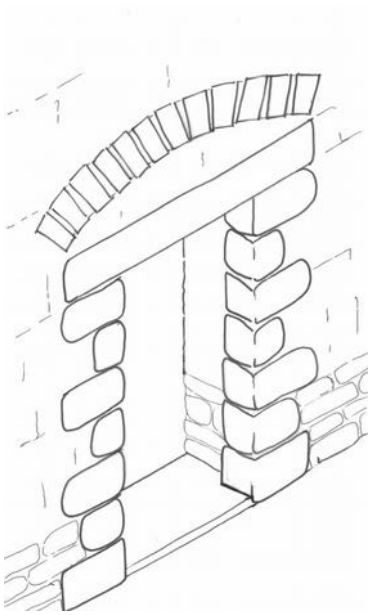


*Figure 44: Encadrement en pierres avec arc de décharge**

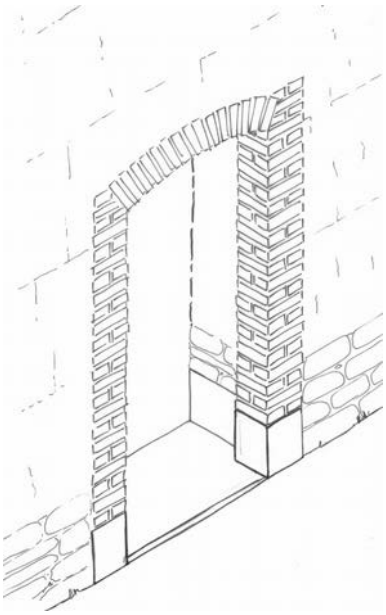


Figure 45: Encadrement en briques

4.3.1.3 Embrasures

Les angles des embrasures sont des zones souvent soumises aux chocs et à l'abrasion mécanique, ce qui peut entraîner des arrachements et érosions.

Il est recommandé, pour les angles d'embrasure comme pour les autres angles de mur en bauge, de suivre les préconisations décrites au 4.2.3 Angles.

Dans le cas où les embrasures sont réalisées avec un matériau différent de la bauge, il est important d'anticiper les mouvements de tassement*/retrait* de la bauge via la conception de la jonction entre les jambages* et le linteau et l'appui.

NOTE : la liaison entre le linteau et les jambages* peut par exemple avoir un jeu vertical provisoire.

4.3.2 Gestion de l'eau

4.3.2.1 Appui de baie*

L'appui de baie* concentre toute l'eau reçue par la surface de la baie qui peut ensuite se déverser dans le mur :

- sous l'appui proprement dit
- au niveau de la jonction avec les jambages* ou l'embrasure

La quantité d'eau reçue peut alors entraîner de l'érosion sous l'appui, voire des accumulations d'eau dans le mur entraînant une perte de cohésion* de la matière.

Afin de prévenir ce risque, il est recommandé d'éloigner la majeure partie de l'eau loin de l'élément en bauge (chapitre 4.2.2.2).

NOTE: pour limiter les apports d'eau, il est possible de :

- conduire l'eau loin de l'embrasure ou des jambages* via une pente et/ou protéger ceux-ci des infiltrations,
- évacuer l'eau loin du mur grâce au nez d'appui et au larmier qui seront à une distance suffisante en fonction de l'exposition du mur.

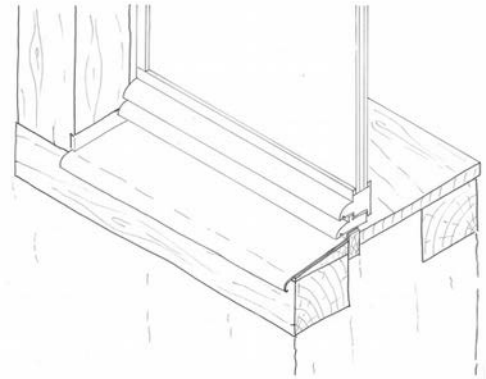


Figure 46: Appui bois avec protection zinc

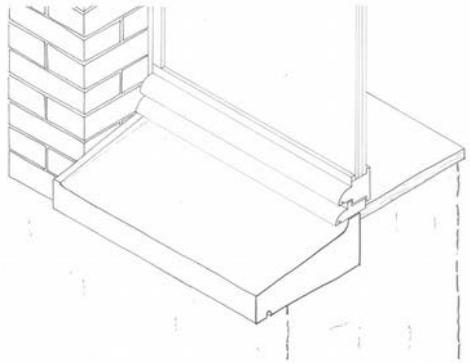


Figure 47: Appui béton armé

4.3.2.2 Jonction jambages*, linteaux, arcs

Les jambages*, linteaux et arcs sont généralement réalisés dans un matériau autre que la terre crue*. Ils peuvent ainsi créer des reliefs favorisant la stagnation ou l'infiltration d'eau et créer de l'érosion (chapitre 4.3.2).

NOTE: pour limiter les risques d'érosion différentielle et d'accumulation d'eau, il est possible, pour les murs exposés de façon importante aux intempéries, de prévoir une protection (bavette zinc, ardoises) pour les linteaux et autres pièces permettant d'empêcher l'eau de pénétrer dans le mur.

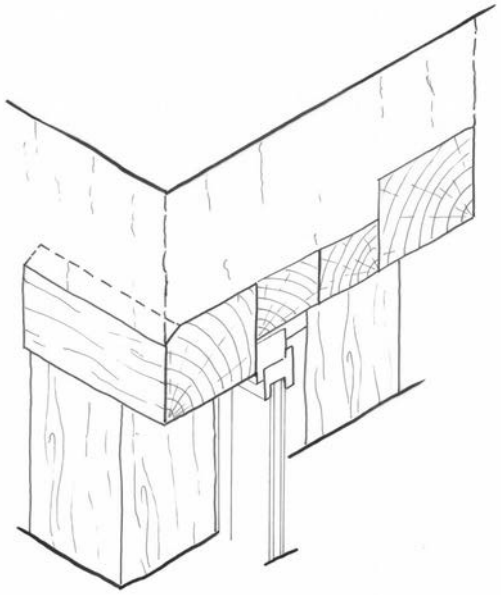


Figure 48: Linteau bois avec chanfrein pour éviter les stagnations d'eau

Bibliographie

Casaux, F., Marcom, A., Meunier, N., & Morel, J.-C. (2013). *Règles professionelles - Enduits sur support composés de terre crue (French code of practice for plasters for earthen walls)*. (C. de Gramont, T. Kremer, & E. Guillier, Eds.) (Le Moniteu). Paris (France): réseau Ecobatir, FFB, SCOP BTP, ENTPE.

Bardel, P., & Maillard, J.-L. (2010). *Architecture de terre en Ille-et-Vilaine* (Apogée, Ec). Rennes (France).

Courgey, S., & Oliva, J.-P. (2010). *L'isolation thermique écologique : Conception, matériaux, mise en oeuvre*. Terre Vivante.

Evans, I., Smith, M. G., & Smiley, L. (2002). *The Hand-Sculpted House, A Practical and Philosophical Guide to Building a Cob Cottage*. White River Junction, Vermont (USA): Chelsea Green Publishing Company.

Guillaud, H., de Chazelles, C.-A., & Klein, A. (Eds.). (2007). Echanges transdisciplimaires sur les constructions en terre crue. 2, les constructions en terre massives pisé et bauge (p. 328). Editions de l'Esperou.

Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., & Morel, J.-C. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment*, *106*, 103–119. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009

Le Boeuf, F. (2004). Maison de terre et de roseau. In C. Vital & D. Milcent (Eds.), *Terres d'architecture - Regard sur les bourrines du marais de Monts* (pp. 39–51). La Barre-de-Monts (France): Ecomusée du marais Breton Vendéen.

Lebas, P., Lacheray, C., Pontvianne, C., Savary, X., Schmidt, P., & Streiff, F. (2007). *La terre crue en Basse-Normandie, De la matière à la manière de bâtir* (Centre Rég). Caen (France).

Patte, E. (2009). *Architectures en terre, marais du Cotentin et du Bessin* (Images du). Inventaire général du patrimoine culturel, Région Basse-Normandie.

Patte, E., & Streiff, F. (2006). L'architecture en bauge. In *Cob building in Europe* (p. 315). Isigny-sur-Mer: Parc Naturel Régional des marais du Cotentin et du Bessin.

RFCP. (2014). *Règles Professionnelles De Construction En Paille - Remplissage Isolant Et Support D'enduit* (Le Moniteur).

Röhlen, U., & Ziegert, C. (2013). *Construire en terre crue - Construction - Rénovation - Finition*. (C. Lefèvre, Ed.). Paris: Le Moniteur.

Saxton, R. H. (1995). The performance of cob as a building material. *The Structural Engineer*, *73*(7), 111–115.

Vinceslas, T., Hamard, E., Razakamanantsoa, A., & Bendahmane, F. (2018). Further Development of a Laboratory Procedure to Assess the Mechanical Performance of Cob. *Environmental Geotechnics*, 1–31. https://doi.org/10.1680/jenge.17.00056

Weismann, A., & Bryce, K. (2010). *Construire en terre facilement - La technique du cob*. (Y. Saint-Jours, Ed.) (La Plage). Sète.

Ziegert, C. (2003). *Lehmwellerbau : Konstruktion, Schäden und Sanierung*. Berlin Technische Universitat.

Glossaire de la construction en terre crue

Absorption : Pénétration de liquide ou de gaz dans un organisme à travers une paroi perméable pour eux.

ACSCNI (Analyse et Caractérisation des Systèmes Constructifs Non Industrialisés) : Projet réalisé en 2004, visant à valider et valoriser les systèmes constructifs utilisant des matières premières et des processus hétérogènes et pour lesquels les savoir-faire sont déterminants pour la performance finale des éléments construits. Un des enjeux de ce projet était aussi de formaliser le passage du savoir-faire de l'oral à l'écrit. *Le pilotage du projet était assuré par le CSTB avec Construire en Chanvre, Craterre, ENTPE, CAPEB et Réseau Ecobâtir.*

Adjuvant : Produit ajouté en petite quantité pour modifier certaines caractéristiques d'un matériau.

Agrafe : Élément de fixation, scellement ou assemblage, de formes diverses, scellé entre deux éléments de mur pour les solidariser.

Antifrettage : Procédé qui consiste à supprimer les composantes horizontales dues au frottement lors de l'application d'une charge sur un échantillon.

Appareillage : Action ou manière de disposer les éléments de maçonnerie dans le mur.

Appui (de baie) : Partie horizontale qui forme la partie inférieure d'une ouverture.

Arase : En maçonnerie, face supérieure d'une paroi correctement mise de niveau. L'arase peut être horizontale ou inclinée, mais définie par un plan unique.

Arc de décharge : Disposition de maçonnerie en forme d'arc placée dans un mur au-dessus d'un linteau pour le soulager par report d'une partie des charges vers les appuis latéraux.

Argile (voir terre) : Composant de la terre structuré en feuillets et de dimension inférieure à 0,002 mm qui confère au matériau ses propriétés de cohésion et de plasticité. Élément le plus fin des granulats contenus dans la terre.

Avis technique : Certifie l'aptitude d'un produit à l'usage pour des ouvrages réalisés avec des procédés innovants, donc normalement non couvert par une norme ou un DTU.

Banchée : Volume de matière contenu d'entre les parois d'un coffrage. Une banchée est réalisée d'un seul tenant (sans décoffrage intermédiaire).

Barbotine : Terre délayée dans de l'eau et malaxée. Sa consistance peut varier de l'état visqueux à liquide.

Capacité hygroscopique : Capacité à absorber le surplus de vapeur d'eau quand l'air est trop humide et à le restituer lorsque l'air s'assèche.

Capacité thermique : Grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à stocker la chaleur. La capacité thermique s'exprime en J/K.

Capacité thermique massique ou Chaleur spécifique : Caractéristique thermique d'un matériau correspondant à la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'un gramme de ce matériau. La chaleur spécifique, symbole C, s'exprime en J/kg.K.

Capacité thermique volumique : Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'un mètre cube d'un matériau ; s'exprime en $J/m^{-3}.K$.

Capillarité : Phénomène physique résultant des effets de la tension superficielle à l'interface air-liquide au contact d'une paroi et conduisant à l'ascension capillaire. On parle de « remontées d'humidité par capillarité »

Chaînage : Action de chaîner. Renfort continu ayant une bonne résistance à la traction, obtenu à l'aide d'un matériau résistant à la traction (barres ou tirants en métal, bois...) ou parfois simplement par harpage, afin de rendre plus rigide une construction en maçonnerie. Il est ici horizontal (ceinture au niveau des planchers ou de la toiture). Un chaînage, ou plus anciennement une chaîne, désignait à l'origine les chaînes que l'on disposait dans les maçonneries pour en accroître la résistance aux efforts de traction; un appareil intérieur donc, en bois ou en fer.

Charge : Force qu'exerce la pesanteur d'un élément d'ouvrage sur ses points d'appui.

Charge (granulaire) : Terme parfois utilisé pour désigner un granulat.

Cisaillement : Effort latéral qui s'exerce dans le plan d'adhérence de deux éléments et qui tend à les désolidariser.

Coefficient d'absorption d'eau : Rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.

Coffrage : Enveloppe de forme stable réalisée pour maintenir le matériau dans un espace délimité le temps de sa mise en œuvre par tassage, compression, façonnage, etc. Il doit en particulier résister à la pression. Le coffrage se différencie du moule dont la forme et l'élaboration des parements sont plus complexes.

Coffrage perdu : Coffrage définitivement inclus dans la construction.

Cohésion : Force qui unit les éléments constitutifs de la terre et contribue ainsi aux caractéristiques mécaniques de l'élément d'ouvrages.

Compactage : Opération consistant à réduire le volume de la terre et ainsi augmenter sa densité par l'application d'une pression mécanique et/ou une vibration.

Compression : État de contrainte provoqué par une action mécanique unidirectionnelle (effort) qui tend à réduire le volume de matériau sur lequel elle s'applique. S'oppose à la traction.

Conductivité thermique : Grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Symbolisée généralement par le coefficient λ, elle s'exprime en watt par mètre-kelvin, $\lambda = W.m^{-1}.K^{-1}$.

Contrainte (mécanique) : Grandeur physique égale à une intensité de force par unité de surface de solide sur laquelle elle s'applique. L'unité couramment utilisée est le Méga Pascal (MPa).

Contrefort : Pilier massif adossé à un mur ou surépaisseur ponctuelle du mur permettant d'en renforcer la stabilité et de reprendre certaines poussées latérales.

Contreventement : Dispositif d'éléments de *structure* (contrefiches, croix de St André ou palées, parois) permettant à un ouvrage de résister aux actions horizontales ou obliques (notamment du vent et des séismes) avec des déformations restant admissibles.

Contreventer : Établir un contreventement.

Dégraissant : Agrégat minéral ou organique pouvant « corriger » une terre trop argileuse. Le dégraissage d'une terre trop argileuse assure une meilleure malléabilité du mélange et la limitation des fissurations de retrait lors du séchage.

Dégraisser une terre : Diminuer la fraction argileuse par l'ajout de composants inertes.

Densité (voir aussi Masse volumique) : Rapport de la masse d'un certain volume d'un corps (terre, fibres, …) à celle de l'eau. La densité s'exprime sans unité.

Désagrégation : Destruction de la cohésion des agglomérats, des mottes de terre ou du pisé. Ceci peut se faire manuellement ou naturellement par gel/dégel.

Désorption : La désorption est la transformation inverse de la sorption (adsorption ou absorption), par laquelle les molécules d'eau absorbées quittent le matériau.

Diaphragme : Élément de *structure* horizontal ayant une rigidité suffisamment importante pour pouvoir être considéré comme indéformable dans son plan et capable de redistribuer les actions horizontales aux éléments verticaux d'un ouvrages.

Diffusivité thermique : Aptitude à transmettre plus ou moins rapidement une variation de température. Physiquement, la diffusivité thermique exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Par conséquent, plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible et plus la chaleur met de temps à le traverser. La diffusivité thermique, de symbole D, s'exprime en m^2/s.

DPM (Documents Particuliers du Marché) : Les DPM, entre autres le CCTP Cahier des Clauses Techniques Particulières, décrivent ce qui ne relève pas des NF DTU.

DTU (document technique unifié) : Un NF DTU est un document normalisé de clauses techniques types qui peut servir à préciser le contrat de mission entre le maitre d'ouvrage et la personne responsable de la mise en œuvre, et sur lequel le prescripteur peut s'appuyer pour définir les clauses techniques types. Les DTU relèvent du droit commercial qui régit le contrat librement établi entre parties. Ils ne sont pas obligatoires et ne font pas partie de la réglementation technique française du bâtiment. À la différence des règles professionnelles qui s'imposent à l'ensemble de la profession.

Drain, drainage : Dispositif de collecte et d'évacuation des eaux d'infiltration.

Ductilité : Capacité d'un matériau à s'allonger sans se rompre.

Durabilité du bois : Résistance du bois -et des matériaux cellulosiques- aux agents de dégradation biologique.

Dureté : Aptitude d'un matériau à résister aux contraintes d'écrasement et de poinçonnement.

Effet de voûte : Création naturelle d'une arche à l'intérieur de la matière par assemblage de grains d'une roche meuble ; des contraintes internes répartissent le poids d'une couche de milieu granulaire sur les côtés plutôt que sur la couche immédiatement en dessous : une partie des forces de compression devient des poussées latérales. *Voir arc de décharge.*

Effusivité thermique : Capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Plus l'effusivité est grande, moins le matériau se réchauffe rapidement. L'effusivité thermique, de symbole E, s'exprime en $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$.

Élancement : Une pièce est dite élancée quand une de ses dimensions est très grande par rapport aux autres. Dans ce guide, l'élancement d'un mur est défini comme étant le rapport entre sa hauteur et son épaisseur = hauteur en mètre / épaisseur en mètre.

Engravure : Entaille faite dans une maçonnerie.

État limite : Dans le calcul des *structure*s, état au-delà duquel une *structure* ne satisfait plus aux exigences de performance pour lesquelles elle a été conçue.

Flambage ou flambement : Déformation, par instabilité élastique, d'un élément de *structure* comprimé trop élancé soumis à une force de compression excessive ou dont l'application est décentrée. Cas des poteaux, des murs, des éléments de charpente, mais aussi des poutres ou planchers comprimés dans leur plan (jeu périmétrique insuffisant pour absorber les variations hygrométriques notamment).

Franchissement : Moyen permettant de maintenir une charge (mur, toiture) au-dessus du vide créé entre deux éléments d'ouvrages.

Frettage : Intervention qui consiste à consolider la résistance en compression d'un élément en l'encerclant d'une ceinture métallique (une frette), pour bloquer les déformations transversales.

Fruit : Inclinaison d'un mur dont l'épaisseur décroît de sa base vers son faîte.

Gouttereau : Se dit du mur sur lequel s'appuie la base de l'égout d'un toit, avec ou sans gouttière ou chéneau. Les murs gouttereaux s'opposent aux murs pignons.

Granulat : Composant inerte de la terre de dimension supérieure à 0,02 mm, c'est-à-dire les sables et les graviers.

Harpage : Action de renforcer un mur par le croisement des blocs qui le constitue, notamment en angle pour la jonction entre deux murs.

Hourdis : Désigne tout remplissage comblant les vides entre les pièces d'une ossature ou les solives d'un plancher. Les *torchis*, les terres allégées, la bauge, le pisé, voire les briques de terre, permettent ce type de remplissage.

Hygrométrie : Quantité relative d'eau sous forme gazeuse présente dans un gaz.

Hygrothermie : Caractérise la température et le taux d'humidité de l'air ambiant d'un local.

Inertie thermique : Prédisposition d'un matériau à garder longtemps sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de son équilibre thermique ; capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Elle est évaluée à l'aide des deux paramètres suivants : la diffusivité et l'effusivité. L'inertie thermique, de symbole I, s'exprime en watt heure par m^2 Kelvin, $I= W.h.m^{-2}.K^{-1}$.

Jambage ou piédroit : Partie latérale verticale qui borde une ouverture de part et d'autre.

Liant : Permet l'enrobage de tous les composants et assure la cohésion. Les argiles constituent les principaux liants de la terre à bâtir.

Lindier : Pièce de répartition de charge en bois.

Loi de masse : Loi à laquelle obéit la valeur d'isolement acoustique d'une paroi en fonction de sa masse surfacique : l'énergie transmise est inversement proportionnelle au carré de la masse. Il résulte de cette loi, dite aussi loi de Berger, que l'indice d'affaiblissement acoustique brut d'une paroi augmente de 6 dB par doublement de la masse (si on double l'épaisseur, on double la masse surfacique de paroi) ou, pour un matériau homogène, par doublement de l'épaisseur.

Masse volumique (voir densité) : Masse de l'unité de volume. De symbole ρ, elle s'exprime en $kg.m^{-3}$.

MPa, Méga Pascal : Unité de mesure d'une pression ou d'une contrainte : 1MPa = 10,2 $kg.cm^{-2}$.

Modénature : Distribution et proportions des éléments caractérisant une façade. Traitement ornemental de certains éléments *structure*ls d'un édifice pour en exprimer la plastique. (La modénature est obtenue par un travail en creux ou en relief, continu [moulures] ou répétitif [modillons, bossages, caissons, etc.].).

Module d'élasticité : Valeur caractérisant le comportement élastique d'un matériau et correspondant au coefficient de proportionnalité entre la variation de contrainte appliquée et la variation de déformation observée.

Muralière : Poutre ou lambourde scellée ou posée sur des corbeaux le long d'un mur.

NF-EN-DTU : Norme française, résumée en DTU, documents techniques unifiés.

Norme : Règle fixant les conditions de la réalisation d'une opération, de l'exécution d'un objet ou de l'élaboration d'un produit dont on veut unifier l'emploi ou assurer l'interchangeabilité. L'association française de normalisation (AFNOR) joue un rôle central et délègue à des bureaux de normalisation sectoriels (BNS) l'élaboration de projets confiés à des commissions de normalisation.

(Les travaux de normalisation internationale sont menés par l'Organisation internationale de normalisation *[International Organization for Standardization],* conventionnellement appelée ISO, qui publie des normes internationales destinées à harmoniser entre elles les normes nationales. Il existe aussi un Comité européen de normalisation [CEN]).

Normatif : Un document normatif « donne des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats ». Il n'a donc pas la même portée qu'une norme, ni la même approbation, mais il peut devenir « norme ».

Opus spicatum : Appareil fait d'éléments de maçonnerie disposés en épi.

Ouvrage : En maçonnerie, mur ou ensemble de murs.

Perméabilité à la vapeur d'eau : Aptitude d'un matériau à se laisser traverser par la vapeur d'eau. La perméabilité à la vapeur d'eau, est représentée par la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur par unité de temps et de différence de pression de vapeur de part et d'autre du matériau. Plus la perméabilité d'un matériau est élevée, plus le matériau est apte à laisser la vapeur d'eau passer librement. Symbolisée par le coefficient π ou δ, elle s'exprime en gramme par mètre par seconde et par millimètre de mercure $\delta = g.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}$ ou g/s·m·Pa.

Perméant : Laisse facilement passer la vapeur d'eau.

Perspiration : Élimination de la vapeur d'eau par évaporation en surface.

Pinoches : Pièces de bois permettant de renforcer la liaison entre les parties anciennes et nouvelles en restauration.

Plasticité : Capacité de la matière à être à l'état plastique, c'est à dire déformable avec persistance de la forme crée. Cette plasticité peut être quantifiée par l'Indice de Plasticité (IP) qui est l'écart de teneur en eau entre l'état plastique et l'état liquide ($IP = W_L – W_P$, voir état plastique).

Plastique (état) : État de la matière permettant les déformations sans rupture et conservant la forme ainsi obtenue. Les frontières de cet état hydrique sont également définies par les limites d'Atterberg de plasticité (W_P) et de liquidité (W_L) qui correspondent à des essais de laboratoire permettant de définir les teneurs en eau (en % massique) de ces deux limites.

Plastique ferme (état) : État dans lequel la matière est déformable donc plastique mais avec l'apparition de fissures. La teneur en eau est tout juste suffisante pour être plastique et non compressible et donc proche de la limite de plasticité W_P (voir état plastique).

Plastique mou (état) : État dans lequel la matière est déformable mais où la forme se tient mal et a tendance à52 s'affaisser. La teneur en eau est maximale avant de basculer à l'état visqueux où la forme ne se tient plus et donc proche de la limite de liquidité W_L (voir état plastique).

Point de rosée : Température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il ne se produise une formation d'eau liquide par saturation. Par extension, endroit où a lieu la condensation d'eau par diminution de température. Point de saturation en vapeur d'eau.

Porosité : Ensemble des vides d'un matériau solide, ces vides peuvent être remplis par des fluides. Elle s'exprime en % de vide par rapport au volume total.

Poussée : Force horizontale ou oblique qui s'exerce latéralement contre une *structure* ou une paroi verticale.

Pré-cadre : Bâti rigide d'encadrement des menuiseries solidaires de la maçonnerie.

Pression : Force exercée sur une unité de surface. La pression s'exprime généralement en MPa (MégaPascal) ; 1 MPa = 10,2 kg/cm², (1 Pa = 1 N/m-²).

Redent ou redan : Dans une construction, ressaut ou saillie en gradins ou marches d'escalier.

Refend : Mur séparatif et porteur à l'intérieur d'un bâtiment. Synonyme : Mur de refend.

Rejaillissement : Projection d'eau sur la surface du mur qui provoque des infiltrations latérales dans les murs. Contrairement aux désordres causés par les remontées capillaires qui sont permanents, les effets du rejaillissement sont temporaires.

Remontées capillaires : Phénomène d'ascension d'un liquide dans le mur ou le sol. Il est d'autant plus développé que le diamètre des pores ouverts est faible.

Résilience : Aptitude d'un matériau ou d'un élément à rester apte à destination après avoir été affecté, modifié, ou déformé par une contrainte.

Résistance (mécanique): Aptitude d'un matériau ou d'un élément à s'opposer à une contrainte.

Résistance à la rupture : Résistance à la contrainte maximum qu'un matériau ou un élément d'ouvrage est capable de *support*er juste avant sa rupture.

Résistance à la diffusion de vapeur d'eau : Indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement un matériau que l'air. Plus le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'un matériau est faible, c'est-à-dire plus le matériau constituant la paroi est perméable à la vapeur, plus le mouvement de diffusion de vapeur est important. La quantité de vapeur d'eau diffusant à travers une couche d'un matériau déterminé ne dépend pas uniquement de la valeur de ce coefficient, mais aussi de l'épaisseur de cette couche.

Retrait : Contraction du matériau provoquée par la diminution de sa teneur en eau.

RT : Réglementation thermique

Ruissellement : Écoulement instantané et temporaire, diffus ou concentré, des eaux.

Saignée : Rainure pratiquée dans une maçonnerie pour y incorporer un conduit ou un tube (chauffage, sanitaire), qui est alors dit engravé. Tranchée permettant l'encastrement d'un plancher dans un mur existant. Voir engravure.

Scléromètre : Appareil permettant de mesurer la dureté d'une surface.

Soubassement : Partie basse d'un mur au-dessus du sol, de constitution traditionnellement différente de celui-ci.

Stabilité mécanique : Aptitude d'un élément d'ouvrage à rester dans sa position.

Sustentation (base de) : Surface virtuelle comprise entre les points d'appui d'un corps, à l'intérieur de laquelle doit se projeter le centre de gravité du corps pour qu'il n'y ait pas déséquilibre.

Tassement : Perte de volume consécutive aux différents séchages ou chargements de l'élément.

Tassement différentiel : Mouvement d'enfoncement ou déformation verticale qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations comme l'apparition de fissures.

Teneur en eau : Masse d'eau contenue dans la terre et exprimée en % de la masse totale de matière sèche.

Terre à bâtir : Terre minérale propre à la construction, dénommée aussi terre crue, que l'on trouve généralement sous la terre végétale. La terre à bâtir résulte de l'altération superficielle des roches qui sont alors transformées par des processus naturels d'érosion chimique et physique. Elles peuvent donc être régionalement et localement de types très différents. En construction, la terre à bâtir est considérée comme un mélange naturel de minéraux argileux, de limons, de sables, de graviers, de cailloux qui forment la *structure* granulaire.

Terre crue : voir terre à bâtir

Tirant : Élément élancé qui reprend des efforts de traction et s'oppose à l'écartement des murs.

Traction : Action mécanique unidirectionnelle (effort, contrainte) qui tend à allonger ou augmenter le volume du corps sur lequel elle s'applique.

Triquage : Action consistant à battre la surface du mur et réalisée à l'aide d'un outil généralement en bois.

Trumeau : Pan de mur entre deux ouvertures ou deux éléments d'ouvrages.

Viscosité : État de ce qui est visqueux ; état d'un liquide plus ou moins épais et sirupeux, dû au frottement réciproque des molécules, et qui s'oppose à leur écoulement ; capacité à s'écouler plus ou moins facilement.

Procédure de révision

Comme tout texte normatif, celui-ci est amené à évoluer suite à son utilisation effective et sa relecture par un panel de plus en plus large de professionnels et d'experts.
La Confédération de la Construction en Terre Crue centralise à présent l'ensemble des propositions de modification afin de présenter une nouvelle version en 2020.

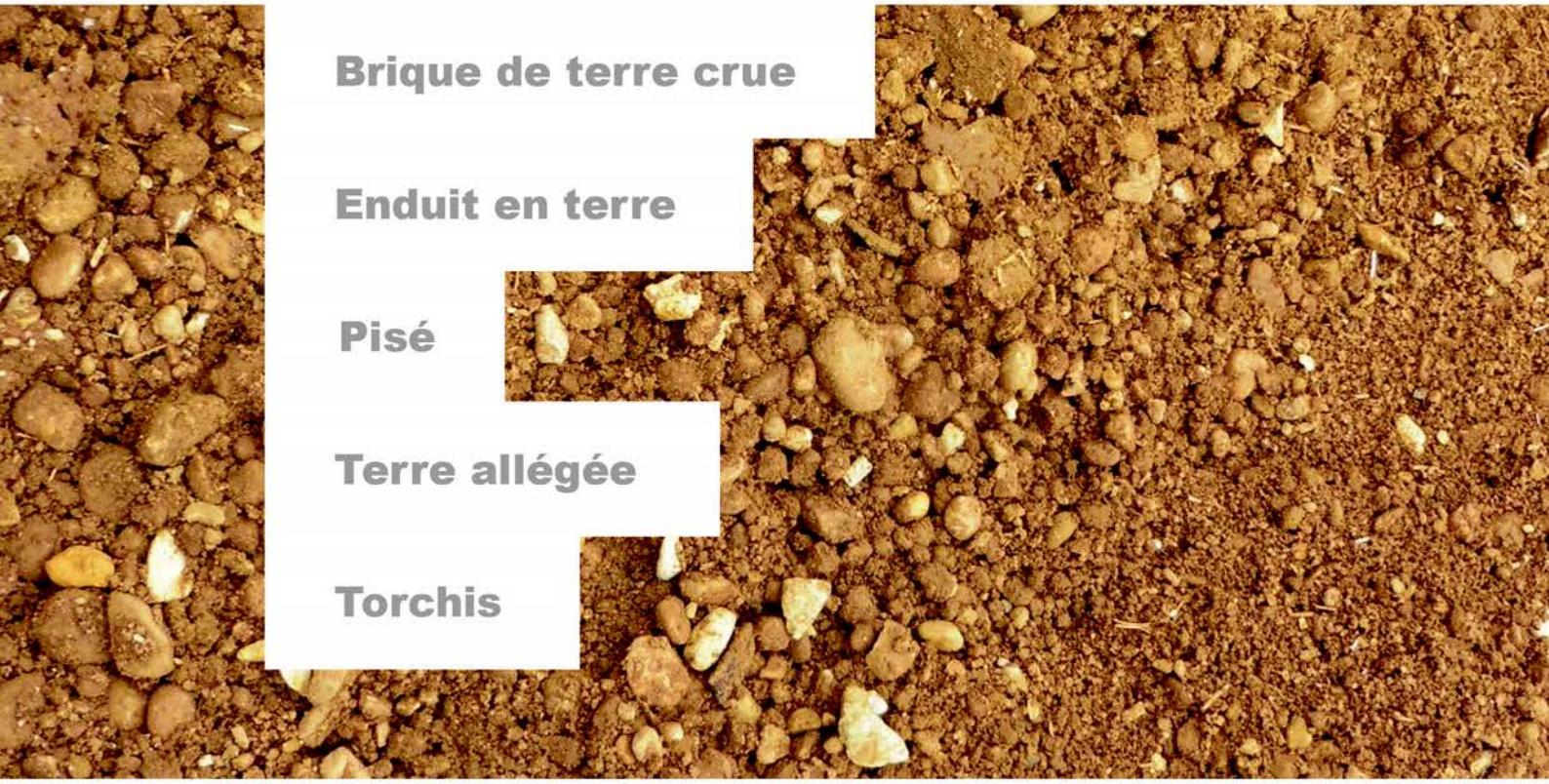
Tableau 1: Adresses de correspondance de révision des guides

		Site de téléchargement	Adresse de dépôt des formulaires de révision
BAUGE	CTA	https://webmaster50050.wixsite.com/terreux-armoricains	contact@terreuxarmoricains.org
BRIQUE	Validé prochainement		
ENDUIT	ASTERRE	www.asterre.org	gbpenduit@asterre.org
PISÉ	TERA	http://terre-crue-rhone-alpes.org	info@terre-crue-rhone-alpes.org
TERRES ALLÉGÉES	ARESO	http://www.areso.asso.fr/	guides_terrecrue@areso.asso.fr
TORCHIS	ARPE N	www.arpenormandie.org	contact.gbpt@arpe-normandie.com

Les propositions de reformulation et des commentaires sont à transmettre à chaque association pilote de guide avant **le 15 novembre 2019**. Ces éléments s'inscrivent dans le document type de révision joint en annexe de guide ou à télécharger sur le site au format texte à l'adresse indiquée au tableau 1 ci-dessus.

ATTENTION : Les avis et propositions transmis hors document de révision ne sont pas recevables.

Bauge



La rédaction de ce **Guide des bonnes pratiques sur la construction et la restauration en Bauge** a été réalisée par les professionnels experts de la construction en bauge (artisans, maîtres d'œuvre, bureaux d'étude, chercheurs…) et pilotée par l'association CTA (Collectif terreux armoricains) https://webmaster50050.wixsite.com/terreux-armoricains

Le 13 décembre 2018, ce guide a été validé par l'ensemble des associations et organisations professionnelles représentatives des acteurs de la construction en terre : ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, CTA, FFB, Fédération SCOP BTP, MPF, RÉSEAU Écobâtir, TERA.

Ce travail a été soutenu financièrement par la DHUP* de 2015 à 2018.

* Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire & Ministère de la Cohésion des Territoires.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

MINISTÈRE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES ET DES RELATIONS AVEC LES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES