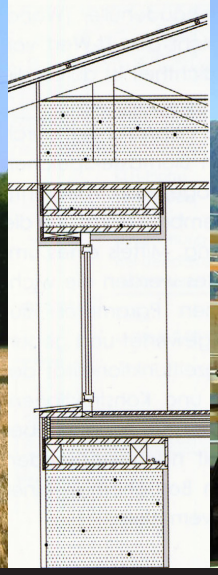


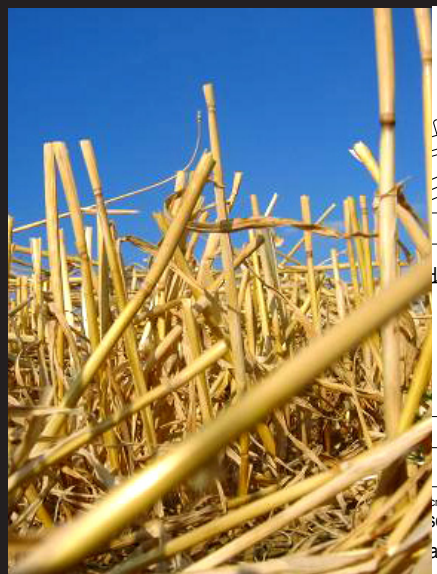
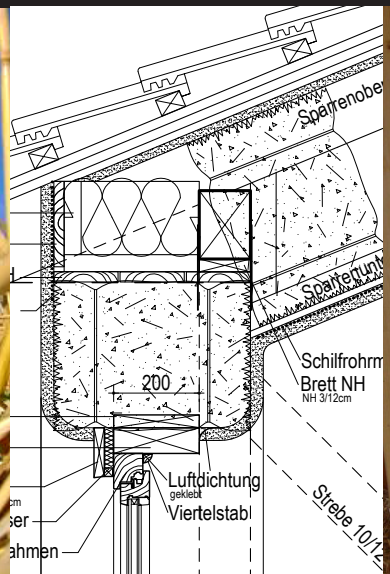
ATBA
L'atelier, bureau d'architectes SA
FUCHS Stéphane,
architecte HES
www.atba.ch

Collaborateur
KRUMM Olivier,
architecte DPLG/DSA-terre

En collaboration avec
CAUDERAY Elsa,
architecte EPFL/DSA-terre

LA CONSTRUCTION EN BOTTE DE PAILLE

Étude de faisabilité, Lausanne, mars 2009.

indexe

Remerciements

Monsieur Peter Braun, ingénieur EPFZ, NORMAL OFFICE à Fribourg,

Madame Sarah Challandes, ingénieure en agronomie, exploitante à La Mauguettaz,

Monsieur Felice Guarino , architecte, Institut Bau und Gestaltung Hochschule für technik und Wirtschaft, à Coire,

Monsieur Liman et Monsieur Bouilloux, ingénieurs thermiciens, service du logement, ville de Lausanne,

Monsieur Olivier Sonderegger, directeur de la Fédération Suisse des Producteurs de Céréales,

Monsieur Laurent Vorlet, DENA Energie Sàrl, analyse énergétique du bâtiment et du territoire,

pour une aide précieuse de traductions, corrections, et suggestions

Monsieur Julien Hosta, architecte DPLG/DSA-terre et Monsieur Marco Sonderegger. architecte EPFL,

Madame Eleanore Kermisch,

Madame Manuela Kleis.

Indexe

	Introduction : de la paille pour construire?	p 2
1	Historique et exemples contemporains	p 4
2	Mise en oeuvre	p 6
3	Techniques constructives	p 8
4	La botte de paille	p10
5	Risques et résistances	p12
6	Ecobilans et habitat sain	p14
7	Disponibilité et coûts	p16
8	Tableau récapitulatif	p18
9	Il n'y a pas d'alternative unique	p20
	Conclusion	p22
	Références et bibliographies	p24
	Annexes	p27

Illustrations de la couverture :

En haut
Maison Braun, standard passif, paille porteuse, architecte atelier W.Schmidt (2002), Disentis, Suisse.

En bas
Strohpolis, habitat collectif, ossature bois remplissage paille R+2 (2004), Allemagne.

de la paille pour construire ?

« En construisant de manière durable et intégrée nos ancêtres concevaient parfaitement l'importance d'offrir un monde sain et équitable aux générations futures. Sauront-nous faire de même? »

Des maisons individuelles, des logements collectifs, mais aussi des écoles, des bâtiments administratifs et des halls réalisés en paille prouvent que cette technique de construction présentent un nouveau champs d'application dont les perspectives sont à la fois environnementales et économiques.

Nos ancêtres, bien avant l'ère industrielle et l'invention de la botteleuse ont su profiter des nombreuses qualités du matériau paille dans la construction. En Suisse, au bord du lac de Neuchâtel, on a retrouvé des vestiges d'un village lacustre construit avec des toitures de chaume (paille) et des murs en torchis, mélange de terre et de paille, datant de 3'000 ans av. J-Ch. Aujourd'hui, nos modes de vie ont bien changé, par contre le potentiel exceptionnel de ce matériau reste le même (c.f. tableau à gauche). Depuis les années 90, on redécouvre l'utilisation de la paille dans la construction d'abord aux Etats-Unis, puis en Australie, au Canada et en Europe. Le savoir-faire et les techniques provenant du monde des écologistes autoconstructeurs-trices intéressent de plus en plus d'architectes et d'ingénieur-e-s.

Pourquoi assiste-t-on aujourd'hui à un tel renouveau de la construction en paille?
La moitié de l'énergie primaire consommée en Suisse l'est pour le bâtiment, dont 30 % uniquement destinée au chauffage[1]. Si nous voulons réduire notre consommation d'énergie il est urgent de trouver des alternatives!

La construction en paille répond de multiple manière à la problématique énergétique : tout en offrant une isolation thermique de bonne qualité, elle participe pleinement au bien-être des habitant-e-s qui vivent entre ses murs. La paille est un matériau sain, de sensation chaude (effusivité), qui ne diffuse aucune particule allergène ou cancérigène. Sa production est locale et ne demande que très peu d'énergie. La paille stocke le CO_2 plutôt que de l'émettre. Le CO_2 absorbé par la photosynthèse est équivalent voir plus élevé que celui dégagé par sa fabrication et son transport. En comparaison, la production de bois pour la construction demande de deux (pour du plancher raboté) à dix fois (pour du MDF) plus d'énergie que la production de bottes de paille.

Afin de mieux connaître les caractéristiques de la paille, plusieurs études et doctorats ont déjà été menés dans des universités technologiques d'Allemagne, Angleterre, Autriche, France, Canada, Etas-Unis, et Austalie. Ces programmes de recherches étudient principalement le comportement structurel et hygroscopique d'un mur en botte de paille. Ces études sont référencées dans la bibliographie de ce document. En France, en 2004, une équipe de recherche financée par un fond public a réalisé une maison en bottes de paille puis étudié son comportement thermique, hygroscopique et structurel[2]. En Allemagne et en Autriche, ainsi qu'en Amérique du Nord, la construction en bottes de paille a passé les tests réglementaires de résistance des matériaux. Aujourd'hui ces pays ont des normes propres au matériau paille.

En Suisse, bien que l'atelier d'architecture Werner Schmidt ait déjà réalisé plusieurs maisons en bottes de paille[3], il n'existe aucune réglementation propre à ce type de construction. Et pourtant, dans notre pays, les questions touchant au développement durable dans le domaine du bâtiment sont plus que jamais à l'ordre du jour : Label MINERGIE-P-ECO, écoquartiers[4], 3'000 logements durables en 10 ans[5], société à 2'000 Watts, Quartier 21[6], etc.

Cette étude a pour objectif de faire un tour d'horizon dans le domaine de la construction en paille en Suisse et ailleurs. Bien sûr, il n'est pas possible de réunir en un seul document la totalité des investigations existantes sur cette thématique. C'est pourquoi, dans un souci de vulgarisation et diffusion de ce document nous avons choisi d'en référencer les plus importantes et les plus récentes disponibles sur le net ou consultable en bibliothèque. Nous nous sommes intéressé-e-s particulièrement aux études et données européennes car la proximité culturelle et sociale rend le travail de comparaison plus aisé.

Avantages de la construction en botte de paille :

PRODUCTION ET TRANSPORT	**TECHNIQUES ET MISE EN OEUVRE**	**OUVRAGE FINI ET DURÉE DE VIE**	**DÉMOLITION**
renouvelable annuellement	économique	habitat sain	entièrement recyclable
disponible localement	isolant et porteur à la fois	bon isolant (λ : 0,044 à 0.067 ép. min de botte : 35 cm)	retour à la terre comme fertilisant (car pas d'imprégnation toxique)
peu de transport	techniques simples et flexibles	régulateur hygroscopique	utilisation comme combustible de chauffage
faible énergie de production (2 à 10 fois moins que le bois)	bonne résistance au séisme	possibilité de faire d'importantes économies de chauffage	transformation en agrocarburant
valorisation d'un sous-produit céréalien	rapidité de construction	entretien simple et facile	faible énergie grise
peu de transformation et mécanisation	auto-construction accessible	longue durée de vie (plus de 100 ans)	
disponible en quantité (pour la Romandie ~30'000 tonnes en 2008)	construction jusqu'à 6 étages	bâtiment équivalent Minergie, Minergie-P, Minergie-P-ECO	
infrastructures de fabrication et stockage déjà existantes	mise en oeuvre saine et sans déchet		

1 Source : Jeanneret C, EPFL 2001

2 Programme national de recherche ADEME, FFB, CEBTP : www. econologie. com/file/technologie_ energie/Dossier_Ademe_Paille.pdf

3 C.f.: www.wernerschmidt.ch

4 Projet d'écoquartier Métamorphose à Lausanne.

5 Projet actuellement en cours de réalisation à Lausanne.

6 Processus de concertation citoyenne par quartier de la commune de Lausanne.

Aujourd'hui, la construction en bottes de paille s'adapte tout aussi bien à l'esthétique d'une architecture contemporaine qu'à des bâtiments de style traditionnel tout en offrant une alternative de matériaux de construction particulièrement intéressante en matière d'économie d'énergie (chauffage et énergie grise).

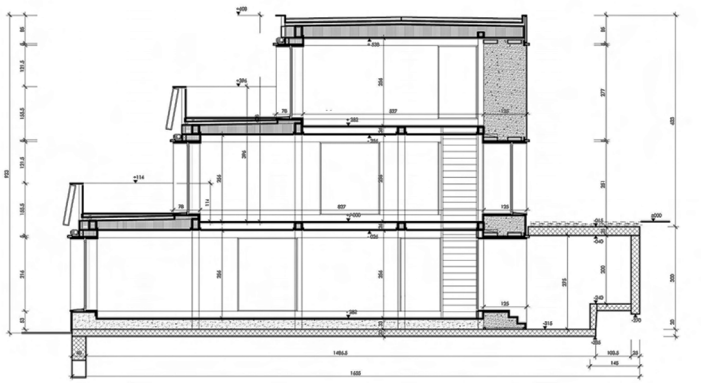
C'est à la fin du XIXème siècle que la construction en bottes de paille fut inventée par des ouvrier-ère-s du chemin de fer de l'État du Nebraska, aux États-Unis. En toute logique, il-le-s profitèrent d'un matériau isolant largement disponible dans cette région céréalière pour se protéger du froid de l'hiver, en construisant des abris de fortune.
La plus vieille maison recensée en France date de 1921. Elle se situe à Montargis (sud de Paris). Bien entretenue depuis toujours, elle ne souffre d'aucune pathologie[1].

Ecole du Colibri (2007), La Roche-sur-Grâne , France[2].

Réalisation	centre agro-écologique Les Amanins
Technique	ossa. bois remplissage bottes de paille
Revêtements	enduits terre int. et enduits chaux ext.

Maison autonome en énergie (2006-2007), Flerden, CH[2].
Prototype conçu par la Hochschule für Technik und Wirtschaft, Coire, Suisse.

Architectes	GUARINO Felice Institut Bau und Gestaltung, Coire.
Technique	jumbo bottes porteuses : R+2
Revêtements	enduits terre int. et enduits chaux ext.
Surface	240 m^2
Prix m^3 SIA	585 frs

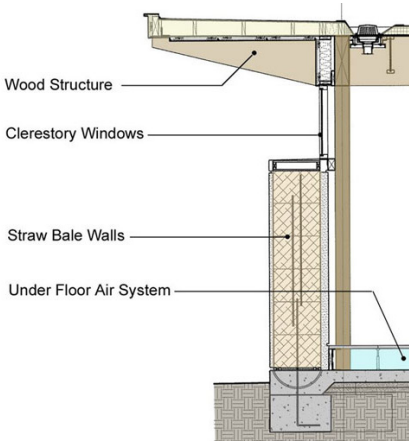


Maison familiale passive (2004) Wienerherberg, Autriche[4].

Architecte	BM Winfred Schmelz
Technique	Panneaux de bois préfabriqués et isolés en bottes de paille
Revêtements	Bardage ext. en mélèze, enduits terre int.
Surface	151 m^2

Transit maintenance facility (2007), Santa Clara, Californie, USA : HOK's straw building cértifié LEED GOLD[5].

Architecte	HOK group
Technique	ossature bois remplissage jumbo bottes
Revêtements	enduits chaux
Surface	6'200 m^2



A consulter aussi :

MINKE Gernot, MAHLKE Friedemann (2005), Buiding with straw : Design and Technology of a Sustainable Architecture, Ed Birkäuser, Suisse, 143 pages.

---

1 LA SCIENCE ET LA VIE (mai 1921), Fraîches en été, chaudes en hiver, les maisons de paille sont avant tout économiques, France, 8 pages.

LE MONITEUR ARCHITECTURE amc n°81 (septembre 2008), expérimenter la paille, Suisse, 4 pages.

2 www.lesamanins.com

3 www.fh.htwchur.ch

4 www.baubiologie.at (stroh)

5 www.hok.com

« En Suisse, nous avons construit jusqu'à 3 étages avec la technique nebraska grosses bottes porteuses[1]. Le bâtiment se comporte très bien. Si on étudie et maîtrise suffisamment le problème de tassement, pourquoi pas 4 étages l'année prochaine ? »

Peter Braun
ingénieur EPFZ
NORMAL OFFICE
partenaire
de Werner Schmidt

Le choix d'une technique dépend de :
1 la mise en oeuvre
2 la performance thermique désirée
3 le nombre d'étage
4 un bâtiment collectif ou individuel
5 le choix esthétique
6 le savoir faire local
7 la réglementation et le périmètre constructible

Il existe deux grandes catégories de techniques constructives en bottes de paille:

1 Technique bottes porteuses. (c.f. page suivante)
La technique porteuse la plus répandue est appelée type nebraska (région des USA où elle a vu le jour). Les murs sont montés en bottes calpinées, comme un mur de briques sans mortier. La toiture repose directement sur les murs en paille. Cette technique est mise en oeuvre, entre autre, dans le canton des Grisons par Werner Schmidt[2], architecte suisse.

2 Technique botte non-porteuse. (c.f. page suivante)
-L'ossature bois supportant la toiture est intérieure, intermédiaire ou indépendante du remplissage en paille. Les murs sont montés en bottes calpinées autour de l'ossature ou insérées et compactées les unes sur les autres verticalement dans l'ossature. Exemple : la technique CST[3] et la technique du GREB[4].

- Les panneaux sont préfabriqués en atelier et transportés par camion. Les bottes sont insérées en force dans les panneaux en atelier ou directement sur le chantier. Cette technique est particulièrement développée en Autriche[5].

Dans le cas du sol et de la toiture, les bottes de paille sont insérées en force dans le solivage ou le chevronnage dimensionné en fonction de la taille des bottes. Des plaques de plâtre ou d'OSB peuvent servir de coffrages perdus.

«Un bon chapeau et des bonnes bottes» :
Principe fondamental de conception d'une construction en botte de paille, quelque soit la technique.

Une étude[6] réalisée en Angleterre a interrogé plusieurs artisan-e-s/concepteurs-trices paille expérimenté-e-s sur les causes de détériorations des réalisations en paille. L'étude conclut que la durabilité de ce type de construction dépend principalement de la bonne résolution de certains détails constructifs. A noter que tous les cas de défaillances étudiés dans ce rapport ont été résolus de manière simple et peu coûteuse.

1 Le soubassement.
Le soubassement doit mesurer min. 30 cm de haut et doit être réalisé en matériau hydrophobe (ex : bloc de ciment) afin de protéger le mur en paille des remontées d'humidité venant du sol et des éclaboussures. Une barrière capillaire (par ex. feuille bitumineuse) doit être insérée entre le soubassement et le mur de paille. Un drainage et un lit de gravier au bas du mur évitent la création de flaques d'eau. Les pilotis sont un bon moyen de résoudre ces détails particulièrement délicats.

2 Les appuis de fenêtre.
Les fenêtres positionnées au nu extérieur sont préférables. Une étanchéité sous la tablette assure une bonne protection contre les infiltrations d'eau pouvant survenir en cas de défaillance de la tablette, et cela même si le reste du mur n'a pas d'étanchéité.

3 La jonction des murs avec la toiture.
Un débord de toiture est indispensable à la protection du haut des murs. En privilégiant une esthétique architecturale contraire à la logique, plusieurs cas de défaillance de mur en paille sont apparus. Dans ces cas-là, tenter de palier à la mauvaise conception et aux ifiltration d'eau par un crépis en ciment ne permet pas de tout résoudre : un revêtement en ciment fissuré ou une goutte pendante mal conçue peuvent avoir de graves conséquences.

Trois types de revêtements sont particulièrement adaptés à la construction en bottes de paille :
- les enduits en terre crue
- les crépis à la chaux (aérienne)
- les bardages en bois (sur enduit terre ou chaux)

Le revêtement intérieur et extérieur d'un mur en bottes de paille doit répondre à un certain nombre de caractéristiques:
-Il doit prévenir et protéger l'intégralité du mur en bottes de paille des infiltrations d'eau.
-Il doit être très perméable à la vapeur d'eau (perspirant) pour permettre aux bottes de rester bien sèches et lors d'exposition à un taux élevé d'humidité de sécher rapidement.
-Il doit être flexible et souple pour reprendre l'élasticité de la botte de paille sans fissurer.
-Il doit être facile et rapide à réparer.
-Le pare-vapeur est déconseillé. Un mauvais raccord ou un trou peut créer un point de rosée (accumulation d'humidité).

Dans le cas de la construction en panneaux préfabriqués, la paille est recouverte par des panneaux de bois ou plâtre permettant des finitions intérieures plus courantes comme les enduits de plâtre, les tapisseries ou la peinture.
Dans tous les cas, les crépis ciment sont à proscrire car ils sont peu ou pas perspirants[7]. Toutefois, il existe des réalisations où le crépis ciment a été amendé de sable volcanique[8] afin d'améliorer la respiration du mur.

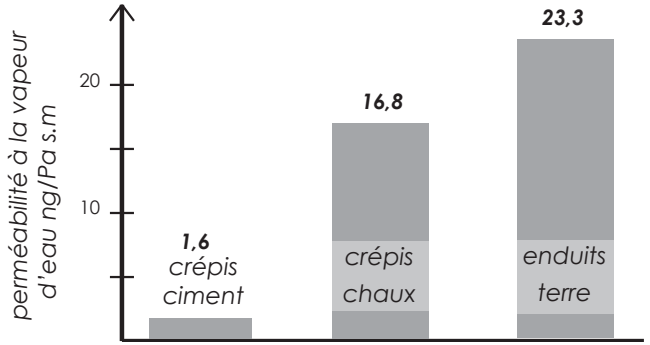


fig. 1

La chaux[9].
-Les crépis de chaux (aérienne ou en pâte) sont réalisés généralement à l'extérieur du mur en plusieurs couches (3 v. de sable pour 1 v. de chaux).
-Les chaux hydrauliques sont déconseillées car les impuretés peuvent provoquer une porosité du mur le rendant moins étanche à l'eau.
-La chaux laisse passer la vapeur d'eau tout en empêchant l'eau de s'infiltrer dans les bottes. Cette vapeur d'eau chargée de particules de chaux peut avoir un rôle fongicide.
-Il faut entre 3 et 6 mois pour que la chaux fasse sa prise ou carbonate bien. Cela dépend de la température et de l'humidité de l'air. La chaux ne carbonate pas en dessous de 8°C et lorsque l'air est trop humide. En Suisse (plateau) un crépis réalisé après la fin du mois d'août n'aura certainement pas assez temps pour bien durcir.
-Les fissures d'un crépis de chaux peuvent être reprises car les cristaux carbonatés peuvent se reconstituer (ce qui n'est pas le cas des cristaux de ciment).

Les enduits en terre crue[10].
-Les enduits terre sont particulièrement adaptés car ils sont très perspirants.
-En utilisant la terre d'excavation, on diminue les coûts tout en réduisant les dégagements de CO_2 liés à la construction. La mise en oeuvre est particulièrement saine et sans transformation (ce qui n'est pas le cas de la chaux ou du ciment).
-Les qualités collantes de l'argile sont une très bonne accroche à la paille.
-Certain-e-s artisans-e-s «immergent[6]» les faces ext/int des bottes (5 cm) dans une barbotine de terre avant de monter les murs. On a alors un matériau composite terre/paille qui réagit bien à l'humidité, au feu et aux charges.
-Les enduits terre jouent le rôle de régulateur hygroscopique de la paille (et de l'air). Ils maintiennent la paille bien sèche même lorsque l'humidité relative extérieure ou intérieure atteint des pics très élevés.
-Dans le cas d'enduits en terre extérieurs, on peut poser un chaulage en dernière couche comme protection.

1 Projet réalisé en 2006-2007 par la Hochschule für Technik und Wirtschaft de Coire en Suisse.

2 C.f.: www.wernerschmidt.ch

3 La technique CST (cellule sous tension) est développée principalement en France par Tom Rijven, artisan-paille. C.f. RIJVEN Tom (2007), Entre paille et terre, Ed. goutte de sable, La Roussière, France, 159 pages.

4 La technique du Greb a été développée au Canada C.f. BROSSAMAIN V., THEVARD J.B. (mars 2006), Construire son habitation en paille selon la technique du GREB, 2ème édition, Québec, 112 pages.

5 C.f. www.baubiologie.at

6 Voir interviews dans les annexes de : WIHAN Jakub (Juillet 2007), Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw, University of East London School of Computing and Technology, 271 pages.

7 STRAUBE John (juillet 2003), Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings, Canada Mortgage and Housing Corporation, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, 53 pages.

8 C'est le cas de la Maison Braun construite par Werner Scmidt à Disentis en 2002.

9 Ecole d'Avignon (2003), Techniques et pratique de la chaux, Ed.Eyrolle, Paris, 225 pages.

10 www.craterre.archi.fr www.asterre.org

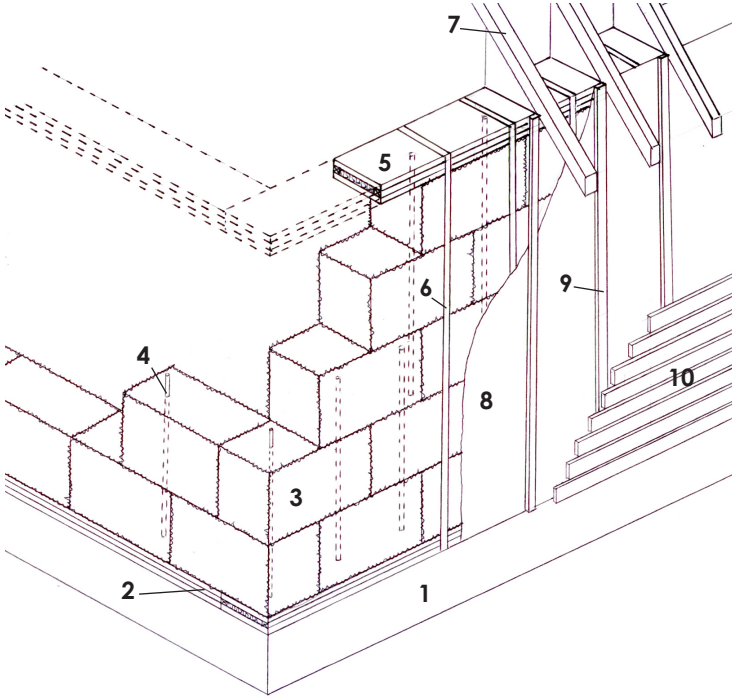
fig.1 Source : Straube (c.f. 7) et Minke

« Les entreprises suisses travaillent bien et sont très qualifiées. Elles sont tout à fait capables de s'adapter à de nouvelles techniques. Il s'agit de leur expliquer certains détails cruciaux à ne pas mettre de côté »

Peter Braun
ingénieur EPFZ
NORMAL OFFICE
partenaire
de Werner Schmidt

1 Technique botte porteuse (Nebraska).
-Bottes de paille calpinées et supportant la toiture.
-Revêtement extérieur bardage bois et intérieur enduits terre.

Caractéristiques.
- Elle valorise intégralement le matériau paille en profitant de ses caractéristiques à la fois porteuses et isolantes.
- Elle permet de réaliser des murs avec des grosses bottes de paille (200x80x50 ou 240x120x80) qui atteignent le standard Minergie-P, soit une consommation de chauffage quasiment nulle.
- Un bâtiment de 3 étages à d'ores et déjà été construit en suisse allemande avec cette technique.
- Elle nécessite d'anticiper le tassement des murs par un système de précontrainte.



Mise en oeuvre.
- Une lisse basse renforcée en bois est fixée sur le soubassement et la barrière d'étanchéité pour réaliser le départ des murs.
- Les bottes de paille sont calpinées sans mortier.
- Les bottes sont comprimées entre la lisse haute et la lisse basse par des sangles de compression.
- Les bottes sont liées entre elles par des tiges en bois plantées directement dans les bottes.
- Un enduit terre extérieur grossier est posé sous le bardage afin de protéger les bottes du feu et des rongeurs.
- Le bardage est fixé sur un lattage directement fixé dans la paille à l'aide d'un système de grosses vis en PVC ou de chevilles en bois (alternative de revêtement : un crépis à la chaux, enduits terre ou chaulage).
- Un enduit terre vient réaliser le parement intérieur.

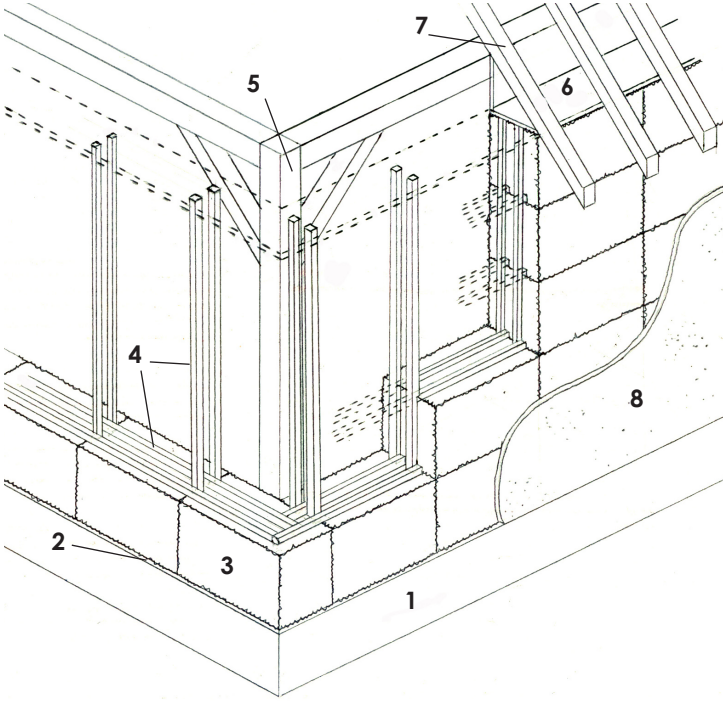
1 *Soubassement de 50cm sur fondation avec barrière d'étanchéité*
2 *Planches en bois renforcées (lisse basse)*
3 *Bottes de paille de 80x40x50cm*
4 *Tiges de liaison des bottes de paille avec lisses hautes et basses*
5 *Planches en bois renforcées (lisse haute)*
6 *Sangles de compression*
7 *Chevrons de toiture*
8 *Enduit terre*
9 *Sous-construction du bardage (contre-lattes)*
10 *Bardage bois*

Réalisation.
- Gros-oeuvre : entreprise de charpente/maçonnerie encadrée par un-e spécialiste en construction écologique (paille/chanvre).
- Enduits terre/chaux : entreprise spécialisée ou entreprise de maçonnerie encadrée par un-e spécialiste terre ou chaux.
- Auto-construction / chantier participatif et pédagogique.

2 Technique botte non-porteuse. (CST)
-Ossature bois porteuse et isolation extérieure.
-Revêtement extérieur crépis de chaux et intérieur enduits terre.

Caractéristiques.

- Les différentes techniques en bottes non-porteuses permettent de réaliser des bâtiments jusqu'à 6 étages[1] : habitats collectifs, bâtiments administratifs, écoles, etc. La paille ne joue qu'un rôle de remplissage isolant. Dans ce cas les normes et réglementations sont les mêmes que pour les autres types de bâtiments en ossature bois porteuse : chemin de fuite F30/F60, matériau coupe feu entre les étages, etc.
- Selon une étude de la SCHL[2] (Société canadienne d'hypothèques et de logement) la technique ossature bois utiliserait 56% plus de bois que la technique nebraska.



Mise en oeuvre.

- Une lisse basse en bois est fixée sur le soubassement et la barrière capillaire. L'ossature secondaire est sur cette lisse basse.
- La compression horizontale est effectuée par la mise en place forcée des bottes de paille entre des tasseaux verticaux (elles sont 5 cm plus longues).
- La compression verticale est effectuée par la fixation de tasseaux horizontaux.
- Les ficelles des bottes sont coupées pour ajouter une tension supplémentaire à l'ensemble et le rigidifier en équilibrant les forces entre elles.
- Un caisson isolé sous-toiture permet de fixer l'ossature secondaire en partie haute et d'effectuer une finition de l'isolation extérieure.
- Un enduit en terre vient finir le parement intérieur et un crépis à la chaux, à l'extérieur (alternatives de revêtement : bardage bois ou crépis à la chaux sur maille).

1 Soubassement de 50 cm sur fondation avec barrière capillaire
2 Planche en bois (lisse basse)
3 Bottes de paille de 80x40x50cm
4 Tasseaux de 4x4 cm pour compression horizontale et verticale
5 Structure porteuse en bois
6 Caisson isolé de finition sous-toiture
7 Chevrons de toiture
8 Crépis à la chaux extérieur

Réalisation.

- Gros-oeuvre : entreprise de charpente encadrée par un-e spécialiste en construction écologique (paille/chanvre).
- Enduits terre/chaux : entreprise spécialisée ou entreprise de maçonnerie encadrée par un-e spécialiste terre ou chaux.
- Auto-construction / chantier participatif et pédagogique.

A consulter aussi :

AMAZON NAILS (2001), information guide to straw bale buildind, Amazon nail, Todmorden, England, www.strawbalefutures.org.uk, 78 pages.

DE BOUTER André (2004), Bâtir en paille : guide pratique de la construction en paille, Ed. La maison en paille, Champmillon, France, 102 pages.

GRUBER Astrid et Herbert (2003), construire en paille aujourd'hui, Ed. terre vivante, France.

KANDE Hamdou (2007), La Paille, du champ à la construction, pour une performance énergétique du bâtiment, Ed.nature et progrès, Belgique, 32 pages.

MINKE Gernot, MAHLKE Friedemann (2005), Buiding with straw : Design and Technology of a Sustainable Architecture, Ed Birkäuser, Suisse, 143 pages.

MACDONALD S.O (1999), La construction en botte de paille-Guide Illustré, Version française (2003) réalisée par La Maison en Paille, www.lamaisonenpaille.com,

1 Dans ce cas, c'est la norme SIA 265 sur les ossatures bois qui est valable, c'est-à-dire max R+6

2 CMHC/SCHL (2002), L'utilisation de bois dans la construction de maisons en ballots de paille, Ottawa, www.schl.ca, 2 pages.

Fiche technique de la botte de paille

origine	refus de la récolte de céréales blé, orge, riz, etc.
composition	cellulose, lignine, silice, cire naturelle
dimensions	120/240 ±50 cm h=80 cm (jumbo botte) 80/200 ±50 cm h=50 cm (medium botte) 50/90 ±10 cm h=35 cm (petite botte)
longueur fibres	≥ 25 cm
densité	250 kg/m^3 (jumbo et medium botte) 100±10 kg/m^3 (petite botte)
résistance des ficelles	10x[1] supérieure au poids de la botte
conductivité thermique [λ]	fibres verticales 0.044 W/mk fibres transversales [2] 0.067 W/mk plus λ est petit, plus le matériau est isolant
capacité hygroscopique	achat et pose 12 -14 % [3] mur sain max. 20% (= 84% HR) fibres saturées 28% (= 98% HR)
effusivité	Ef ≤ 0.7 (comme le bois = matériau chaud)
coeff. résistance vapeur d'eau [μ]	2-2,5 (bonne capacité perspirante) (Enduit terre 5 à 8, ciment 30)[4]
résistance au feu	F 90 (90 minutes) / normalement inflammable (norme allemande et autrichienne)
performance acoustique	Rw* = 53 dBA[5] (meilleure qualité qu'un isolant standard)
module d'élasticité [ε]	0.5-0.55 N/mm^2 (jumbo bottes non enduite)[6] ~1.0 N/mm^2 (mur en petites bottes enduit)[7] pas de rupture abrupte
capacité portante	25.5 tonne/m^2 (jumbo botte non enduite)[8] ~7-8 t/m^2 (mur de petites bottes)[9] capacité portante largement suffisante
tassement	dans le cas de bottes de paille porteuses enduites 3-4% de compression en précontrainte[10] (sangles)

**«53dBA peut sembler bas mais c'est en fait très bon. La plupart des systèmes muraux conventionnels, y compris les murs en briques avec un vide d'air et une masse bien plus élevée, se comportent moins bien. A très basses fréquences l'échantillon en paille montre une amélioration de performance de 2-3dB par rapport aux systèmes muraux en briques.» Rene Dalmeijer, Pays-Bas.*

La botte de paille : matériau de construction.
Une paille bien sèche lors de la récolte des céréales, du bottelage et pendant le stockage est la garantie de la durabilité et de la résistance du mur en bottes.

Le taux d'humidité de la botte à l'achat et à la pose ne doit pas dépasser 15%. Le passé de la botte est très important : la paille ne doit pas avoir eu de contact prolongé avec de l'eau. Une botte grise ou noire, même sèche, aura moins de résistance lors d'une éventuelle nouvelle exposition à l'eau. La paille la plus durable a des brins entiers, et ne contient aucun grain ou résidu de grain.

Facteurs influençant la pérennité de la paille

	paille	- espèce : blé, riz, orge, etc. - facteurs génétiques : - rapport feuille/tige - nombre de noeuds - concentration d'azote (fertilisant)
culture et mise en oeuvre	**avant bottelage**	- fertilisation - maturité à la récolte - conditions et durée de séchage - qualité et longueur des brins - résidu de grains - compression, densité
	après bottelage	- transport - stockage (bâches à éviter)
	pendant construction	- conception et gestion des détails - planning de chantier - sens des fibres à la pose - revêtement - passé de la botte - humidité (max 15% à la pose)
	après construction	- climat, exposition des murs - évolution hygrométrique
	habitant-e	- entretien - habitudes et comportements des habitant-e-s ou utilisateurs-trices

Comportement structurel.
Une fois que l'enduit est appliqué directement sur les faces des bottes, le mur terminé devient un hybride de paille et d'enduit. On peut alors le considérer comme un panneau composite contreventant.

Au vu des caractéristiques relativement peu homogènes de la botte de paille sa résistance mécanique dépend de plusieurs paramètres :
-l'orientation des fibres à plat ou sur champ
-la qualité de ses ficelles
-sa compression
-ses dimensions
-la technique constructive et sa mise en oeuvre
-la qualité de la précontrainte (tassement)
-l'épaisseur, le type et l'accroche des enduits ou revêtements.

Pratiquement toutes les charges de compression et de contreventement seront supportées par les enduits relativement rigides. Par exemple, une charge ponctuelle de neige qui pourrait engendrer un tassement périodique de la paille est reprise par les enduits. On peut les considérer comme des murs très minces reliés et contreventés par un coeur flexible en botte de paille. La résistance d'un oeuf dur fonctionne de manière similaire : sans coquille il est très vulnérable, mais avec la coquille, même si elle est craquelée, il garde une résistance surprenante.

D'autre part, par rapport à une structure en béton où la rupture est soudaine et désastreuse, la rupture d'un mur en paille enduit n'est pas abrupte et spectaculaire. Sa rupture est comparable à une réduction de l'espace habitable plutôt qu'à sa destruction.
Des tests[12] pratiqués dans différents laboratoires au cours de ces dix dernières années ont démontré qu'un mur non-enduit peut supporter une quantité appréciable de charges verticales ainsi que des distorsions horizontales et non-horizontales. Il fournirait donc un renforcement en cas de défaillance des enduits. Certains tests ont révélé la solidité, l'élasticité et la résistance surprenante des murs de paille enduits, même lorsqu'ils sont complètement fissurés et soumis à des charges répétées. Au niveau du module d'élasticité seuls les caoutchoucs et les fibres d'acier possèdent des capacités analogues. La botte de paille montre une très bonne résistance au séisme car son élasticité absorbe bien les poussées latérales.

En Suisse, la HTW de Coire a effectué en 2001 et en 2004 des tests de compression en laboratoire. Une jumbo botte (250 kg/m^3) a atteint une résistance de 25.5 t/m^2, capacité portante largement suffisante.

Les murs en bottes de paille ne sont pas parfaitement homogènes comme les matériaux industriels. Il n'est pas évident de faire des comparatifs entre les différentes valeurs limites établies dans les études, car les dimensions et la densité de la botte de paille varient selon les régions, le climat, l'humidité de l'air, etc. En France, afin de mieux comprendre le comportement de matériaux non-industriels comme les murs en paille ou les murs en pierres sèches, l'ADEME[13] et le CSTB[14] sont en train de mettre au point une étude[15] d'évaluation adaptée aux caractéristiques particulières des matériaux non-industriels.

Essais de résistance à la compression, 2001, HTW, Coire, Suisse.

1 D'après la norme allemande DIN EN 1608(7).

2 D'après la norme allemande DIN EN 12667(6).

3 C.f 1 page suivante : WIHAN Jakub (Juillet 2007)

4 Gruppe angepasste technologie (GraT)2001, www.grat.tuwien.ac.at.

5 Test effectué à l'Université Technique de Eindhoven par René Dalmeijer (Pays-bas).

6 Essais réalisés en 2004 au Hochschule für Technik und Wietschaft (HTW), Coire, Suisse.

7 KING Bruce, (1996) Buildings of earth and straw. Ecological Design Press, Californie, USA.

8 C.f. 6

9 WALKER Peter (mai 2004), Compression load testing straw bale walls, Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath, 10 pages.

10 FAINE Michae, ZHANG John, (2002), A pilot study examining the strength, compressibility and serviceability of rendered straw bale walls for two storey load bearing construction, University of Western Sydney, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, 14 pages.

11 C.f. 8, 9, 11.

12 REINSCHMIDT Jan, Prof. Dr.-Ing DANIELEWICZ I. (2007), Loadbearing strawbale building Elastomechanic tests with big bales, Hochschule Magdeburg-Standal (FH) Interim Report v.e., 24 pages.

13 Agence nationale française de l'environnement et de l'énergie.

14 Centre scientifique et technique du bâtiment, France (équivalent de l'EMPA Suisse).

15 Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non-industrialisés (terre crue, pierres sèches, mortiers traditionnels, chanvre), 2004-2007, ADEME/CSTB.

« Les résultats de ces tests ont prouvé que le mur de bottes de paille assemblées présente une beaucoup plus grande résistance au feu qu'un mur à ossature bois avec les mêmes finitions »

extrait du rapport de la commission du Nouveau-Mexique chargée de réaliser les tests de résistance au feu sur un mur en bottes de paille
l'isolation écologique
p.91

Résistance à l'humidité.
La majorité des cas d'apparition de moisissures dans les murs de paille sont dus à des défauts de conception. Dans ces cas-là les dommages encourus sont souvent réversibles de manière simple.

Dans la paille bien sèche la majeure partie des bactéries et champignons meurent après une année[1]. De plus, l'obscurité et l'absence d'oxygène dans laquelle est maintenue la paille évite leur prolifération. Des essais[2] d'enfouissement de paille et de bois dans le sol durant plusieurs mois ont démontré que la paille résiste mieux à la biodégradation que le bois malgré ses proportions de lignine[3] moins élevées. Cela viendrait de la structure même des brins de paille.

Une attention particulière doit être portée sur les qualités perspirantes des revêtements (terre, chaux) afin d'éviter toute condensation à l'intérieur du mur. Dans le cas des panneaux de paille compressée par procédé industriel, le borax est utilisé comme fongicide (bains non toxiques à basse concentration[4]).

Les modélisations de la courbe hygroscopique d'un mur en paille[5], ainsi que les suivis de constructions réelles démontrent que le taux d'humidité du mur en bottes est directement associé à l'HR de l'air ambiant. Ce qui veut dire qu'avec une HR de 84%, on peut, sans hygromètre, déduire le taux d'humidité intérieur du mur qui est de 20% . Il ne faut pas que l'humidité des bottes dépasse trop longtemps ce taux[6], c'est la durée plus que la quantité qui peut provoquer des détériorations.

Toutefois, sous nos latitudes, les murs extérieurs ne sont jamais exposés sur la durée à un tel taux d'humidité, sauf dans les cas de fissuration de revêtement trop étanche ou de mauvaise conception (exposition du mur à la pluie battante sans protection adaptée). A l'intérieur dans une salle de bain, lorsque l'HR s'approche de 98%, c'est le revêtement en terre qui maintient la paille bien sèche en absorbant l'excédant d'humidité.

Résistance au feu.
La combustion est alimentée par l'oxygène. Dans un matériau compressé comme une botte de paille, il y a suffisamment d'air pour être un bon isolant, mais pas assez d'oxygène pour favoriser la combustion. Essayez d'allumer un annuaire téléphonique!

Certes, cela reste un matériau inflammable et combustible. Le botte de paille se consume en surface, ne propage pas la flamme et surtout ne dégage pas de fumées toxiques.

Des tests de résistance au feu[7] d'un mur en bottes de paille (90-110 kg/m^3) enduit en terre sur les deux faces ont été menés en Allemagne, et en Autriche. Ils ont abouti à la norme officielle allemande et autrichienne qui est de F90 (90 minutes). Le matériau est considéré comme normalement inflammable, c'est-à-dire tout à fait apte à la construction[8].

En Suisse, aucun test feu n'a encore été réalisé. Dans le cas de la maison Braun réalisée en bottes de paille à Disentis (Grisons) par l'atelier Werner Schmidt, le rapport de la FPA (police du feu du canton des Grisons) a autorisé la construction. Elle s'est basée sur la norme autrichienne et allemande tout en précisant qu'il faudrait refaire les tests-feu en Suisse afin de valider le protocole. En Suisse Romande, à Morens, un permis de construire d'une maison en bottes de paille a été délivré en août 2008. L'ECA (établissement cantonal d'assurance) a autorisé la réalisation.

Concrétement la paille demande certaines précautions : les principaux risques surviennent lors du chantier. L'étape du montage des murs génère des résidus de paille en vrac très inflammables. Il faut donc rigoureusement nettoyer le chantier tous les jours et éviter de fumer pendant le chantier. Par contre, une fois les murs terminés, enduits sur les deux faces, ou plaqués d'un revêtement ininflammable les dangers ne sont pas plus importants que dans une maison à ossature bois.

Et les rongeurs, termites et insectes.
Il existe un cas en France d'un maison ancienne en bottes de paille infestée de termites. Surprenante constatation, ce sont uniquement les portes et les fenêtres ainsi que l'ossature bois qui ont été attaquées[9].

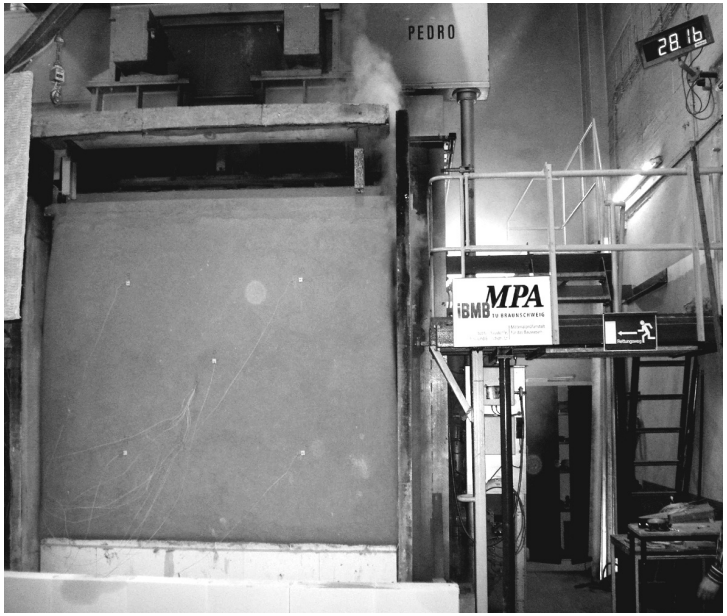
Rongeurs.
Les rongeurs ne mangent pas la paille ils y font leur nid, pour autant qu'il n'y ait pas de résidu de grain. Une botte de paille dont la densité est de 90 à 110 kg/m^3 est bien trop compressée pour leur permettre de s'y installer. Par contre il faut faire attention aux joints entre les bottes de paille. La pose d'un grillage à poule est une bonne solution de protection au niveau du soubassement. Encore une fois, cela dépend plus de la résolution des détails constructifs et de la conception que de la résistance propre au matériau.
Il semble peu probable que des rongeurs creusent entre 3 et 6 cm d'enduit dense. Dans le cas ou il n'y a pas d'enduit, mais seulement l'application d'une étanchéité sur la paille, on peut mettre une protection sous forme de filet contre les insectes et rongeurs. On a trouvé des fouines dans des toitures isolées en paille (comme c'est le cas pour les laines de bois ou minérales) mais pas de cas connu dans les murs enduits.

Termites.
Les termites n'aiment pas la lumière. Comme pour le bois un soubassement de 20 à 30 centimètres suffit pour les éloigner. Une équipe de recherche[10] étudiant l'attitude des termites vis-vis de la paille a constaté que peu d'espèces de termites arrivent à digérer la paille, et dans tous les cas elles préfèrent le bois comme nourriture. Il semblerait que le taux de silice ainsi que la cuticule de cire naturelle de la paille en soit la cause.

Toutefois, les mêmes actions de préventions que le bois sont mises en œuvre pour assurer la perennité d'un bâtiment construit en botte de paille.

Insectes.
Il est important de garder la paille bien sèche (max. 15% à la pose) car les insectes ne mangent que la paille humide. Il existe peu de cas connus d'insectes dans des murs en bottes de paille. On a constaté la présence d'insectes les 2 premières années dans une maison construite en bottes de paille en Italie, les insectes ont ensuite disparu sans avoir causé de dégâts.

Afin d'assurer un bonne protection contre les insectes, une moustiquaire entre la paille et l'étanchéité est parfois posée lors de la construction de maisons. Cette mesure n'est pas indispensable comme le démontrent les nombreuses réalisations en paille sans moustiquaire et sans détérioration.



Test de résistance au feu allemand (2003)
Aucune fumée ne doit apparaître de l'autre côté du mur. Le mur ne doit pas présenter une diminution supérieure à 1 cm et doit résister aux chocs.

A consulter aussi :

STRAUBE John (juillet 2003), Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings, Canada Mortgage and Housing Corporation,EBNet, www.ecobuildnetwork.org, 53 pages

Canada (CMHC/SCHL) : www.cmhc.ca (diverses études)

---

1 WIHAN Jakub (Juillet 2007), Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw, University of East London School of Computing and Technology, 271 pages.

2 C.f. 1

3 La lignine est difficile à digérer par les bactéries, ce qui ralentit beaucoup la biodégradation.

4 On l'utilise aussi pour protéger le bois ou le bambou.

5 C.f. 1. : La méthode WUFI est bien adaptée pour ce calcul.

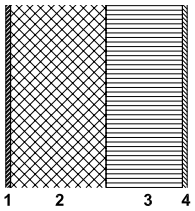
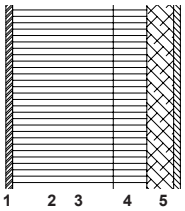
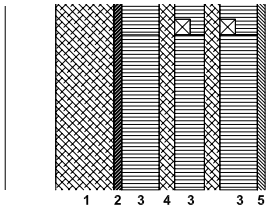
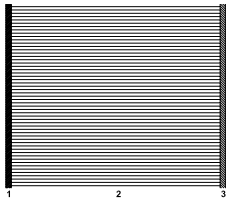
6 A une HR ext de 98%, on en déduit un taux d'humidité dans la botte de 28%, les fibres sont alors saturée en eau.

7 Voir les essais filmés : SNEL Heidi (2004), Bâtir en botte de paille : redécouverte d'un ancien matériau de construction, Heid Snel Okofilm Production, www.ecofilm.de.

8 INSTITUT ALL. DES TECH. DE CONSTRUCTION Etablissement de droit public (le 10 février 2006), Agrément technique général : Isolant thermique en bottes de paille, v.f www.compaillons.fr., Berlin, Allemagne, 5 pages

9 DE BOUTER André (2004), Bâtir en paille : guide pratique de la construction en paille,

10 C.f. 7

PERFORMANCE THERMIQUE	MINERGIE	MINERGIE	MINERGIE	MINERGIE-P
TECHNIQUE CONSTRUCTIVE	**PARPAINGS ET ISOLATION POLYSTYRÈNE EXPANSÉ**	**OSSATURE BOIS PORTEUSE REMPLIS. LAINE DE ROCHE**	**OSSATURE BOIS PORTEUSE REMPLISSAGE PAILLE**	**TECHNIQUE «NEBRASKA» PAILLE PORTEUSE**
COUPE SCHÉMATIQUE SUR MUR	 *Ep. totale : 38 cm*	 *Ep. totale : 28 cm*	 *Ep. totale : 39 cm*	 *Ep. totale : 84 cm*
ÉPAISSEURS DES MATÉRIAUX UTILISÉS	1_ Plâtre + peinture : 1 cm 2_ Parpaings : 20x20x50 cm **3_ Polystyrène exp. : 16 cm** 4_ Crépis synthétique : 1 cm	1_ Plâtre + peinture : 1cm 2_ Ossature bois : 6x16 cm **3_ Laine de roche : 16 cm** **4_ Fibres de bois : 6 cm** 5_ Bardage mas. 3-plis : 5 cm	1_ Ossature bois : 15x15 cm 2_ Enduit terre : 2 cm **3_ Paille : 35 cm** 4_ Ossa. secondaire : 4x4 cm 5_ Enduit chaux : 2 cm	1_ Enduit terre : 2 cm **2_ Paille : 80 cm** 3_ Enduit chaux : 2 cm
trans.calorifique U [W/m²°C][a)]	**U = 0.18 W/mK**	**U = 0.18 W/mK**	**U = 0.17 W/mK**	**U = 0.09 W/mK**
VOLUME DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX PAR M²	1_ Plâtre : 0.01m³ 2_ Parpaings : 0.2 m³ **3_ Polystyrène : 0.16 m³** 4_ Crépis : 0.01 m³	1_ Plâtre + peinture : 0.01 m³ 2_ Ossature bois : 0.052 m³ **3_ Laine de roche : 0.16 m³** **4_ Fibres de bois : 0.06 m³** 5_ Bardage mas. 3-plis : 0.05 m³	1_ Ossature bois : 0.015m³ 2_ Enduit terre : 0.02 m³ **3_ Paille : 0.35 m³** 4_ Ossature sec. : 0.013 m³ 5_ Enduit chaux : 0.02 m³	1_ Enduit terre : 0.02m³ **2_ Paille : 0.8 m³** 5_ Enduit chaux : 0.02 m³
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX[b)] (c.f. : hypothèses en annexe 1)				
SATURATION ÉCO. (UBP)[1]	174'411 points/m²façade	170'733 points/m²façade	167'944 points/m²façade	124'667 points/m²façade
ÉNERGIE GRISE[2]	3'682 MJ-Eq/m²façade	2'653 MJ-Eq/m²façade	2'425 MJ-Eq/m²façade	1'587 MJ-Eq/m²façade
EFFET DE SERRE[3]	169 kg CO2-Eq/m²façade	120 kg CO2-Eq/m²façade	159 kg CO2-Eq/m²façade	113 kg CO2-Eq/m²façade
CONSO. AN. MAZOUT[4]	1.7 l/m²façade	1.2 l/m²façade	1.1 l/m²façade	0.7 l/m²façade

a) La valeur U a été calculée avec le logiciel ENERCAD et prend en compte les affaiblissements thermiques dus à l'ossature bois et à la fixation mécanique du bardage. Le U relatif au standard Minergie des trois premiers cas de figure est légèrement différent car nous avons utilisé des épaisseurs standards du marché (pour la laine de roche, le polystyrène et la laine de bois) et des botteleuses (en moyenne 35 cm d'épaisseur).

b) Toutes les données d'émissions et d'extraction proviennent de la base de données suisses ecoinvent (v 2.01) et sont représentatives pour l'Europe de l'Ouest. La méthodologie de l'analyse en cycle de vie est définie dans les normes ISO 14040:2006 et 14044:2006. Les calculs effectués suivent les procédures de ces 2 normes internationales. L'erreur sur les paramètres introduits (distances et moyens de transport) est faible car le système d'approvisionnement en Suisse est bien connu.

L'écobilan des murs en bottes de paille.
L'analyse en cycle de vie (ACV) est une méthode permettant de quantifier l'impact environnemental d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des ressources premières jusqu'à son élimination.

Les résultats de l'ACV[5] de 1m^2 des quatre types de façade représentées à gauche tiennent compte des phases suivantes du cycle de vie :
-construction de la façade,
-rénovation/entretien de la façade,
-transport des matériaux de construction depuis leur lieu de production jusqu'au chantier final,
-transport et élimination des matériaux en fin de vie.
Les quantités de matériaux de cet écobilan ont été adaptées en fonction de leur durée de vie propre ainsi que de la durée de vie de la façade. (Par exemple, si un crépi de finition a une durée de vie moy. de 20 ans et que la façade a une durée de vie de 60 ans, il est nécessaire de remplacer ce crépi 2 fois, en sus de sa mise en place initiale).

Résultats et conclusion.
La technique paille porteuse (Nebraska) présente le bilan écologique le plus favorable pour tous les indicateurs de performance environnementale choisis et devrait par conséquent être choisie prioritairement. Par rapport à la solution la plus défavorable (parpaings/polystyrène), les gains s'échelonnent entre 37% (CO2-Eq) et 60% (énergie grise). Ceci est d'autant plus intéressant qu'avec ce système, il est possible d'atteindre un coefficient de transmission thermique (valeur U) inférieur ou égale à la limite Minergie-P.

La Technique ossature bois remplissage paille se révèle également intéressante par rapport aux deux premières solutions. Cette technique est toutefois pénalisée, par rapport au monomur en paille, par la nécessité d'une ossature en bois. La préparation du bois implique en effet des processus ayant un impact environnemental plus fort que la préparation de la paille.

Qu'est-ce un habitat sain ?[6]
Un lieu de vie qui agit sur notre bien-être et notre santé. Dans un premier temps, ce sont les facteurs personnels qui influent un habitat sain, puis très rapidement ce sont les facteurs de la construction car nous passons plus de 80% de notre temps à l'intérieur.

Tableau : facteurs de risques de pollution de l'air intérieur d'un bâtiment réalisé en bottes de paille et enduits terre :

Facteurs de risques	Construction paille/terre
POLLUANTS GAZEUX *COV, formaldéhydes*	Pas d'émanation
POLLUANT SOLIDE *Poussières*	Pas d'émanation
MICRO-ORGANISME *Moisissures*	Pas de risque (humidité régulée par le mur)
ODEURS *Emanations*	Odeur de produit naturel neutre
TEMPÉRATURES *Protection hivernale et estivale*	Très bonnes capacités thermiques et déphasage (surchauffe)
HUMIDITÉ *En dessus de 60 %*	Régulation par l'enduit et la paille (paroi perspirante)
RAYONNEMENT *Impression de froid*	Basse effusivité thermique (pas de sensation de froid au droit d'un mur)
BRUITS ET VIBRATIONS *Qualité acoustique*	Très peu de résonnance
RAYONNEMENT IONISANT *Champ hyperfréquence*	Très bonne protection
ELECTROSMOG *Champ électromagnétique*	Pas de propagation

Pour en savoir plus sur les caractéristiques de la paille issue de l'agriculture biologique : c.f. annexe 2, p. 27.

*1 **Les écopoints** permettent d'effectuer une pondération comparative de différentes nuisances sur l'environnement sur la base de valeurs cibles définies par la politique environnementale suisse. (Umweltbelastungspunkte = UBP)*

*2 **L'énergie grise** représente par définition la consommation cumulée d'énergie primaire non renouvelable (Fossile, nucléaire, biomasse issue du déboisement de forêts primaires). Cet indicateur permet des prédictions quant à l'efficience de l'utilisation des ressources. Plus un produit nécessite un grand besoin en énergie primaire non renouvelable, moins ce produit ou service est efficient.*

*3 **L'effet de serre** permet d'évaluer les effets cumulés de l'émission de différents gaz contribuant au réchauffement climatique par rapport au CO_2 (substance de référence).*

*4 **La consommation de mazout** A titre de comparaison, la consommation par an de mazout pour le chauffage et la production d'eau chaude pour un nouveau bâtiment d'habitation Minergie ne doit pas dépasser l'équivalent énergétique de 3.8 l de mazout par m^2 de plancher par an.*

5 Ecobilans et commentaires réalisés par Monsieur Laurent Vorlet, DENA Energie Sàrl.

6 ATBA, STEB, (2008), Vivre dans un logement sain, conférence, écoquartiers-Genève, c.f. www.atba.ch.

« Les grosses bottes carrées représentent le 30% du marché. Une estimation tout-à-fait approximative me laisse penser qu'il y aurait environ 30'000 tonnes de paille locale disponible en grosses bottes carrées en Suisse Romande, soit la moitié du 30% des grosses bottes carrées. »

(La production suisse de petites bottes est presque nulle, les 70% restantes sont donc des grosses bottes rondes. A noter qu'il est possible de rebotteler des grosses bottes en petites bottes.)

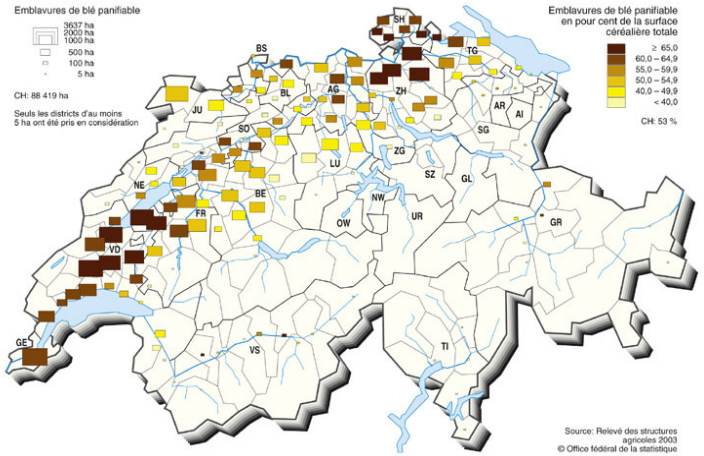
Olivier Sonderegger
directeur de la FSPC
fédération suisse des
producteurs de céréales

Une maison R+1 étage de 200 m² =	
340 m² d'enveloppe	(toiture et sol compris)
1'080 petites bottes de paille	(110 kg/m3)
2'000.- transport compris	(1.- à 2.-/botte)
19 tonnes de paille en vrac	(humidité 13%)
4 hectares de blé	(rendement moyen)
30 ans de blé pour 5 pers.	(cons. moy. pays riches)
48'000 pains de 1 livre	(farine de blé complète)
Un bâtiment en habitat collectif R+2 étages de 540 m² =	
740 m² d'enveloppe	(toiture et sol compris)
2'360 petites bottes de paille	(110 kg/m3)
3'500 .- transport compris	(1.- à 2.-/botte)
26 tonnes de paille en vrac	(humidité 13%)
6.5 hectares de blé	(rendement moyen)
12 ans de blé pour 20 pers.	(cons. moy. pays riches)
78'000 pains de 1 livre	(farine de blé complète)[1]

La paille, longtemps considérée comme un déchet de deuxième catégorie, tend à être revalorisée depuis quelques années. En effet la problématique de l'énergie nous oblige à trouver de nouvelles solutions. Dans ce sens, la paille semble prometteuse :
-En Angleterre, trois centrales à paille produisent de l'électricité depuis plusieurs années. D'autres centrales sont à l'étude en France et même à Genève[2].
-Des projets de biocarburant à partir de paille sont à l'étude dans plusieurs pays d'Europe[3].
-En Europe, en Amérique du Nord et en Australie, les constructions en bottes de paille se multiplient[4].

Actuellement en Suisse, la paille est utilisée principalement pour l'élevage (litière et fourrage). Vu la proportion importante d'élevages en rapport aux cultures céréalières, notre production de paille ne suffit pas et nous importons actuellement de France et d'Allemagne environ 30% de nos besoins en paille[6]. Le volume d'importation a augmenté depuis la hausse des prix des engrais[5] car les agriculteurs-trices l'utilisent à nouveau comme fertilisant. En France, par contre, le surplus de paille représente plus de 25% de la production soit entre 4,1 et 5,8 millions de tonnes[7] de quoi répondre largement à notre demande d'importation.

Dans le cas de la construction en paille, il est important de considérer la production à l'échelle locale afin de réduire le plus possible les transports de matériaux (énergie grise du bâtiment). Le canton de Vaud est le plus gros producteur de paille de Suisse (c.f. carte ci-dessus). En 2007, un peu plus de 33'000 hectares de céréales ont produit 140'000 tonnes de paille redistribuée dans toute la Suisse[8]. Les estimations de M. Sonderegger, directeur de la FSPC[9] (c.f. citation à gauche) atteignent 30'000 tonnes de paille de production locale disponible en Suisse Romande. Soit un potentiel de 1'580 maisons de 200 m² ou 1'153 bâtiments en habitat collectifs de 540 m² par année ! En 2007, dans le canton de Vaud, 597 maisons individuelles et 300 bâtiments de logements collectifs ont été construits[10]. En faisant l'hypothèse optimiste que l'on puisse réaliser un quart de ces bâtiments en bottes l'année prochaine, le volume de paille nécessaire (4'800 t) n'entamerait que de 3,5% les réserves cantonale respectivement 0,7% des réserves nationales. Les répercussions d'une telle hypothèse sur l'augmentation de l'importation de paille en Suisse resterait tout à fait insignifiantes au vu des fluctuations annuelles de production.



Carte montrant le volume de blé produit par région en Suisse (2003), source OFS.

Coûts et marché de la botte de paille.
Le coût d'une construction en bottes de paille réalisée entièrement par des professionnel-le-s est le même que pour une construction conventionnelle. Par contre, il est possible de baisser les coûts de 20% à 50%[11] si les murs en paille et les enduits terre sont auto-construits.

Rappelons que, dans les pays industrialisés, le coût de la construction provient principalement des exigences des utilisateurs-rices et de la main d'oeuvre. En considérant que entre 35% et 40%[12] du budget de la construction d'un bâtiment est destiné au gros-oeuvre, et que, dans le cas de la maçonnerie par exemple, seul 30% de cette part du budget est allouée au matériau brut, les économies ne seront donc possible que sur 10% à 15% du budget final. Les techniques de construction en bottes de paille ont l'avantage d'être accessibles et saines. Les futur-e-s habitant-e-s peuvent facilement envisager de prendre en charge une partie des travaux. En France, 87% des maisons en paille sont auto-construites (270 en 2007[13]).

Dans le cas où l'auto-construction n'est pas envisagée, les entreprises de maçonnerie comme *Arbio SA* à St-Barthélémy[14] (spécialiste chanvre) ou de menuiserie-charpentier, suite à quelques explications de base seront tout à fait aptes à réaliser une construction en bottes de paille. En Suisse, la maison Braun à Disentis a été complètement réalisée par des professionnel-le-s. Dans cette même maison, les économies de chauffage faites grâce aux qualités isolantes des murs atteignent 95%[15].

Quel marché pour la botte de construction ?
Aujourd'hui, le marché de la botte de paille ne représente qu'un revenu mineur pour les producteurs-rices, il permet «d'arrondir les fins de mois». Distribuées de manière informelle ou par l'intermédiaire de grossistes, la production de paille dépend surtout du marché des céréales.
Afin de facilité et encourager le nouveau marché de la botte pour construire il serait intéressant de mettre en place une plate-forme d'offres et de demandes via internet ou par l'intermédiaire de journaux comme «*Terre et nature*».

Réglementation LATC et conformité.
De bonnes performances énergétiques permettent de construire davantage sur une parcelle donnée.

La loi sur l'aménagement du territoire et les constructions (LATC) encourage à construire plus écologique :

al. 3 *« La surface ou le volume supplémentaire des éléments de construction destinés à répondre aux exigences d'isolation et de ventilation supérieures aux normes en vigueur ne sont pas pris en compte dans le calcul des coefficients d'occupation (COS) ou d'utilisation du sol (CUS) et de la hauteur du bâtiment.»*

al. 4 *«Les bâtiments neufs ou rénovés atteignant des performances énergétiques sensiblement supérieures aux normes en vigueur bénéficient d'un bonus supplémentaire de 5% dans le calcul des coefficients d'occupation ou d'utilisation du sol. »*

al. 6 *« L'isolation périphérique nouvelle d'un bâtiment existant peut être posée dans l'espace réglementaire séparant les constructions de la limite de propriété. »*

A noter que, à Lausanne, les parcelles situées en zone mixte de moyenne et forte densité, ainsi qu'en zone urbaine, n'ont pas de COS ni de CUS. Dans ces cas-là, il peut y avoir une dérogation sur la longueur ou la hauteur des bâtiments, mais dans tous les cas en respectant les distances aux limites de propriété (entre bâtiments et vis-à-vis des limites de la parcelle).

Certificat de conformité du matériau.
Afin d'évaluer la faisabilité d'une réglementation suisse de la construction en botte de paille, et à titre d'exemple, l'Institut allemand des techniques de construction a édicté un agrément technique général sur la botte de paille[16] afin de réglementer la taille, la densité, la résistance des ficelles, l'humidité de la botte à la pose, le domaine d'application, etc. (Une traduction française est disponible sur le site internet www.compaillons.fr)

1 Calculé sur la base des statistiques de l'OFS (office des statistiques suisse), www.bfs.admin.ch

2 Projet de Chaudière à paille de Meyrin (GE), No 19 www.agrigeneve.ch

3 Lettre d'information de L'A.G.P.B (céréaliers de France). n°130 (janvier 2001).

4 Pour la France c.f. statistiques de l'asso. empreinte : www.habitat-ecologique.org

5 FUCHS Willy (mars 2007), besoins en constante augmentation, infobox, www.ufarevue.ch

6 SEMMLER Klaus (mai 2008), la paille est à nouveau demandée, infobox, www.ufarevue.ch

7 GAGNAIRE Nathalie, GABRIELLE Benoît, DA SILVEIRA Jeanne (mai 2006), Une approche économique, énergétique et environnementale du gisement et de la collecte des pailles et d'une utilisation pour les filières éthanol, INRA et ADEME, France, 88 pages.

8 Source : OFS

9 Fédération suisse des producteurs de céréales, www.sgpv.ch / www.fspc.ch

10 Source : OFS

11 ENZ D., HATINGS R. (2006), Innovative Wand-konstruktionen für Minergie-P und Passivhaüser, MÜLLER C.F., Suisse, p.42-51 c.f. www.atelierwernerschmidt.ch

12 Calculé selon l'indice zurichois des coûts de la construction de logement, 2001.

13 C.f. 4

14 www.arbio.ch

15 Le temps.ch (17.03.2008), paille qui vaille.

16 Institut allemand des techniques de construction, établissement de droit public (le 10 février 2006), Agrément technique général : Isolant thermique en bottes de paille, Berlin, Allemagne, 5 pages.

	RÉSISTANCES	RISQUES
MATIÈRE PREMIÈRE [ch. 4]	-BONNE RÉSISTANCE AUX CHOCS -LÉGÈRE ET MANIPULABLE SANS MACHINE -NON TOXIQUE	-INFILTRATION D'EAU DANS LA BOTTE -MATÉRIAU PEU HOMOGÈNE
CONCEPTION ET RÉALISATION		
STRUCTURE ET STATIQUE [ch. 2, 3, 4]	-PAS DE RUPTURE ABRUPTE DU MUR (ÉLASTICITÉ) -CAPACITÉ CONTREVENTANTE -MATÉRIAU PORTEUR (ET ISOLANT À LA FOIS) -BONNE RÉSISTANCE SISMIQUE	-TASSEMENT DIFFÉRENCIÉ -TASSEMENT DÛ À DES CHARGES PONCTUELLES (NEIGE)
THERMIQUE [ch. 4]	-PAS DE TASSEMENT DE L'ISOLANT DANS LE TEMPS -BONNE RÉSISTANCE THERMIQUE (ISOLANT)	-PONTS DE FROID ENTRE LES BOTTES -CAPACITÉ ISOL. DIFFÉRENTE SELON LE SENS DES FIBRES
FEU [ch. 5]	-PAS ASSEZ D'OXYGÈNE POUR PRENDRE FEU -NE PROPAGE PAS LA FUMÉE -PAS DE DÉGAGEMENT DE FUMÉES TOXIQUES -MEILLEURE RÉSISTANCE QUE LE BOIS	-MUR DE PAILLE SANS REVÊTEMENTS -PENDANT LE CHANTIER PAILLE EN VRAC SUR LE SOL
REVÊTEMENTS [ch. 2]	-COMPORTEMENT STRUCTUREL COMME UN MATÉRIAU COMPOSITE TERRE/PAILLE -FLEXIBLE ET SIMPLE D'ENTRETIEN -PAS DE DÉGAGEMENT DE PARTICULES CANCERIGÈNES -PAS BESOIN DE PARE-VAPEUR	-FISSURATION EN CAS D'ENDUITS TROP RIGIDES -CONDENSATION À LA JONCTION PAILLE-REVÊTEMENT
HUMIDITÉ [ch. 5]	-AUTO-PROTECTION NATURELLE = CUTICULE CIREUSE -CAPACITÉ PERSPIRANTE ÉLEVÉE -MEILLEURE RÉSISTANCE À LA BIODÉGRADATION QUE LE BOIS -SI BESOIN, REMPLACEMENT AISÉ DE BOTTES DÉTÉRIORÉES	-PASSÉ DE LA BOTTE DE PAILLE -CONDENSATION DANS LA BOTTE -INFILTRATIONS D'EAU DANS LE MUR AU NIVEAU DU TOIT -INFILTRATIONS D'EAU DANS LES TABLETTES DE FENÊTRE -REMONTÉES D'HUMIDITÉ PAR CAPILLARITÉ -MURS PARTICULIÈREMENT EXPOSÉS AUX INTEMPÉRIES
RONGEURS, TERMITES ET INSECTES [ch. 5]	-COMPOSITION TRÈS INDIGESTE (LIGNINE, SILICE) -MUR MAINTENU DANS L'OBSCURITÉ -PAS DE CAS CONNU DE DÉTÉRIORATIONS DÛS AUX INSECTES OU TERMITES	-TROUS OU FISSURES DANS LE REVÊTEMENT OU LE MUR -JONCTIONS MUR-SOUBASSEMENT OU MUR-TOITURE -SOUBASSEMENT TROP BAS -PAILLE HUMIDE -PAILLE CONTENANT DES GRAINES OU DES FLEURS

RECOMMANDATIONS		
- éviter les bottes de paille grises ou noires - stocker les bottes dans un lieu aéré et protégé de l'humidité (sol et ciel) - vérifier que le compactage de la paille atteigne la densité voulue (en vérifiant le poids de la botte) - vérifier la résistance des ficelles (suspendre la botte-test par une de ses ficelles et charger)		**MATIÈRE PREMIÈRE** [ch. 4]
BOTTES PORTEUSES	**OSSATURE BOIS REMPLISSAGE EN BOTTES**	**CONCEPTION**
-poser les bottes à plat -accrocher solidement l'enduit au mur -réaliser une enduit de min. 2 cm d'épaisseur -monter des murs parfaitement d'aplomb -lier le mur au soubassement et à la toiture -précontraindre les murs -vérifier la compression de la botte	-poser les bottes de paille sur champs -entrer en force les bottes de paille dans l'ossature (contreventement) -se conformer à la réglementation sur les ossatures bois	**STRUCTURE ET STATIQUE** [ch. 2, 3, 4]
-caler parfaitement les bottes entre elles -colmater les ponts de froid entre les bottes	-éviter les ossatures bois traversantes du mur -colmater les ponts de froid entre les bottes	**THERMIQUES** [ch. 4]
-poser le revêtement plaqué contre la paille -balayer la paille en vrac pendant le chantier	-poser le revêtement plaqué contre la paille -se conformer à la réglementation-feu sur les ossatures bois (max. R+6) -balayer la paille en vrac pendant le chantier	**FEU** [ch. 5]
-choisir un revêtement protégeant l'intégralité du mur des infiltrations d'eau -choisir un revêtement perspirant (qui laisse passer la vapeur d'eau) -choisir un revêtement flexible, souple, et facile d'entretien -éviter de poser un pare-vapeur -revêtements conseillés : les enduits en terre crue, les crépis à la chaux, et les bardages en bois		**REVÊTEMENTS** [ch. 2]
-réaliser un soubassement d'une hauteur de 30 cm minimum -réaliser un débord de toiture suffisant pour protéger le haut des murs -poser une barrière capillaire entre le soubassement et le mur en paille -poser une étanchéité sous les tablettes de fenêtre -privilégier les fenêtres posées au nu extérieur du mur -poser un revêtement perspirant (vapeur d'eau) sur les 2 faces du murs -réaliser un revêtement bien résistant sur les murs exposés à la pluie battante -contrôler et entretenir les éventuelles fissures du revêtement		**HUMIDITÉ** [ch. 5]
-s'assurer que la paille reste bien sèche -éviter les bottes de paille contenant des résidus de graines -poser si besoin un filet anti-insectes et rongeurs aux jonctions avec le soubassement et la toiture -contrôler et entretenir les éventuelles fissures du revêtement		**RONGEURS, TERMITES ET INSECTES** [ch. 5]

Tableau à gauche : résistances et risques de la construction en bottes de paille et quelques recommandations.

Paille et terre :
Un mariage aux qualités bio-climatiques exceptionnelles.
Les enduits terre, les murs intérieurs en adobe[1] ou en pisé[2] orientés au sud sont de véritables capteurs thermique. Alors que la paille joue le rôle d'isolant, la terre stocke la chaleur de la journée et la redistribue durant la nuit.

A Genève, en 2008, trois murs de 7 mètres de haut ont été réalisés en pisé dans un projet de villa mitoyenne. La terre mise en oeuvre provient directement de l'excavation du sous-sol des futures habitations[3]. La construction en pisé ne date pas d'hier. Ce savoir-faire ancestrale a disparu en quelques années avec l'arrivée des lobbies du béton. En Suisse Romande, plus d'un bâtiment construit en pisé[4] se cachent derrière des crépis de chaux ou de ciment. Aujourd'hui en France, Allemagne, et Autriche, les réseaux de la construction écologique[5] tentent de récupérer ces savoir-faire. La technique du pisé est peu à peu revisitée et réadaptée aux exigences de la construction actuelle.

On peut aussi mentionner la technique de construction appellée *terre coulée*[6]. L'objectif de cette technique est de récupérer la technologie du béton de ciment pour l'adapter à la mise en oeuvre du béton de terre afin de réduire les coûts de la main d'oeuvre particulièrement élevés dans la mise en oeuvre du pisé. La terre coulée permet de réaliser des murs porteurs avec la terre d'excavation du futur bâtiment. Même si les caractéristiques et le fini d'un mur réalisé avec cette nouvelle technique s'apparente beaucoup au béton de ciment toute la différence se situe bien sûr dans l'écobilan.

Cheminée préfabriquées en pisé pour un chalet de Mégève, en haute-Savoie, réalisation Caracol/Akterre.

En Europe, plusieurs bâtiments contemporains privés et publics réalisés en terre ont déjà vu le jour ces dernières années : ci-dessous, école primaire publique en pisé de Veyrins-Thuellin (2006), France, architectes : M. Stefanova et B. Marielle.

Isolant : laine d'herbe[7].
La laine d'herbe est une nouvelle matière isolante naturelle et renouvelable, produite à partir de fibres extraites de l'herbe des prés.

Dans le procédé de production de la laine d'herbe, les matières digestibles sont séparées des fibres pour être valorisées séparément. Un liant et des sels minéraux sont ajoutés pour la protection contre le feu, les champignons et les rongeurs.
Le procédé utilise les surfaces d'herbe de façon très efficace: 200 m^3 de laine d'herbe peuvent être produits par 1 ha de pré. Cela permet l'isolation de 7 maisons familiales. Pour fournir 5% du marché des isolants en Suisse, il ne faudrait qu'une surface d'environ 1000 ha, soit seulement 0.1% de la surface total des pâturages. Il n'y aurait aucune concurrence avec la production alimentaire.

Données techniques

Conductivité thermique	0.034–0.038 W/mK
Densité	30–80 kg/m^3
Combustibilité	normalement inflammable
Résist. à la diffusion de vapeur	1–2

Isolant : fibre de cellulose[8].
La fibre de cellulose est un matériau d'isolation thermique fait à partir de journaux recyclés, il est employé pour remplir les cavités de toit, de mur, de plancher et de plafond.

Cet isolant, réglementé en Suisse, améliore l'ambiance dans le bâtiment grâce à sa capacité de diffusion de vapeur, la capacité de réguler la température, d'absorber l'humidité et de la redistribuer doucement. Il protège la structure et la maintient sèche, prolongeant la vie du bâtiment, en particulier les armatures et constructions en bois.

Il est injecté par soufflage à sec dans les cavités à l'aide de tuyaux et peut également être appliqué par vaporisation humidifiée avant que le mur soit fermé.

Données techniques

Conductivité thermique	0,040 W/mK
Densité	40-70 kg/m^3
Combustibilité	normalement inflammable
Résist. à la diffusion de vapeur	1–2

A consulter aussi :

CRATerre, HUBEN Hugo, HUBERT Guillaud (2006), Traité de construction en terre, Ed Parenthèse, Marseille, France, 355 pages.

KRUMM Olivier (2008), Le renouveau du pisé dans le bassin genevois : Construction de trois murs trumeaux pour un projet de maisons individuelles contiguës. mémoire du DSA-terre, ENSAG, Grenoble, France, 61 pages.

---

1 Adobe : brique de terre crue moulée.

2 Pisé : terre compactée ou pisée à l'aide de pisoirs pneumatiques par couche de dix centimètres dans des banches (coffrages) à béton. Les murs d'un épaisseur min. de 40 cm sont porteurs.

3 Grand-Sconnex (GE), 3 villas mitoyennes Minergie-Eco, conception et réalisation bureau S2vD et atelier d'architecture ATBA (2008).

4 ROLAND I., ACKERMANN I., HANS-MOËVI M., ZUMKELLER D.(2006.), Les maisons rurales du canton de Genève, Éditions Slatkine et Société suisse des traditions populaires, Genève.

5 www.asterre.org
www. reseau-ecobatir.asso.fr
wwww.craterre.archi.fr

6 GIRARD Quantin, DARLES Guillaume, STARZINEK Viktor, PETIT, Antony (2008), Projet de fin d'étude : la terre coulée, IUT, dept. génie civil, Lyon, France, 17 pages.

7 www.granitherm.ch

8 www.isofloc.ch/cms

conclusion

Maison de vacances et atelier Fliri, architecte Atelier Werner Schmidt (2007), Graun, Autriche (sud du Tirol).

En conclusion, cette étude démontre l'intérêt qu'il y aurait à développer chez nous l'utilisation de la paille dans la construction. C'est un matériau disponible localement, son bilan écologique est excellent, et il est susceptible de répondre aux plus hautes exigences en matière d'isolation thermique (MINERGIE-P-ECO) et de résistance au feu (s'il est correctement mis en œuvre). Il contribue à créer un lieu de vie confortable et sain. Les constructions en paille ne sont pas plus coûteuses que celles réalisées avec les matériaux traditionnels. En outre, la mise en oeuvre est simple ce qui favorise largement l'auto-construction. La paille représente donc une alternative intéressante vis-à-vis des matériaux de construction usuellement utilisés tels que le bois ou la maçonnerie.

La construction en paille, dont on pourrait penser qu'elle s'adresse à l'habitat individualisé (villas, maisons mitoyennes, habitats groupés) ne se réduit pas uniquement à ce domaine. A titre d'exemple, nous pouvons citer la réalisation du bâtiment collectif Strohpolis en Allemagne (cf. couverture), dans le domaine des bâtiments publics, l'école du Colibri en France et le HOK straw building aux Etats-Unis (c.f. page 4) et, dans le domaine de la rénovation, le centre culturel et environnement Frédéric Back de la ville de Québec lequel a été recouvert d'une double-peau en bottes de paille afin d'améliorer les performances thermiques du bâtiment (c.f illustration à droite).

En Suisse, l'atelier d'architecture Werner Schmidt, ainsi que le HTW de Coire n'ont pas attendu une réglementation en rapport avec ce matériau pour se lancer dans la réalisation de plusieurs maisons de paille. Depuis, les demandes se multiplient. Un permis de construire pour une maison de paille vient d'être accordé à Morrens dans la Canton de Vaud. D'autres projets sont à l'étude.

Notons qu'au niveau Européen le processus d'investigation et de réalisation est maintenant bien engagé! L'Autriche, qui est à l'avant-garde en matière de recherches et réglementations de la construction en bottes de paille, ouvre une voie concrète au vaste domaine d'application de ces techniques de construction.

L'expérience du prototype de maison en paille autrichien S-Hause[1] permet aujourd'hui de mieux appréhender les performances d'un bâtiment en bottes de paille dans sa globalité. La S-Hause est l'un des premiers bâtiments appliquant le facteur 10. C'est à dire qu'il consomme 10 fois moins de ressources et d'énergie lors de sa construction et de son usage qu'un bâtiment de surface et d'usage égal[2] !

La construction en paille souffre toutefois chez nous d'handicaps et de réticences certains, à savoir :

- *Une absence d'expérience et d'intérêt de la part des professionnel-le-s de la construction.*
- *Une absence de filière organisée production-fourniture-utilisation.*
- *Une image de marque trompeuse soit, celle d'un matériau à haut risque en matière d'inflammabilité, non durable, et qui peine à se défaire d'un caractère uniquement agricole.*

Double-peau en bottes de paille, rénovation du centre Frédéric Back, (2006), Québec, Brière Gilbert et associé.

1 GrAT (Gruppe Angepasste Technologie) (2005), Planen und bauen für die Zunkunft : Das S-Hause, Technischen Universität Wien, www.grat.tuwien.ac.at, Vienne, Autriche, 34 pages.

2 La S-hause (stroh-hause) a été construite en collaboration entre une équipe de recherche autrichienne (GRaT), l'architecte Jorg Scheicher pionner de l'Eco-design et le ministère du Travail et de la Recherche autrichien.

RÉSEAUX ET ASSOCIATIONS

Europe

Allemagne	FASBA : www.fasba.de
	www.strawblehouse.de
Autriche	www.baubiologie.at
	GrAT : www.grat.tuwien.ac.at
	www.hausderzukunft.at
Belgique	www.inti.be/ecotopie/ballots.html
France	Les Compaillons, www.compaillons.fr
	La Maison en Paille :
	www.lamaisonenpaille.com
	Association Botmobil www.botmobil.org
	Enquête paille par l'asso Empreinte :
	www.habitat-ecologique.org
(Terre)	CRATerre, France www.craterre.archi.fr
	Asso. des professionnel-le-s terre crue :
	www.asterre.org
Gd-Bretagne	Amazonails :
	www.strawbalefutures.org.uk
Suisse	www.atelierwernerschmidt.ch

Amérique du Nord

USA	Builders Without Borders (BWB) :
	www.builderswithoutborders.org
	California Straw Building (CASBA) :
	www.strawbuilding.org
	Ecological Building Network (EBNet) :
	www.ecobuildnetwork.org
Canada	(CMHC/SCHL) : www.cmhc.ca

Océanie

Australie	www.strawbale.archinet.com.au

CONSTRUCTION EN BOTTE DE PAILLE

Monographies

AMAZON NAILS (2001), *Information guide to straw bale buildind, Amazon nail, Todmorden*, England, www.strawbalefutures.org.uk, 78 pages.

BROSSAMAIN V., THEVARD J.B. (mars 2006), *Construire son habitation en paille selon la technique du GREB*, 2ème édition, Québec, 112 pages.

DE BUTTER André (2004), *Bâtir en paille : guide pratique de la construction en paille*, Ed. La maison en paille, Champmillon, France, 102 pages.

GRUBER Astrid et Herbert (2003), *Construire en paille aujourd'hui,* Ed. terre vivante, France.

KANDE Hamdou (2007), *La Paille, du champ à la construction, pour une performance énergétique du bâtiment*, Ed.nature et progrès, Belgique, 32 pages.

KING Bruce, MARK Aschheim (2006), *Design of Straw Bale Buildings: The State of the Art*, ED Green Building Press, 260 pages.

MACDONALD S.O (1999), *La construction en botte de paille- Guide Illustré*, v.f (2003) La Maison en Paille, www.lamaisonenpaille.com, original réalisé par BWB www.builderswithoutborders.org

MINKE Gernot, MAHLKE Friedemann (2005), *Buiding with straw : Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Ed Birkäuser, Suisse, 143 pages.

ENZ Daniela, HATINGS Robert (2006), *Innovative Wandkonstruktionen für Minergie-P und Passivhaüser,* MÜLLER C.F., Suisse, p.42-51 c.f. www.atelierwernerschmidt.ch

RIJVEN Tom (2007), *Entre paille et terre*, Ed. goutte de sable, La Roussière, France, 159 pages.

Etudes et doctorats

CARL J.Mas, EVERBACH E. Carr (1995), *Acoustica characterization of straw as structural elements*, Swarthmore College, dept. ingénieurs, USA.

DE HALLER Alban (2008), *Bâtir une colonie de vacances en botte de paille, Denezy (VD), Master en architecture*, Enoncé théorique, EPFL, Lausanne, 194 pages.

DEMARQUE Julien (2007-2008), *Accompagnement d'une demande d'avis technique sur un procédé d'isolation en botte de paille*, ENSTIB, rapport de stage, 43 pages.

FAINE Michae, ZHANG John, I (juillet 2002), *A pilot study examining the strength, compressibility and serviceability of rendered straw bale walls for two storey load bearing construction*, University of Western Sydney, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, 14 pages.

GAGNAIRE Nathalie, GABRIELLE Benoît, DA SILVEIRA Jeanne (mai 2006), *Une approche économique, énergétique et environnementale du gisement et de la collecte des pailles et d'une utilisation pour les filières éthanol*, INRA et ADEME, France, 88 pages.

GrAT (Gruppe Angepasste Technologie) (2005), *Planen und bauen für die Zunkunft : Das S-Hause, Technischen Universität Wien*, www.grat.tuwien.ac.at, Vienne, Autriche, 34 pages.

GRELAT Alain (Juillet 2004), *Utilisation de la paille en parois de maison individuelles à ossature bois*, programme de recherche national ADEME, FFB, CEBTP, St-Remy les Chartreuse, www.econologie. com/file/technologie_energie/Dossier_Ademe_Paille.pdf, 32 pages.

GUARINO Felice (2006-2007), *Aus ertung autarkes wohnen, HTW Chur, Hochschule für technik und Wietschaft*, Coire, Suisse, 27 pages.

KING Bruce (1996), *Buildings of earth and straw*. Ecological Design Press, californie, USA.

KING Bruce (2003), *Lead-bearing straw bale construction*, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, California, Usa, 17 pages

KING Bruce (2004), *Straw bale construction*, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, California, USA, 5 pages.

LERNER K., DONAHUE K. (2003), *Structural Testing of Plasters for Straw Bale Construction*, EBNet, http://www.sustainable.doe.gov/codes/azstraw.shtml

REINSCHMIDT Jan, Prof. Dr.-Ing DANIELEWICZ I. (2007), *Loadbearing strawbale building Elastomechanic tests with big bales*, Universitiy of applied science Magdeburg Stendal, Hochschule Magdeburg-Standal (FH) Interim Report v.e., 24 pages.

Dan Smith (juin 2003), *Creep in bale walls*, DSA Architects, Berkeley, USA, 9 pages.

STRAUBE John (juillet 2003), *Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings*, Canada Mortgage and Housing Corporation, EBNet, www.ecobuildnetwork.org, 53 pages.

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr Innovation und Technologie in Zusammenarbeit mit asbn und StrohTec (2001), *Haus der Zunkunft, Wandsystem aus Nachwachsenden Rohstoffen*, Vienne, Autriche, 114 pages.

WIHAN Jakub (Juillet 2007), *Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw*, University of East London School of Computing and Technology, 271 pages.

WALKER Peter (mai 2004), *Compression load testing straw bale walls*, Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath, 10 pages.

Revues
LA MAISON ECOLOGIQUE n°48 (décembre 2008, janvier 2009), *Maison paille c'est du solide*, France, p.23-33.

LA REVUE DURABLE n°19 (février-mars 2006), *Des maisons chaudes et bon marché en paille*, Fribourg, p.30-32.

LA SCIENCE ET LA VIE (mai 1921), *Fraîches en été, chaudes en hiver, les maisons de paille sont avant tout économiques, France*, 8 pages.

LE MONITEUR ARCHITECTURE amc n°81 (septembre 2008), *Expérimenter la paille*, Suisse, 4 pages.

Documentaire visuel
SNEL Heidi (2004), *Bâtir en botte de paille : redécouverte d'un ancien matériau de construction*, Heid Snel Okofilm Production, www.ecofilm.de

Normes
Magistrat der Stadt Wien, 4 mai 2004, *Prübericht über die Brennbarfeit von Strohballen*, Gruppe Angepasste Technologie, Technische Universität.

Magistrat der Stadt Wien, 6 octobre 2000, *Prübericht über das Brandverhalten einer Strohballenwand (mit Innen und Aussenputz)*, Gruppe Angepasste Technologie, Technische Universität

Magistrat der Stadt Wien, 6 novembre 2000, *Prübericht über die Messung der Wämeleitfähigkeit von Strohballen*, Gruppe Angepasste Technologie, Technische Universität

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW) 02 mai2003, Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612.

Institut allemand des techniques de construction, établissement de droit public (le 10 février 2006), *Agrément technique général : Isolant thermique en bottes de paille*, v.f www.compaillons.fr., Berlin, Allemagne, 5 pages.

ISOLATION ÉCOLOGIQUE
OLIVA Jean-Pierre (2001), *L'isolation écologique, conception, matériaux, mise en œuvre*, Ed. terre vivante, Mens, France, 237 pages.

CONSTRUCTION EN TERRE
CRATerre, HUBEN Hugo, HUBERT Guillaud (2006), *Traité de construction en terre*, Ed Prenthèse, Marseille, France, 355 pages.

JEANNET Jacky, PIGNAL Bruno, SCARATO Pascal (2001), *Bloc de terre crue, Pisé, terre d'avenir*, Auvergne, France, 49 pages.

GIRARD Quantin, DARLES Guillaume, STARZINEK Viktor, PETIT, Antony (2008), *Projet de fin d'étude : la terre coulée*, IUT, dept. génie civil, Lyon, France, 17 pages

LA REVUE DURABLE n°19 (février-mars 2006), *CRATerre tourne l'architecture en terre crue vers l'avenir*, Fribourg, p.41-44.

CONSTRUCTION EN CHAUX
Ecole d'Avignon (2003), *Techniques et pratique de la chaux*, Ed.Eyrolle, Paris, 225 pages.

ECOBILANS
JOLLIET Olivier, SAADE Myriam, CRETTAZ Pierre (2005), *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écolbilan*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 242 pages.

HABITAT SAIN
ATBA, FUCHS Stéphane et collaborateurs, STEB (service de toxicologie de l'environement bâti), DALANG Felix, (janvier 2008), *Vivre dans un logement sain,* conférence débat, écoquartiers-Genève, c.f. www.atba.ch.

Annexes.

Annexe 1 :

Hypothèses de l'écobilan (ACV) comparatif de 1 m² de façade, (chapitre 6) :

- *durée de vie de la façade est de 60 ans,*
- *la durée de vie des éléments massifs (parpaings et bois) est fixé à 60 ans (durée de la façade),*
- *la durée de vie des isolants conventionnels est fixée à 30 ans, sauf pour la variante ossature bois + laine de verre où elle a été fixée à 60 ans,*
- *la durée de vie de la paille est fixée à 60 ans,*
- *la paille est issue d'une culture dite de production intégrée,*
- *la paille ne contient pas de substances autres que naturelles (pas de substances anti-feu, anti-acariens, etc.),*
- *le transport des matériaux de construction se fait en fourgon 3.5 t ou en camion 20-28t,*
- *les distances de transport entre les sites de production des matériaux de construction et le chantier sont identiques aux valeurs moyennes de 2008,*
- *l'élimination des matériaux de construction se fait par les voies légales et les pratiques habituelles en vigueur en 2009.*

Annexe 2 :

Qu'en est-il de la paille issue de l'agriculture biologique?

A ce jour aucune étude approfondie n'a encore été menée sur les différences de qualité entre la botte de paille issue de l'agriculture conventionnelle et celle issue de cultures biologiques. Selon l'artisan constructeur paille français Tom Rijven la paille biologique a une meilleure résistance à l'humidité grâce à la pellicule de cire naturelle recouvrant la paille. Dans le cas de la paille non-biologique cette couche disparaît sous l'action des fongicides. Par contre les bottes de pailles biologique ne sont pas aussi homogène (d'autres plantes sont mêlées à la paille) que les autres.

Selon l'étude anglaise de WIHAN Jakub (Juillet 2007) la fertilisation du sol et l'utilisation de fongicides augmente jusqu'à 150% la vitesse de biodégradation d'un brin de paille : ce sont les tiges qui contiennent le taux le plus élevé de nutriment. En terre fertilisée chimiquement, ce taux élevé aide à la prolifération de bactéries et champignons alors que les fongicides réduisent les protections naturelles de la paille. Cette même étude recommande de ne pas dépasser 2 kg/ha/an de fongicides. La paille biologique dont les tiges contiennent moins de nutriments est plus résistante à la biodégradation.

crédits

Etude commandée par la ville de Lausanne

POUR LE COMPTE DE L'AGENDA 21

Direction des travaux
Service d'architecture
18, rue du Port-Franc
1002 Lausanne

Lausanne, mars 2009

Etude réalisée par :

ATBA
L'atelier, bureau d'architectes SA
8, rue des Vieux-grenadiers, GE
www.atba.ch
FUCHS Stéphane,
architecte HES

Collaborateur
KRUMM Olivier,
architecte DPLG/DSA-terre

En collaboration avec

***CAUDERAY Elsa**,*
architecte EPFL/DSA-terre

Ecobilan réalisé par :

DENA Energie Sàrl
Monsieur Laurent Vorlet,
analyse énergétique
du bâtiment et du territoire