

Évaluation de la performance environnementale de la technique de construction en adobe

Paula HIGUERA¹

1 GPEM-MAST, Université Gustave Eiffel, F-44344 Bouguenais, France

RESUME L'objectif de l'article est d'évaluer la performance environnementale de la technique de construction en terre d'adobe par le biais d'un modèle ACV paramétré basé sur une analyse de sensibilité, de scénarios et de parties prenantes afin d'identifier les acteurs impliqués dans la génération des impacts ainsi que leurs leviers d'action. L'approche qui a été réalisée pour évaluer la technique de construction en adobe nous a permis d'identifier que la stabilisation avec du ciment et de la chaux, le transport des matériaux, le type de stockage de la terre, les processus mécanisés et le type de terrain transformé sont les principaux aspects sur lesquels reposent les impacts environnementaux. En outre, un seul acteur économique a été identifié comme le principal acteur impliqué dans le contrôle des leviers d'action pour minimiser les aspects environnementaux.

Mots-clés ACV, adobe, construction durable, performance environnementale

I. INTRODUCTION

La construction traditionnelle en terre a connu une renaissance remarquable au cours des dernières décennies, liée à la prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, notamment dans le secteur de la construction, dont le défi majeur dans les années à venir, est de trouver des solutions de construction ayant un faible impact sur l'environnement en termes de consommation de ressources, de production de déchets, de changement climatique et de biodiversité. En ce sens, la construction en terre apparaît comme une alternative intéressante car elle privilégie les matériaux locaux et les circuits courts [1]–[4].

Cependant, malgré les efforts réalisés par les acteurs du secteur de la construction en terre sur le territoire français, les outils d'écoconception permettant d'identifier les bénéfices et les limites environnementales de ces techniques, dès la phase de conception, sont encore rares. De plus, la méthode normative de l'ACV fournit rarement des informations suffisantes et claires pour la prise de décision, en raison de l'incertitude des données, de leur approche moyennée qui empêche d'identifier les effets de solutions différentes, et de la difficulté pour les décideurs d'interpréter les résultats quantitatifs.

Ces limites méthodologiques ont déjà été abordées et ont conduit à une nouvelle approche appelée « ACV orientée action » [5]. Cette méthode combine des inventaires paramétrés de modèles de processus dans le système de premier plan (qui est la partie du système sous l'influence directe des décideurs [6]), avec l'analyse de sensibilité (AS). Ce type de méthode a été développé en détail [7] puis améliorée et appliqué sur diverses études de cas : le béton de chanvre, la culture des micro algues et la durabilité du béton [8]–[10]. Cependant, dans ces divers cas d'étude, le système de premier-plan correspond à un seul acteur correspondant à un procédé bien identifiés, dont les

paramètres sont essentiellement de nature physicochimique. Or dans notre cas, plusieurs acteurs sont concernés, et ils peuvent faire de nombreux choix, chacun générant une série de scénarios possibles. Ces choix se traduisent en modélisation par des paramètres discontinus codés (qualifiés de discrets au sens mathématique), par exemple : choix 1, choix 2, ... choix n. Ce type de paramètre n'est pas analysable par des méthodes AS car la valeur du paramètre (1, 2, ..., n) n'a pas de sens physique. La méthode « ACV orientée action » [5] doit donc intégrer une amélioration méthodologique afin de réaliser l'évaluation environnementale systématique de nombreux scénarios. Dans cet article, nous cherchons à appliquer le modèle "ACV orienté action" à l'évaluation d'une des techniques de construction en terre, la technique de l'adobe. Les adobes sont des éléments de maçonnerie qui sont moulés à l'état plastique, séchés et utilisés pour la construction de murs porteurs ou de cloisons.

Le problème des nombreux scénarios est résolu en en générant systématiquement tous les scénarios possibles de construction en adobe, ce qui permet, d'une part, une analyse de contribution pour identifier les processus et paramètres sur lesquels reposent les impacts environnementaux de la construction en adobe et, d'autre part, une analyse de responsabilité pour identifier les acteurs impliqués dans la génération des impacts, ainsi que leurs leviers d'action.

I. METHODES

A. Principes de la méthode « ACV orientée action »

La méthodologie initiale de « l'ACV orientée action » [5] suit six étapes principales :

1. Développement d'un modèle paramétrique détaillé des divers procédés du système de premier plan. Ce modèle paramétrique est caractérisé par un ensemble de paramètres continus des différents processus.
2. Catégorisation de chacun des paramètres du modèle comme contrôlable ou non contrôlable par un ou plusieurs acteurs du système de premier-plan.
3. Identification d'une distribution de probabilité pour chaque paramètre continu.
4. AS de Morris [11], appliquée sur les paramètres continus du modèle listés afin de les classer par ordre d'influence sur chaque indicateur environnemental et en déterminer le sens et la forme de cette influence. Cette méthode d'AS repose basée sur l'hypothèse de l'indépendance des paramètres.
5. Identification des leviers d'action définis comme les paramètres continus de premier plan contrôlables et ayant une influence significative sur au moins un impact environnemental.
6. Comparaison des résultats d'indicateurs d'impact pour les scénarios par indicateur pour lesquels les valeurs des leviers d'actions sont fixés à leurs valeurs les plus favorables (scénario symbolisé « + » et minimisant la valeur de l'indicateur) et défavorables (scénario symbolisé « - » et minimisant la valeur de l'indicateur). Les paramètres n'étant pas identifiés comme leviers d'action (non influents sur l'ensemble des indicateurs) sont fixés à leur valeur moyenne.

B. Adaptation de la méthode « ACV orientée action » à un grand nombre de scénarios

La problématique des nombreux scénarios est à la fois de nombreuses valeurs de paramètres discrets avec des paramètres de modèles physiques de processus qui dépendent parfois de ces paramètres discrets. Par exemple, le procédé de stabilisation de la terre peut être modélisé comme un processus physique ayant recours à des paramètres continus tels que le pourcentage de sable, de ciment ou d'eau à ajouter. Cependant, l'occurrence du processus de stabilisation lui-même est conditionné par un paramètre discret correspondant au choix d'avoir recours ou non à la stabilisation de la terre. Ainsi, tous les paramètres continus liés au procédé de stabilisation doivent régulièrement prendre une valeur nulle lorsque le choix de l'acteur indique le non-recours à ce procédé. Les simulations doivent tenir compte de cette dépendance. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter de nouvelles étapes à la méthode initiale « d'ACV orientée action » [5]. Ces étapes sont numérotées dans l'ordre de leur réalisation en complément de celles indiquées dans la section précédente :

- La première étape (0) consiste à établir un organigramme des décisions possibles à chaque étape du système. Cet organigramme reflète l'ensemble des choix. La valeur du code détermine alors l'exclusion ou non d'un processus qui en dépend dans le système, ce qui équivaut mathématiquement à attribuer une valeur nulle ou non nulle au flux de référence du processus considéré.
- Une étape (4b), consiste à générer de manière systématique l'ensemble des scénarios possibles. Un scénario est défini comme une combinaison de choix. Le nombre total de scénarios possibles est donné par l'équation (1).

$$S_t = k_1 * \dots * k_i \quad (1)$$

Avec S_t le nombre total de scénarios, k le nombre de choix possibles par paramètre discret et i le nombre de paramètres discrets du modèle.

- Une étape (5b) consiste à classer l'ensemble des scénarios identifiés selon chaque indicateur environnemental. L'intervalle de variabilité pour chaque impact environnemental est construit à partir de la valeur d'impact minimale et maximale obtenues sur l'ensemble des scénarios testés S_t . Lors de ce calcul, les valeurs des paramètres continus du modèle sont fixées à leur valeur par défaut (moyenne).
- Une étape (5c) consiste à calculer les incertitudes sur les résultats à partir de la propagation des incertitudes des paramètres continus contextuels (non contrôlables) par simulation de Monte Carlo. Lors de ce calcul, les valeurs des paramètres continus décisionnels (contrôlables) du modèle sont fixées à leur valeur par défaut (moyenne).
- Une étape (6b) consiste à croiser les valeurs favorables des paramètres continus avec celles des scénarios pour chaque indicateur afin d'identifier les meilleures solutions et en tenant compte de leurs significativités au regard des incertitudes.

Pour mener à bien cette démarche un programme de simulation des scénarios, des processus et de leurs inventaires de cycle de vie a été développé à l'aide d'Excel utilisant des données de la base de données Ecoinvent 3.7.1. Cet outil a ensuite été couplé à trois scripts principaux en langage Python qui permettent : l'AS des paramètres continus du modèle, le calcul des impacts environnementaux des scénarios générés et l'évaluation de l'incertitude des paramètres contextuels. Ces scripts ont été développés à l'aide des bibliothèques SALib [12] et Brightway2 [13].

III. Analyse du cycle de vie

A. Objectif et champ d'application

Le modèle se concentre sur l'ACV de la phase de construction d'un mur d'adobe qui est réalisée "du berceau à la porte" et illustré dans la Figure 1. Le flux de référence est défini comme 1m² de mur porteur en adobe. Deux voies principales sont considérées selon que les briques d'adobe sont fabriqués sur le site de construction ou qu'elles sont fabriquées industriellement (hors site) et vendues prêtes à l'emploi.

B. Modélisation du système de premier plan

Les inventaires du système de premier plan sont basés sur la modélisation de onze sous-processus (Figure 1). Les intervalles de variation des paramètres ont été définis selon des avis des experts et/ou en se basant sur le guide des bonnes pratiques pour l'adobe [14]. Le modèle comprend 27 paramètres qui sont décrits dans le Tableau 1.

Tableau 1 Description des paramètres du modèle – Notation des paramètres : première lettre P = paramètre, seconde lettre D = décisionnel ou C=contextuel ; troisième lettre D = discret ou C = continu ; numéro du paramètre

Id	Description du paramètre	Unité	Min	Max	Acteur concerné
PDD-1	Type de terrain transformé (site industriel=1; site agricole=2; forêt = 3; pâturage =4; site urbain =5)	-	1	5	Maître d'ouvrage public/privé
PDD-2	II Type de stockage de la terre récupérée hors site de construction (milieu urbain/industriel= 1; milieu rural = 2)	-	1	2	
PDD-3	Criblage de terre sur site de construction (si non = 0 si oui = 1)	-	0	1	Entreprise gros œuvre/second œuvre
PDD-4	Concassage de terre sur site de construction (si non = 0 si oui = 1)	-	0	1	
PDD-5	Malaxage mécanique sur site de construction (si non = 0; si oui et malaxeur mécanique= 1; si bétonnière électrique =2; si bétonnière diesel =3)	-	0	3	
PDD-6	Manutention de levage pour la mise en œuvre du mur (si non = 0 si oui = 1)	-	0	1	
PDD-11	Préfabrication en atelier de construction des éléments constructifs (si oui=1; si non=0)	-	0	1	
PDC-1	Pourcentage massique de produits fabriqués utilisés dans le m ² de mur (BTC, adobes, pisé ou bauge)	%	0%	100%	
PDC-2	Pourcentage massique de terre récupérée hors site de construction pour la fabrication de matériaux sur le chantier (Adobe-Bauge)	%	0%	100%	
PDC-5	Distance de transport ¹	km	0	50	
PDC-6	Distance de transport ²	km	0	500	
PDC-11	Coefficient massique de chaux à ajouter en chantier (Adobe)	%	0%	15%	
PDC-12	Coefficient massique de sable à ajouter en chantier (Adobe)	%	0%	15%	
PDC-13	Coefficient massique de ciment à ajouter en chantier (Adobe)	%	0%	15%	
PDC-14	Coefficient massique de fibres à ajouter en chantier (Adobe)	%	0%	5%	
PDC-20	Coefficient massique de sable à ajouter (mortier)	%	0%	60%	
PDC-21	Coefficient massique de chaux à ajouter (mortier)	%	0%	15%	
PDC-22	Coefficient massique de ciment à ajouter (mortier)	%	0%	15%	
PDC-27	Longueur des briques adobes	m	0,35	0,45	
PDC-28	Largueur des briques adobes	m	0,25	0,3	
PDC-29	Epaisseur des briques adobes	m	0,04	0,15	
PDC-30	Epaisseur de la couche de mortier pour la mise en œuvre d'un mur en briques adobes	m	0,01	0,015	
PDC-31	Surface totale bâtie	m ²	10	2500	
PCC-1	Masse volumique sèche de la terre	t/m ³	1	1,7	-
PCC-2	Coefficient de teneur massique naturelle d'eau de la terre	%	0%	40%	-
PCC-3	Hauteur du tas pour le stockage	m	0,1	1	-
PCC-4	Durée de stockage de terre	année	0,01	3	-

¹ Transports courtes distances : briques entre l'atelier de fabrication et le site de construction - des stabilisants - équipements et engins de chantier

² Transports longues distances : terre entre site d'extraction et site de transformation - terre entre site de stockage secondaire et site de transformation

La combinaison systématique de chacune des valeurs de chaque paramètre décisionnel discret aboutit à générer 640 scénarios différents (voir équation 1) et numérotés de 1 à 640. La description des inventaires du cycle de vie des sorties et des entrées des systèmes de premier plan pour l'ensemble des scénarios identifiés pour chaque technique et pour chaque cas est disponible à l'annexe 1.

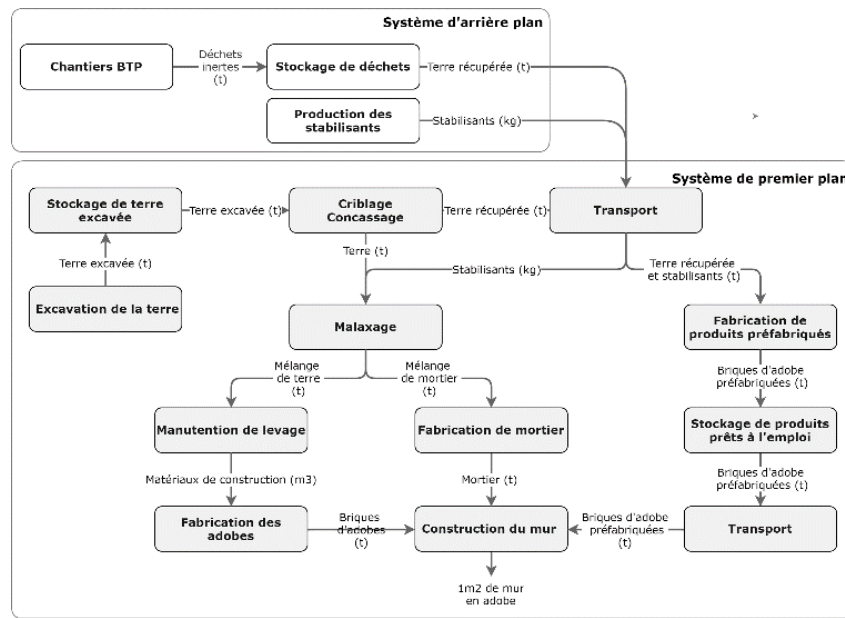


Figure 1. Système d'ACV pour la construction d'1 m² de mur en terre en adobe

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Analyse de sensibilité sur les paramètres décisionnels continus

Le Tableau 2 présente les paramètres décisionnels continus classés par ordre d'influence pour chaque indicateur environnemental. Quatre aspects majeurs de cette analyse de sensibilité peuvent être mis en évidence :

1. À l'exception des paramètres relatifs à la taille des briques (PDC-27/28/29) et à la surface bâtie (PDC-31), les paramètres continus du modèle ont une influence croissante (ce qui signifie que plus la valeur du paramètre est élevée, plus l'impact généré est important) et que leurs valeurs favorables sont leurs valeurs minimales dans leurs intervalles de variation.
2. La taille de la brique affecte l'indicateur formation de particules de manière décroissante (PDC-27/28/29). Deux raisons peuvent expliquer ce résultat. D'une part, une même surface de mur nécessite un plus grand nombre de briques si elles sont petites. Le temps de fabrication et la quantité de mortier augmentent avec le nombre de briques. Si les mortiers contiennent du liant (ciment, chaux), les impacts augmentent considérablement.
3. L'utilisation de liants est très influente sur la plupart des impacts environnementaux (principalement les indicateurs d'acidification, de changement climatique, d'eutrophisation des eaux douces et terrestres), de manière plus importante lorsqu'il s'agit de la stabilisation au ciment (PDC-13/22), puis à la chaux (PDC-11/21).
4. L'origine de la terre utilisée (PDC-2) (plus précisément la terre récupérée hors site), l'origine des briques utilisées (PDC-1) (plus précisément celles achetées prêtes à l'emploi), ainsi que les distances de transport longues (PDC-6), ont également une influence importante, bien que plus modérée que celle des liants, sur tous les indicateurs environnementaux.

5. La durée du stockage (PCC-4) a une influence significative sur l'indicateur d'occupation des sols.
6. La surface totale bâtie (PDC-31) a une influence décroissante sur l'indicateur d'appauvrissement de la couche d'ozone.
7. Les paramètres décisionnels influents identifiés sont tous attribués au même acteur économique : l'entreprise de gros œuvre et de second œuvre.

Tableau 2 Paramètres classés par ordre d'influence pour chaque indicateur

ID	Indicateur environnemental	Classement des paramètres influents						
		1	2	3	4	5	6	7
IE1	Acidification	PDC-13	PCC-1	PDC-11	PDC-2	PDC-1	PDC-14	PDC-22
IE2	Changement Climatique	PDC-11	PCC-1	PDC-11	PDC-2	PDC-22	PDC-21	PDC-1
IE3	Eutrophisation : Eau Douce	PCC-1	PDC-11	PDC-11	PDC-1	PDC-2	PDC-22	PDC-21
IE4	Eutrophisation : Terrestre						PDC-14	PDC-22
IE5	Formation D'ozone Photochimique : Santé Humaine				PDC-2	PDC-1	PCC-2	PDC-6
IE6	Utilisation Des Sols	PCC-4	PDC-2	PCC-3	PCC-1	PDC-14		PDC-1
IE7	Toxicité Humaine : Cancérigène	PDC-1	PCC-1	PDC-2	PDC-13	PDC-11		PDC-6
IE8	Ressources Matérielles : Métaux/Minéraux		PDC-13	PCC-1	PDC-2		PDC-14	PDC-22
IE9	Écotoxicité : Eau Douce	PDC-2	PCC-1	PCC-2	PDC-6	PDC-1		PDC-13
IE10	Appauvrissement De L'ozone			PDC-11	PDC-13	PCC-2	PDC-6	PDC-31*
IE11	Ressources Énergétiques : Non-Renouvelables	PCC-1	PDC-2					PDC-1
IE12	Eutrophisation : Marine		PDC-14	PDC-13	PDC-11	PDC-2	PDC-1	PDC-29*
IE13	Rayonnement Ionisant : Santé Humaine		PDC-13	PDC-11	PDC-2	PCC-2	PDC-6	PDC-22
IE14	Toxicité Humaine : Non Cancérigène	PDC-14	PCC-1	PDC-2	PDC-13	PDC-11	PCC-2	PDC-6
IE15	Utilisation De L'eau			PDC-13	PDC-11	PDC-1		-
IE16	Formation De Matières Particulaires	PDC-29*	PDC-2	PCC-1	PDC-27*		PDC-13	PDC-28*
	Paramètres relatifs à la stabilisation de la terre. PDC-14 : stabilisation avec des fibres ; PDC-13/22 : stabilisation avec du ciment et PDC-11/21 : stabilisation avec de la chaux							
	Paramètres contextuels. PCC-1 : masse volumique sèche de la terre ; PCC-2 : coefficient de teneur massique naturelle d'eau ; PCC-3 : hauteur du tas pour le stockage et PCC-4 : durée du stockage							
	Distance de transport							
	Paramètres liés à la taille des briques							
	Utilisation de briques préfabriquées prêtes à l'emploi							
	Pourcentage de terre récupérée hors site de construction							
	Surface bâtie							

* Paramètre décroissant

B. Analyse de la variabilité et de l'incertitude

Parmi les variables non contrôlées, introduisant de l'incertitude, la masse volumique de la terre sèche PCC-1 et la teneur en eau naturelle de la terre PCC-2 sont les plus influentes sur l'ensemble des impacts évalués. Le tableau 3 présente les valeurs des intervalles de variabilité fournis par les paramètres continus contrôlables et l'intervalle d'incertitude fourni par les paramètres continus non contrôlables du modèle. Les résultats montrent que les paramètres continus non contrôlables n'apportent pas une incertitude très importante sur la plupart des indicateurs considérant que l'intervalle d'incertitude est en général moins élevé que l'intervalle de variabilité liés aux paramètres contrôlables.

C. Analyse de scénarios

Le tableau 4 contient chaque scénario qui minimise au moins un impact environnemental. Deux groupes de scénarios sont identifiés par cette analyse. Le premier groupe est constitué de 11 scénarios sur 640 qui minimisent l'impact d'occupation de sols (IE6) uniquement. Le second groupe est constitué de 17 scénarios, qui minimisent l'ensemble des autres impacts environnementaux considérés.

On identifie également deux scénarios qui minimisent tous les impacts environnementaux : le 261 et le 294. Ces deux scénarios correspondent à des chantiers en zones urbaines, avec un stockage

de la terre excavée qui se fait sur site ou bien de la terre est récupérée hors site dans une zone rurale, et où la majorité des processus de fabrication et de construction de la terre lors des chantiers de construction sont effectués manuellement. La seule différence entre ces scénarios est le choix d'utiliser ou non un engin de manutention de levage qui est négatif pour le scénario 261 et positif pour le 294. Cependant, ces deux scénarios ne sont pas nécessairement applicables dans la pratique. En effet, stocker des matériaux dans une zone rurale, pour un chantier qui se déroule dans une zone urbaine impliquerait un transport que ces scénarios ne prennent pas en compte et qui aurait des répercussions sur les impacts environnementaux. En ce sens, les scénarios 261 et 294 ne sont pas des scénarios plausibles, car ils sont construits sans tenir compte d'une incompatibilité de choix. Le scénario le plus proche applicable dans la pratique est celui pour lequel le stockage des matériaux a lieu dans une zone urbaine. Ce scénario correspond au 583, qui prend bien en compte le transport additionnel et qui, lui, ne minimise que 15 des 16 impacts environnementaux considérés.

Tableau 3. Intervalle de variabilité et d'incertitude des paramètres continus du modèle

ID impact (1)	Intervalle de variabilité		Intervalle de incertitude		Unité
	min	max	min	max	
IE1	0,01	0,53	0,03	0,45	mol H+- Eq
IE2	3,17	183,23	12,79	159,15	kg CO2-Eq
IE3	4E-04	0,01	1E-03	0,01	kg P-Eq
IE4	0,04	1,67	0,11	1,44	mol N-Eq
IE5	0,01	0,41	0,03	0,34	kg NMVOC-Eq
IE6	483,30	8491,85	1475,18	5051,86	points
IE7	6E-08	3E-06	2E-07	2E-06	CTUh
IE8	3E-06	4E-04	2E-05	4E-04	kg Sb-Eq
IE9	2,34	197,20	7,71	140,39	CTUe
IE10	2E-07	2E-05	2E-05	1E-05	kg CFC-11-Eq
IE11	20,85	1427,10	88,87	1129,23	MJ
IE12	0,01	0,18	0,01	0,15	kg N-Eq
IE13	0,12	9,18	0,83	7,40	kg U235-Eq
IE14	2E-06	2E-05	3E-06	1E-05	CTUh
IE15	0,26	27,82	1,16	23,51	m3
IE16	2E-06	1E-05	2E-06	1E-05	Incidence maladies

(1) ID identifiant de l'impact environnemental (voir Tableau 2)

Tableau 4. Scénarios de construction en adobe qui minimisent les impacts environnementaux

ID impact / ID scénario	IE1	IE2	IE3	IE4	IE5	IE6	IE7	IE8	IE9	IE10	IE11	IE12	IE13	IE14	IE15	IE16	Total indicateur minimisé
35																	1
79																	15
103																	1
108																	15
115																	15
130																	15
147																	15
213																	15
254																	15
256																	15
257																	1
261																	16
294																	16
310																	1
315																	15
322																	15
334																	1
373																	15
394																	1
486																	1
490																	15
494																	15
502																	1
508																	15
513																	1
583																	15
Total scénarios minimaux	17	17	17	17	17	11	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	

D. Conclusions

Le modèle développé a permis d'identifier les paramètres de la construction en adobe responsables de la génération des impacts environnementaux ainsi que les incertitudes du modèle.

Le modèle permet de trouver des solutions mathématiquement optimales qui ne sont pas nécessairement des solutions réalisables dans la pratique. D'un point de vue méthodologique, la construction des scénarios par combinaison systématique des valeurs des paramètres, nécessite une analyse préalable des possibles incompatibilités entre certains choix qui doit conduire à éliminer certains scénarios avant le calcul. C'est une analyse importante à intégrer dans les étapes de la méthode. Cette étape de fiabilisation des scénarios doit être réalisée avec les professionnels pour être plus pertinente.

Les meilleurs scénarios ont en commun de ne pas utiliser de liants, de minimiser l'utilisation de briques prêtes à l'emploi et de minimiser le transport des matériaux. La stabilisation de la terre, en particulier avec du ciment et de la chaux, contribue de manière très significative aux impacts environnementaux évalués.

Ces recommandations sont basées sur une analyse de la performance environnementale à l'échelle du mur, mais pour un bâtiment, l'ensemble des éléments qui le composent (fondations, ouvertures, enduits...) et leurs interactions doivent également être pris en compte. Ce travail doit permettre à terme de créer des profils types murs en terre crus, basés sur des performances environnementales équivalentes et utilisables à l'échelle d'un bâtiment

Des travaux complémentaires sont également nécessaires aussi pour explorer les aspects sociaux et économiques de la construction en pisé afin d'aboutir à une réflexion complète.

REFERENCES

- [1] U. Röhlen et C. Ziegert, *Construire en terre crue : construction, rénovation, finitions*. Editions Le Moniteur, 2013.
- [2] J. C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, et P. Walker, « Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction », *Building and Environment*, vol. 36, n° 10, p. 1119-1126, déc. 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00054-8.
- [3] B. Little et T. Morton, *Building with earth in Scotland: Innovative design and sustainability*. Great Britain, Scottish Executive, Central Research Unit, 2001.
- [4] M. Estrada, « A case study of cob earth based building technique in Matagalpa, Nicaragua – LCA perspective and rate of adoption », Mid Sweden University, Master's Thesis International Master's Programme in Ecotechnology and Sustainable Development, 2013.
- [5] Andrianandraina, A. Ventura, T. Senga Kiessé, B. Cazacliu, R. Idir, et H. M. G. van der Werf, « Sensitivity Analysis of Environmental Process Modeling in a Life Cycle Context: A Case Study of Hemp Crop Production », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 19, n° 6, p. 978-993, 2015, doi: 10.1111/jiec.12228.
- [6] R. Frischknecht, *Life cycle inventory analysis for decision-making: Scope-dependent inventory system models and context-specific joint product allocation*. ETH Zurich, 1998.
- [7] A. Andrianandraina, « Approche d'éco-conception basée sur la combinaison de l'Analyse de Cycle de Vie et de l'Analyse de Sensibilité. », 2014.
- [8] C. Duran Quintero, A. Ventura, O. Lépine, et J. Pruvost, « Eco-design of spirulina solar cultivation: Key aspects to reduce environmental impacts using Life Cycle Assessment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 299, p. 126741, mai 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126741.
- [9] T. Senga Kiessé, A. Ventura, H. M. G. van der Werf, B. Cazacliu, R. Idir, et Andrianandraina, « Introducing economic actors and their possibilities for action in LCA using sensitivity analysis: Application to hemp-based insulation products for building applications », *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, p. 3905-3916, janv. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.069.
- [10] A. Ventura, T. Senga Kiessé, A. Andrianandraina, R. IDIR, et H. Van Der Werf, « Action-oriented Life Cycle Assessment: case study of hemp based insulation products for buildings », in *19th LCA case studies symposium*, Rome, Italy: SETAC, nov. 2013. Consulté le: 29 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01199461>
- [11] M. D. Morris, « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments », *Technometrics*, vol. 33, n° 2, p. 161-174, 1991.
- [12] J. Herman, « SALib Documentation ». 8 février 2023.
- [13] C. Mutel, « Brightway2 LCA framework », *Brightway2 LCA framework*, 24 avril 2023. <https://brightway.dev/> (consulté le 24 janvier 2023).
- [14] Confédération de la construction en terre crue, « Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue : brique ». 2018. Consulté le: 6 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.asterre.org/media/pages/la-terre-crue/ressources-documentaires/les-guide-de-bonnes-pratiques/cfcb2213ce-1662375862/gbp_brique_20-web.pdf
- [15] SETRA et LCPC, « Stockage de granulats : aires de stockage ». Cerema (ex-Setra), 1 mars 1981.
- [16] *Mine and Mill Equipment Costs: An Estimator's Guide 2008*. InfoMine USA, Incorporated CostMine Division, 2019.

ANNEXE 1

Processus	Flux	Unité	Type de flux		Modèle simplifié	Détails du modèle
			I-O ^A	E-IN ^B		
Excavation	Quantité de terre extraite (sèche)	m ³	O*	E	$V_{\text{terre sèche}} * \sum \% \text{Origine}_{\text{Terre}} = 1\text{m}^3$	V _{terre sèche} : volume de terre sèche Origine Terre: pourcentage de terre utilisée selon l'origine
	Excavation, chargeuse compacte ou pelle hydraulique	m ³	I	IN	$\frac{(V_{\text{terre humide}} + V_{\text{terre végétal e}})}{2}$	V _{terre humide} : volume de terre humide V _{terre végétale} : volume de terre végétale (environ 30% par m ²)
Transport	Distance massique transportée	t ³ km	O*	IN	Transport _m = d _{transport} * m _{terre humide}	d _{transport} : distance de transport m _{terre humide} : masse de terre humide
	Transport, fret, camion >31	t ³ km	I	IN		
	Masse de terre humide	t	I	IN	$m_{\text{terre humide}} = \frac{m_{\text{terre sèche}}}{1 - h}$	m _{terre humide} : masse de terre humide m _{terre sèche} : masse de terre sèche h: teneur naturelle d'eau de la terre
Stockage couvert	Surface de stockage dans le hall du bâtiment	m ²	O*	IN	$\text{Aire}_{\text{stockageTerre}} = \frac{m_{\text{terre humide}}}{\text{Hauteur}_{\text{tas}}} + 1,4 * \text{Hauteur}_{\text{tas}}$	Aire _{stockageTerre} : Surface de stockage m _{terre sèche} : masse de terre sèche Hauteur _{tas} : Hauteur du tas de terre
	Bâtiment, hall	m ²	I	IN		
	Masse de terre humide	t	I	IN	$m_{\text{terre humide}} = \frac{m_{\text{terre sèche}}}{1 - h}$	m _{terre humide} : masse de terre humide m _{terre sèche} : masse de terre sèche h: teneur naturelle d'eau de la terre
Stockage non couvert	Surface de stockage	m ² *année	O*	E/IN	Stockage _{terre} = 2 * Aire _{stockageTerre} * DuréeSto _m	Stockage _{terre} : Surface de stockage par année Aire _{stockageTerre} : Surface de stockage ¹ DuréeSto _m : Durée de stockage
	Occupation	m ² *année	I	E/IN		
Mécanisation de processus de criblage, concassage et malaxage	Quantité de terre mécanisée	t	O*	IN	$m_{\text{terre humide}} = \frac{m_{\text{terre sèche}}}{1 - h}$	m _{terre humide} : masse de terre humide m _{terre sèche} : masse de terre sèche h: teneur naturelle d'eau de la terre
	Huile de graissage	kg	I	IN	m _{lubrifiantCR} = Cons _{lubrifiant} /horaire * m _{terre humide}	m _{lubrifiantCR} : masse de lubrifiant utilisée par l'équipement Cons _{lubrifiant/horaire} : consommation de lubrifiant de l'équipement horaire ² m _{terre humide} : masse de terre humide
	Machine industrielle, lourde, non spécifiée	kg	I	IN	Infrac _{crib} = $\frac{\text{temps}_{\text{usg}}}{\text{VU}_{\text{crib}}} * m_{\text{crib}}$	Infrac _{crib} : infrastructure de l'équipement Temps _{usg} : temps d'utilisation de l'équipement VU _{crib} : vie utile de l'équipement (25 années)
	Acier, faiblement allié	kg	I	IN	m _{Puacier} = Cons _{acier} /horaire * m _{terre humide}	m _{Puacier} : masse d'acier pour les pièces d'usure de l'équipement Cons _{acier/horaire} : consommation d'acier de l'équipement horaire ² m _{terre humide} : masse de terre humide
	Consommation énergétique	kWh	I	IN	Cons _{equipe M} = Cons _{equipe M} /horaire * m _{terre humide}	Cons _{equipe M} : consommation énergétique de l'équipement Cons _{equipe M/horaire} : consommation énergétique de l'équipement horaire ² m _{terre humide} : masse de terre humide
Stabilisation	Quantité du stabilisant	kg	O*	IN	m _{composant} = m _{terre sèche} * (Cof _{composantCH})	m _{composant} : masse du stabilisant m _{terre sèche} : masse de terre sèche Cof _{composantCH} : Coefficient de stabilisation
	Stabilisant	kg	I	IN		
Fabrication des adobes	Quantité de briques d'adobe	unités	O*	IN	$\text{Nom}_{\text{briques}} = \frac{V_{\text{mur}}}{V_{\text{brique}} + V_{\text{mortier}}}$	Nom _{briques} : nombre de briques V _{mur} : volume du mur en terre V _{briques} : volume de la brique en terre V _{mortier} : volume de la couche de mortier
	Infrastructure du moule	m ³	I	IN	Infras _m = $2 * \left(\frac{\text{temps}_{\text{usg}}}{\text{VU}_m}\right) * ((\text{Hr}_m * \text{Epr}_m) + (\text{Lgr}_m + \text{Ar}_m))$	Infras _m : infrastructure du moule Temps _{usg} : temps d'utilisation du moule VU _m : vie utile du moule (8 années) Ar _m : Epaisseur de la brique Epr _m : Epaisseur du moule Hr _m : Hauteur du moule Lgr _m : Longueur du moule
	Déchets de bois	m ³	O	IN		
	Bois de sciage, bois léger	m ³	I	IN	Bois _m = (2 * Hr _m * Epr _m) + (Lgr _m + Ar _m)	Bois _m : Volume de bois du moule Ar _m : Epaisseur de la brique Epr _m : Epaisseur du moule Hr _m : Hauteur du moule Lgr _m : Longueur du moule
Transformation de terrain	Surface transformée	m ²	O*	E	Surf _{trans} = 10 * Epaisseur _{mur}	Surf _{trans} : Surface transformée Epaisseur _{mur} : Epaisseur du mur en adobe
	Transformation, vers l'urbain	m ²	I	E		

^A I: flux d'entrée et O: flux de sortie

^B E: flux élémentaire et I: flux intermédiaire

* Flux de référence du processus

¹ Calcul basé dans le modèle de développée par [15]

² Données extraites de [16]