



Formulation du projet :

**« Promotion des pratiques de Gestion Durable des Terres pour restaurer
et améliorer les stocks de carbone grâce à l'adoption d'initiatives
d'habitat vert en milieu rural »**



REPUBLIQUE DU SENEGAL
Un Peuple - Un But - Une Foi

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE**

***DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DES ETABLISSEMENTS CLASSES***

**Étude portant sur la technologie Voûte Nubienne
comme modèle de construction**

**-
RAPPORT FINAL**

Date : 17/04/15

Consultant chargé de l'étude :



Bruno JARNO, TONO Conseils

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	2
DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	5
1. RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE.....	5
2. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	5
3. DEROULE DE L'ETUDE.....	6
PARTIE I :.....	8
ETAT DES LIEUX.....	8
1. L'HABITAT RURAL AU SENEGAL.....	9
1.1. Démographie.....	9
1.2. Situation de l'habitat au Sénégal.....	10
1.2.1. Matériaux de construction.....	10
1.2.2. Le parc bâti sénégalais.....	13
1.2.3. Le marché de la construction neuve au Sénégal.....	15
2. LA TECHNOLOGIE VOÛTE NUBIENNE.....	17
2.1. Aspects techniques.....	17
2.2. Vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne.....	19
2.3. Résultats, effets et impacts.....	20
2.4. La Voûte Nubienne au Sénégal.....	21
2.4.1. Acteurs de la diffusion de la technologie VN au Sénégal.....	21
2.4.2. Parc bâti en Voûte Nubienne.....	22
2.4.3. Formation de maçons et entreprises.....	24
2.4.4. Aspects économiques.....	24
3. SITUATION ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU SENEGAL.....	25
3.1. Changement climatique.....	25
3.1.1. Contribution au changement climatique.....	25
3.1.2. Vulnérabilité face aux changements climatiques.....	26
3.2. Situation énergétique.....	27
3.2.1. Energie.....	27
3.2.2. Electricité.....	27
3.3. Bases de données environnementales et facteurs d'émissions.....	27
3.3.1. Base de données environnementales.....	27
3.3.2. Facteurs d'émission de la consommation d'électricité au Sénégal.....	28
3.3.3. Détermination du facteur d'émission du bois construction pour le Sénégal.....	30
PARTIE II : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MODELES D'USAGES DE BATIMENTS.....	31
1. Description de la méthodologie utilisée.....	32
2. Analyse qualitative des besoins en construction et définition des modèles d'usage.....	34
3. Définition des techniques de construction.....	36
4. Estimation des quantitatifs de matériaux pour chaque technique.....	37
5. Évaluation des phases « construction » et « entretien du bâti ».....	40
5.1. Principe du calcul.....	40

5.2. Hypothèses de calcul.....	41
5.2.1. Estimation des impacts liés à la fabrication des matériaux.....	41
5.2.2. Estimation des impacts liés au transport.....	42
5.2.3. Mise en œuvre.....	43
5.2.4. Entretien du bâti.....	43
5.3. Résultats obtenus.....	44
5.3.1. Modèle d'usage : Petite habitation.....	44
5.3.2. Modèle d'usage : autres usages.....	45
6. Évaluation de la phase « utilisation des bâtiments – besoins de rafraîchissement ».....	47
6.1. Définition de la plage de confort thermique.....	48
6.2. Instrumentation thermique comparative.....	49
6.2.1. Protocole de mesure.....	49
6.2.2. Résultats obtenus.....	50
6.3. Simulation thermique dynamique.....	54
6.3.1. Hypothèses de calcul et protocole suivi.....	54
6.3.2. Résultats obtenus.....	56
7. Synthèse des résultats obtenus.....	60
PARTIE III : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DU PROJET.....	61
1. Sites retenus pour le projet.....	62
1.1. Échelle d'intervention.....	62
1.2. Localisation.....	62
2. Besoins en construction.....	66
3. Définition de la situation de référence du marché de la construction.....	68
4. Résultats attendus en terme de constructions.....	71
5. Évaluation environnementale du projet.....	73
5.1. Introduction.....	73
5.2. Synthèse des résultats.....	74
5.2.1. Émissions de gaz à effet de serre.....	74
5.2.2. Énergie finale électrique non consommée pour les besoins de rafraîchissement.....	76
5.2.3. Suppressed Demand.....	77
6. Projections à 25 ans.....	78
PARTIE IV : MODALITES DE VULGARISATION DE LA TECHNOLOGIE VN.....	80
1. Analyse des politiques réglementaires et institutionnels.....	81
1.1. Environnement.....	81
1.2. Bâtiment.....	83
2. Freins identifiés et défis à relever.....	84
3. Analyse des acteurs et projets.....	86
3.1. Analyse des acteurs.....	86
3.2. Analyse des projets.....	87
3.2.1. Agence Nationale des Ecovillages.....	87
3.2.2. Projet TYPHA.....	88
3.2.3. Projet PNEEB.....	89
4. Mise en œuvre.....	90
4.1. Réalisabilité du projet.....	90
4.1.1. Pertinence en réponse aux besoins.....	90
4.1.2. Aspects innovants.....	90
4.1.3. Durabilité et pérennité.....	90
4.2. Activités.....	91
4.2.1. L'appui au développement d'un marché rural de bâtiments privés d'habitation.....	91
4.2.2. L'appui au développement d'un marché de bâtiments publics et communautaires.....	91
4.2.3. La formation et le renforcement de capacités des acteurs du bâtiment.....	92
4.2.4. La mise en place et la structuration d'une filière habitat adapté au Sahel.....	92

4.3. Suivi et évaluation.....	93
4.3.1. <i>Liste des chantiers réalisés</i>	93
4.3.2. <i>Méthodologie de suivi-évaluation</i>	93
4.4. Financements.....	93
4.4.1. <i>Financement Carbone</i>	93
4.4.2. <i>Financement des constructions</i>	94
4.5. Liens avec la Gestion Durable des Terres.....	95
4.6. Gestion environnementale : Encadrement de l'extraction du banco.....	95
4.7. Outils de sensibilisation et de plaidoyer.....	97
BIBLIOGRAPHIE.....	98
GLOSSAIRE.....	102
ANNEXES.....	103
1. Photographies de l'habitat rural au Sénégal.....	104
2. Photographies du parc bâti Voûte Nubienne au Sénégal.....	106
3. Listes des entretiens réalisés.....	108
4. Étude environnementale du projet.....	110
5. Étude environnementale des modèles d'usage de bâtiments.....	111

DEMARCHE METHODOLOGIQUE

1. RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et son Protocole de Kyoto sont au cœur des tentatives internationales pour une prise en compte effective des questions liées aux changements climatiques. Dans son article 2, la convention a pour objectif de «réaliser la stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».

La réalisation de cet objectif nécessite une politique de développement intégrant une atténuation des émissions des GES, la réduction de la vulnérabilité et l'adaptation aux changements climatiques. Dans le cadre de l'atténuation, outre le mécanisme pour un développement propre (MDP) et les nouveaux mécanismes de marché actuellement développés, le Sénégal s'est lancé dans plusieurs programmes et projets d'évitement et d'absorptions des émissions de GES. C'est dans ce cadre que le Fonds Mondial pour l'Environnement avec l'appui technique du Ministère en charge de l'Environnement a initié le Projet « Promotion des pratiques de Gestion Durable des Terres pour restaurer et améliorer les stocks de carbone grâce à l'adoption d'initiatives d'habitat vert en milieu rural » qui est à sa phase exploratoire.

L'objectif du projet est de contribuer à la promotion des bonnes pratiques de GDT et de l'adaptation de l'habitat rural au changement climatique par la vulgarisation d'un modèle d'habitat « Voûte Nubienne » qui stimule l'économie locale et les emplois verts. De manière résumée, deux aspects sont à considérer dans ce projet : une restauration des terres dégradées et une meilleure efficacité énergétique avec le modèle d'habitat la voûte nubienne dans les zones cibles.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude traite spécifiquement de la technologie Voûte Nubienne comme modèle de construction.

1. Le premier objectif consiste en l'évaluation des gains potentiels en terme environnemental (émissions de gaz à effet de serre et efficacité énergétique) de la technique de construction Voûte Nubienne, en premier lieu à l'échelle des bâtiments, en réponse à des besoins d'usages qualitatifs, puis à l'échelle de territoires entiers, en réponse à des besoins de bâtiments quantifiés.

2. Le second objectif est de formuler des recommandations sur la méthode de vulgarisation de la technique Voûte Nubienne, afin qu'elle se diffuse efficacement sur les territoires sénégalais retenus et au niveau national, en tenant compte des aspects politiques, institutionnels, financiers, des éléments d'appréciation sur la pertinence du projet et des éléments de communication à produire.

3. DEROULE DE L'ETUDE

L'étude s'est déroulée de décembre 2014 à avril 2015 selon le calendrier suivant :

DATES	PHASES	DESCRIPTIF SUCCINCT
Décembre 2014 - Janvier 2015	Phase préparatoire	- Planification de l'étude - Prises de contact - État des lieux
19 Janvier – 05 février 2015	Mission de terrain au Sénégal	- Rencontres des différentes parties prenantes, collecte d'informations, visites de chantiers et bâtiments, instrumentation thermique
03 février 2015	Réunion de restitution à « mi-parcours », Dakar	- Présentation de l'état d'avancement de l'étude et des premiers résultats au comité de coordination - Recueil des questionnements
Février – mars 2015	Traitement et analyse des informations	- Modélisation environnementale des bâtiments - Modélisation environnementale du projet - Modalités de vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne
Mars – avril 2015	Synthèse	- Rédaction du rapport final

Les activités menées dans le cadre de cette étude ont été regroupées en 4 grands thèmes qui correspondent aux présentes parties de cette étude :

- État des lieux
- Évaluation environnementale des modèles d'usage de bâtiment
- Évaluation environnementale du projet
- Modalités de vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne

THEME	ACTIVITES	Objectifs spécifiques
ETAT DES LIEUX	État des lieux dans le contexte sénégalais : habitat, énergie et changement climatique	- Disposer d'éléments factuels clairs afin de cadrer l'étude dans le contexte Sénégalais ; - Sélectionner les bases de données environnementales des matériaux, énergie et systèmes énergétiques les plus appropriées pour l'étude
EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MODELES D'USAGE DE BATIMENT	Analyse qualitative des besoins en construction et définition des modèles d'usage	- Définir les « Unités Fonctionnelles de l'Habitat » pour l'étude : quels services compare-t-on (logement, salle de réunion,...) ?
	Définition des techniques de construction	- Définir à quelles techniques disponibles, la technique Voûte Nubienne va être comparée. Quelles techniques sont les plus représentatives du secteur de la construction au Sénégal ?
	Estimation des quantitatifs de matériaux pour chaque technique	- Évaluer les quantités de matériaux nécessaires pour construire chaque modèle d'usage répondant aux besoins
	Étude comparative du confort thermique et de la performance énergétique	- Quel comportement thermique du bâti pour chaque technique ? - Quel ressenti des occupants ? - Quelle zone de confort ?

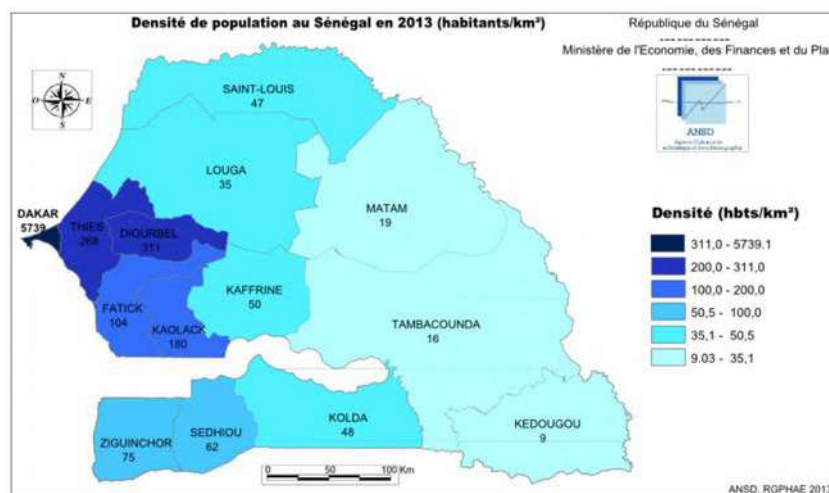
THEME	ACTIVITES	Objectifs spécifiques
EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DU PROJET	Quantification des impacts environnementaux	- Évaluer l'impact environnemental des bâtiments sur toute leur durée de vie
	Synthèse des résultats par modèles d'usage	- Analyser et synthétiser les impacts pour chaque technique et chaque modèle d'usage
	Identification des sites retenus	- Définir les périmètres géographiques de mise en œuvre du projet
	Analyse quantitative des besoins en construction	- Connaître les besoins totaux et les besoins exprimés en construction des sites retenus
	Analyse comparative des impacts environnementaux du projet	- A partir de l'impact environnemental des modèles d'usages, extrapoler sur les besoins en bâtiment, les impacts environnementaux du projet
MODALITES DE VULGARISATION DE LA TECHNOLOGIE VN	Synthèse des résultats	- Analyser et synthétiser les impacts pour chaque site, sur la durée du projet, puis à long terme
	Conception et fourniture d'un outil numérique paramétrable de quantification environnementale du projet	- Permettre au projet de disposer d'un outil paramétrable permettant d'ajuster la quantification environnementale aux futurs développement du projet
	Analyse stratégique et institutionnelle	- Comprendre le cadre institutionnel du projet pour formuler la stratégie correspondante
	Analyse financière	- Fournir des ordres de grandeur de coûts quant aux réalisations des bâtiments
	Analyse des acteurs et des projets complémentaires	- Mener le projet en incluant les acteurs dans l'action et évaluer les potentiels de synergies
	Justification et pertinence du projet	- Évaluer la pertinence du projet en terme de réalisabilité et de réponse aux besoins
	Outils de sensibilisation et de plaidoyer	- Exprimer les besoins en outils de communication pour la phase opérationnelle du projet

PARTIE I : ETAT DES LIEUX

1. L'HABITAT RURAL AU SENEGAL

1.1. Démographie

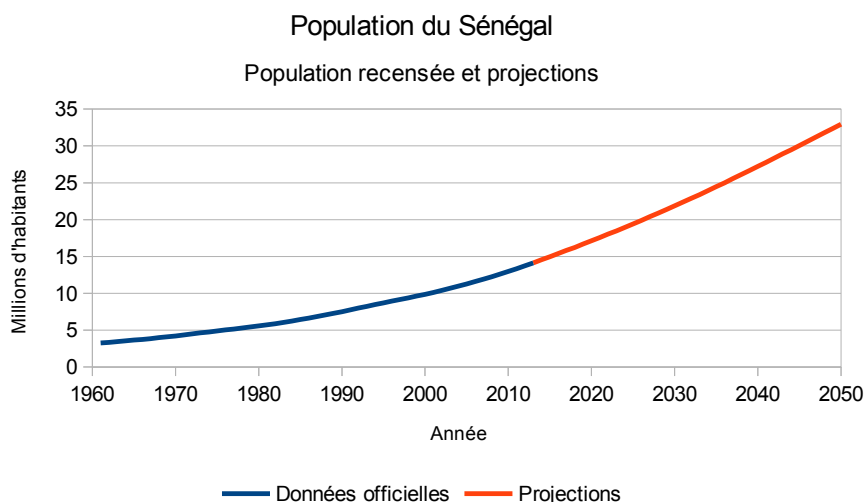
Selon le recensement Général de la Population, de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage 2013 (ANSD, 2013), la population vivant au Sénégal s'élève à 13,51 millions d'habitants. Cette population est très inégalement répartie sur le territoire puisque Dakar concentre à elle seule 3,14 millions d'habitants sur la presqu'île du Cap-Vert.



Densité de population au Sénégal en 2013, source : ANSD, RGPHAE 2013

La population rurale s'élève à 7,41 millions d'habitants soit un taux d'urbanisation de 45 % au niveau national, mais seulement de 30 % si l'on exclut la région de Dakar. Le taux d'urbanisation était de 41 % en 2002 et il devrait atteindre 60 % à l'horizon 2050 selon UN Habitat (World Urbanization Prospects, 2014).

La croissance démographique atteint 2,5 % sur la période 2002-2013 (dont 1,7 % d'accroissement pour les zones rurales). Les projections démographiques prévoient 19,41 millions d'habitants en 2025 et 32,93 millions d'habitants en 2050.



1.2. Situation de l'habitat au Sénégal

1.2.1. Matériaux de construction

La majorité des matériaux utilisés dans le bâtiment au Sénégal sont issus de ressources nationales : ciment, sable, granulats, une partie du bois, fibres végétales, et bien sûr la terre. L'exploitation et les prélèvements de ces ressources sont responsables pour la plupart d'impacts environnementaux majeurs, à l'exception de la terre crue. Pour couvrir la demande du marché, et parce la ressource devient rare et protégée, du bois d'oeuvre est importé de l'étranger. Le métal (acier, aluminium,...) est également importé de l'étranger avant d'être transformé en produits de construction dans des unités sénégalaises. L'étude « *Profil du Secteur du Logement* » (UN Habitat, 2012) fournit un état des lieux détaillé des matériaux de construction utilisés au Sénégal, dont certains éléments sont reproduits ici.

1.2.1.1. Matériaux issus de ressources nationales

CIMENT

Le ciment constitue l'un des principaux intrants pour l'activité de construction. L'existence de minerais de calcaire, particulièrement à Bargny dans la région de Dakar, à Pout, Bandia, Popenguine et Mbour dans la région de Thiès, ainsi que dans la vallée du fleuve Sénégal, a permis la création d'unités de production de ciment : la SOCOCIM, les Ciments du Sahel et Dangote Ciment plus récemment. Cette production locale de ciment répond à la demande intérieure de façon adéquate. Une bonne partie est exportée dans la sous-région ouest-africaine. Les ventes locales de ciment étaient de : 1 265 000 tonnes en 2000, 2 057 000 tonnes en 2005 et 2 131 000 tonnes en 2009.

Source : UN Habitat, 2012



Vue aérienne de l'unité de production SOCOCIM à Rufisque

SABLE DE PLAGE

Le sable de plage entrait jusqu'à peu dans la fabrication de presque tous les bétons et mortiers au Sénégal. Dans un pays qui possède 700 km de côtes dont une bonne partie de plages, la demande en sable de plage ne cesse de

croître. L'exploitation accrue des carrières de sable de plage pour la construction amplifie l'impact environnemental désastreux de cette pratique : disparition des plantations forestières destinées à fixer les dunes, érosion côtière, avancée de la mer. L'État a récemment instauré des restrictions sévères concernant les autorisations d'exploitation de carrières de sable. Le durcissement de la réglementation et du contrôle n'est pas sans effet sur le prix du sable, qui a augmenté de façon nette. L'exploitation se tourne vers le sable de dunes, qui pose les mêmes problèmes environnementaux, le sable de carrière et le sable de concassage.

Source : UN Habitat, 2012

LATERITE / TERRE CRUE

80 % du territoire national est recouvert de latérite, dont les dimensions granulométriques vont de dimensions fines à des enrochements et qui, de par leurs bonnes caractéristiques de surface peuvent servir de bons granulats à béton courant.

Source : UN Habitat, 2012

La terre crue, appelée également banco, est encore utilisée dans certaines régions pour la construction de murs en briques de banco, même si cet usage affiche un net recul et tend à disparaître. Le banco est la ressource principale utilisée dans la construction de Voûte Nubienne.

BLOC DE BETON

Les blocs de béton (couramment appelés « parpaing » ou « aggloméré ») sont composés de 87 % de granulats, de 7 % de ciment et de 6 % d'eau. Dans le secteur informel, ils sont produits directement sur le lieu de chantier à l'aide de moules manuels.

Source : UN Habitat, 2012

BOIS

Le bois est encore couramment utilisé dans la construction informelle, qu'il provienne de coupes clandestines ou de prélèvements autorisés. Sa disponibilité est rare dans les zones de steppes arbusives, moyenne dans les zones de culture et plus abondante dans les savanes arborées et les forêts. Divers essences de bois peuvent être utilisées : fromager, rônier, acacia,... Le bois peut être utilisé « brut » ou sous forme d'éléments standardisés après sciage et rabotage dans des scieries. Du fait de la rareté de la ressource, l'utilisation de chevrons en bois brut de petites sections pour construire des charpentes très légères mais souvent peu durables est de plus en plus observé. On constate également que les petites habitations en toiture de zinc sous-dimensionnent parfois les quantités de chevrons et pannes utilisées.

PAILLES, ROSEAUX, FIBRES VEGETALES

Les fibres végétales telles que la paille, le bambou, les feuilles de palmier... sont prélevées dans l'environnement direct ou dans les champs de culture après les récoltes pour être utilisées dans l'habitat rural. Du fait de la

dégradation du couvert végétal, ces ressources deviennent également rares et souvent concurrencées par d'autres usages, par exemple pour le bétail ou encore pour la confection de clôture.



Exemple d'habitat rural avec une couverture en feuilles de palmier, à Fandène, région de Thiès

1.2.1.2. Matériaux importés

BOIS ET PRODUITS A BASE DE BOIS

Le Sénégal ne dispose pas d'assez de forêts pour produire du bois de construction en quantité suffisante pour le marché. L'exploitation clandestine du bois, particulièrement dans les régions de Ziguinchor, Kolda et Tambacounda, fait peser une sérieuse menace sur l'équilibre écologique. Par conséquent, l'essentiel du bois de construction est importé. Cette importation est ainsi évaluée à 38,12 millions de tonnes en 2000, 22,92 millions de tonnes en 2005 et 14 millions de tonnes en 2009. La baisse significative et continue des importations de bois s'explique par l'utilisation croissante de l'aluminium dans les constructions et l'augmentation du prix du bois consécutivement aux restrictions pour raisons écologiques.

Source : UN Habitat, Profil du Secteur du Logement

ACIER A BETON

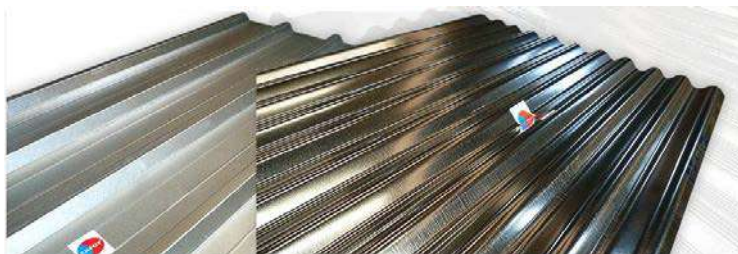
L'acier à béton est totalement importé malgré l'existence d'importantes réserves de fer au Sénégal. L'acier utilisé pour la production de tuyaux, profilés en acier et acier à béton représente 49,4 % des importations de matériaux de construction pour une valeur de 55,77 milliards de francs CFA (114 millions USD) en 2010. Depuis une quinzaine d'années, il existe une unité industrielle de transformation de l'acier en acier à béton : DIPROM.

Source : UN Habitat, Profil du Secteur du Logement

ALUMINIUM ET PRODUITS EN ALUMINIUM

L'aluminium et ses produits dérivés sont importés. Les importations de matériaux en aluminium ont connu une

augmentation régulière entre 2005 et 2009 avec 2 874 017 tonnes en 2009. L'importation des tôles et de bandes en aluminium a connu une évolution en dents de scie et une baisse de sa part dans les importations de matériaux entre 2000 et 2009. Les tôles en fibrociment, en zinc, en alu-zinc ou en aluminium sont également produites au Sénégal par de petites et moyennes entreprises industrielles et par des unités artisanales.



Exemple de produits de couvertures métalliques : bac acier et tôles ondulées alu-zinc, source SAFOR

1.2.2. Le parc bâti sénégalais

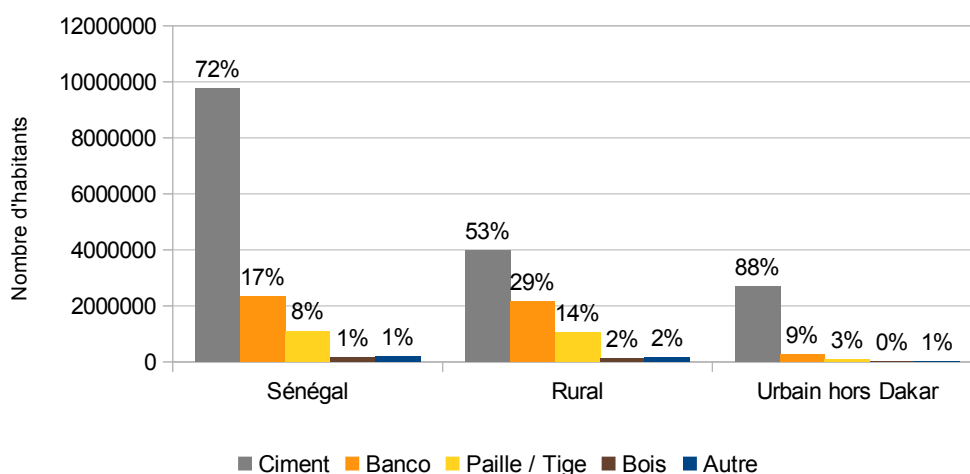
1.2.2.1. Bâtiments à usage de logements

La répartition du parc bâti de logements au Sénégal en fonction de la nature des matériaux constitutifs des murs et de la toiture est proposée dans les graphiques récapitulatifs suivants, d'après le *Recensement Général de la Population, de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage 2013* (ANSD, 2013), mené par l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie.

NATURE DES MURS

De manière générale, les murs bâtis à base de ciment (parpaing de ciment, béton banché) sont très majoritaires, puisque 72 % des habitations au Sénégal ont recours à ce système constructif.

Répartition de la population en fonction de la nature des murs du logement



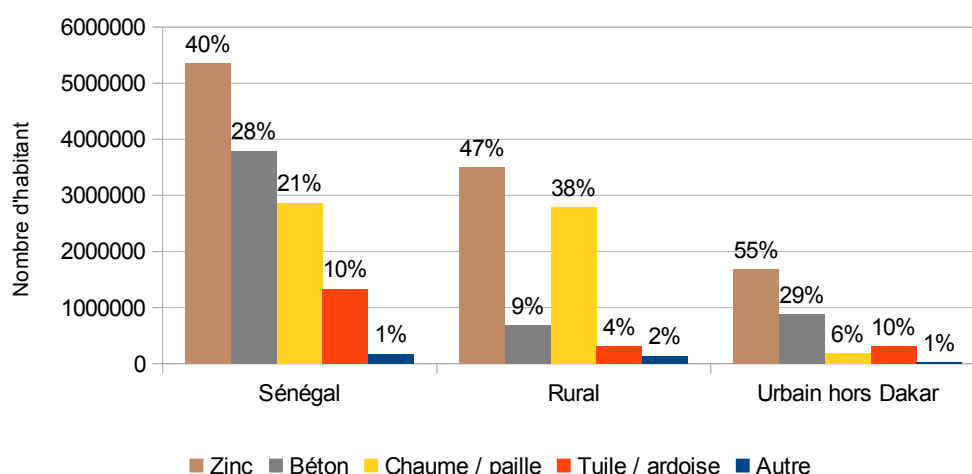
Source : RGPHAE 2013, ANSD / Calcul du consultant, 2015

- Dans les zones rurales, les murs à base de ciment représentent 53 % des bâtiments, contre 29 % pour les murs en banco et 14 % pour les murs en paille / tige.
- Dans les zones urbaines hors Dakar, les murs à base de ciment sont largement majoritaires (88%)

Les autres types constructifs restent marginaux (bois, autre) à moins de 4 %. A noter que la pratique d'enduire avec du ciment les murs construits en banco est assez répandu (14 % des bâtiments en banco).

NATURE DU TOIT

Répartition de la population en fonction de la nature du toit du logement



Source : RGPHAE 2013, ANSD / Calcul du consultant, 2015

Nous remarquons qu'au niveau national, la toiture la plus courante est la toiture de zinc (40%), suivi par la toiture en dalle béton (28%) et la toiture en chaume / paille (21%).

- Dans les zones rurales, la nature majoritaire du toit reste la toiture de zinc (47%), suivi par la toiture de chaume (38%) ; seul 9 % des habitants vivent sous une toiture en dalle béton
- Dans les zones urbaines hors Dakar, la toiture de zinc est majoritaire (55%) suivi par la toiture en dalle béton (29%), la toiture de chaume / paille étant minoritaire (6%)

Les autres types constructifs (tuile / ardoise, autre) restent marginaux en zone urbaine hors Dakar (11%) et rural (6%).

Ces observations faites au niveau global cachent des disparités importantes selon les régions. Les tendances suivantes sont observées :

- La toiture en zinc est prédominante (> 60%) dans les régions de Diourbel, Sedhiou et Ziguinchor, et encore la plus répandue (> 40%) dans les régions de Fatick, Kaolack, Louga et Matam ;

- La toiture en Chaume / paille est prédominante (> 60%) dans les régions de Kaffrine et Kédougou, et encore la plus répandue (> 40%) dans les régions de Kolda et Tambacounda ;
- La toiture en béton est assez répandue (> 20%) dans les régions de Matam, Saint-Louis et Thiès.
- Les murs à base de ciment sont très répandus partout, mais particulièrement prédominants (>60%) dans les régions de Diourbel, Fatick, Kaolack, Louga, Saint-Louis et Thiès ;
- Les murs en banco sont prédominants (> 60 %) dans la région de Sédhiou, et encore très répandus dans les régions de Kaffrine, Kédougou, Kolda, Matam, Tambacounda, Ziguinchor ;
- Les murs en paille / tige sont assez répandus dans les régions de Diourbel et Louga.

1.2.2.2. Bâtiments pour d'autres usages

Du fait de la diversité des usages rencontrés (usages d'éducation, de santé, d'hébergement, lieux de culte, bureaux, stockage,...) il est difficile d'obtenir des statistiques concernant la répartition des bâtiments par systèmes constructifs. Qu'ils soient publics ou privés, ces bâtiments suivent généralement des exigences plus strictes en terme de durabilité et de finitions. L'observation sur le terrain et les discussions auprès des différents acteurs et responsables concernés montrent cependant que les deux techniques constructives suivantes sont les plus répandues :

- Bâtiments avec murs en parpaing de ciment et toiture en tôles ondulées alu-zinc ou bac acier
- Bâtiments avec murs en parpaing de ciment ou en béton banché et toiture en dalle béton

1.2.3. Le marché de la construction neuve au Sénégal

Le marché de la construction de logements au Sénégal est très largement dominé par l'autopromotion, surtout en zone rural : le client gère lui-même l'approvisionnement en matériaux, la conception du bâtiment, le recrutement des artisans, le suivi du chantier. L'autoconstruction consistant à participer au chantier en tant que main d'œuvre est par contre beaucoup plus rare. Il est difficile d'estimer la répartition des nouveaux logements bâtis par technique, mais la confrontation des recensements de la population 2002 et 2013 donne cependant les grandes tendances de l'évolution du parc bâti :

Répartition de la « population hors Dakar » en fonction de la nature du toit						
POPULATION HORS DAKAR	Zinc	Béton	Chaume / paille	Tuile / ardoise	Autre	TOTAL
2002	3 237 165	708 323	2 889 720	687 163	167 796	7 690 168
2013	5 209 338	1 586 745	2 851 633	572 290	154 147	10 371 519
Evolution 2002-2013	1 972 173	878 422	-38 088	-114 873	-13 649	2 681 351
	61%	124%	-1%	-17%	-8%	35%

Source : RGPHAE 2013, ANSD / Calcul du consultant, 2015

En excluant le cas particulier de la région de Dakar, on peut observer une forte pénétration des toitures en zinc - tôle ondulée ou bac acier – et des toitures en dalles béton entre 2002 à 2013. A contrario, le nombre de toiture en chaume / paille restent pratiquement stable entre 2002 et 2013, malgré l'augmentation de la population.

Répartition de la « population hors Dakar » en fonction de la nature des murs						
POPULATION HORS DAKAR	Ciment	Banco	Paille / Tige	Bois	Autre	TOTAL
2002	3 388 691	2 412 177	1 505 196	225 183	156 753	7 690 168
2013	6 661 082	2 330 494	1 098 993	134 400	161 292	10 371 519
Evolution 2002-2013	3 272 391	-81 683	-406 203	-90 783	4 539	2 681 351
	97%	-3%	-27%	-40%	3%	35%

Source : RGPHAE 2013, ANSD / Calcul du consultant, 2015

Le nombre de bâtiments dont les murs sont en ciment a doublé de 2002 à 2013, passant par la même occasion de 46 % à 64 % du parc bâti construit. Malgré l'augmentation de la population, le nombre de bâtiments en banco reste pratiquement stable, tandis que le nombre de bâtiments avec des murs en tige/paille diminue de près de 30 %.

→ **Des photographies de bâtiments ruraux sont proposées en annexe.**

2. LA TECHNOLOGIE VOÛTE NUBIENNE

L'association Voûte Nubienne fournit sur son site internet ¹ de nombreux détails sur le concept technique VN qui sont reproduits ici.

La voûte nubienne est un procédé architectural antique, venu du haut Nil, et historiquement inconnu dans les autres régions africaines. Cette technique permet de bâtir, avec un outillage de base, des matériaux locaux et des compétences simples, des bâtiments aux toitures voûtées. Ses spécificités consistent en l'utilisation de terre crue, matière première abondante, malaxée sous forme de mortier et de briques séchées au soleil et l'absence de coffrage pour le bâti de la partie voûtée.

Cette technique sera identifiée dès les années 80 par l'ONG Development Workshop comme potentielle réponse aux graves problèmes d'habitat auxquels sont confrontées les populations sahéliennes d'Afrique sub-saharienne. C'est à partir de 1998 que l'Association Voûte Nubienne la revisite à son tour (simplifiée, codifiée, adaptée) afin de favoriser ses potentialités d'appropriation par les populations auxquelles elle sera proposée. Il en ressort une méthode épurée – le Concept Technique VN – facile à mettre en œuvre et à transmettre. Le procédé originel a également été adapté aux fortes précipitations saisonnières que connaissent les régions sahéliennes d'Afrique sub-sahariennes.

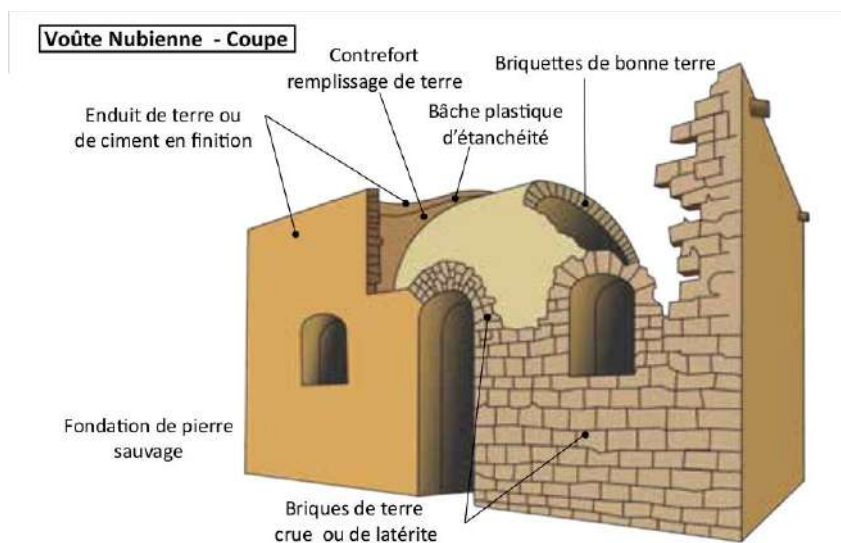
2.1. Aspects techniques

Les matériaux utilisés pour la production des voûtes nubiennes sont pratiquement toujours disponibles à proximité des chantiers. Les ressources en eau peuvent par contre présenter des difficultés d'approvisionnement suivant les lieux et les saisons, supposant la prise en compte de cette contrainte lors de la planification des chantiers par les clients et les maçons.

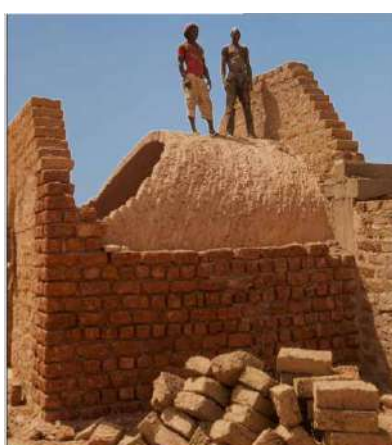
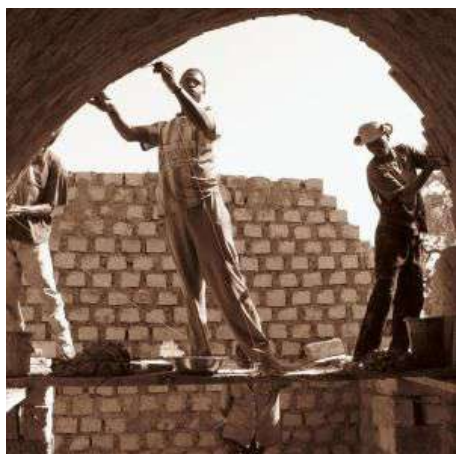
Le bâti est presque exclusivement constitué de terre crue, matière première abondante mouillée et malaxée, puis moulée sous forme de briques qui sécheront au soleil (adobes) ou utilisée directement sous forme de mortier. Seules les fondations font appel à la pierre.

- Les toitures créées sont exclusivement voûtées (pas de dôme) et permettent/favorisent l'usage du toit-terrasse par leur mise en charge.
- La construction des voûtes ne nécessite pas de coffrage ni aucune autre sorte de support.
- Les voûtes ont une portée (largeur) maximum de 3m25 et sont construites à partir de briques de dimensions standard pour les murs et de briquettes pour la toiture et les voûtains.
- Un "câble-compass" est utilisé pour définir la courbe de la voûte et guider le maçon dans son travail.
- Les murs, suivant leurs différents usages, sont d'épaisseurs standardisées ainsi que les ouvertures des portes, fenêtres, et autres rangements maçonnés.
- Une bâche plastique est incorporée aux mortiers de terre en finition de toiture afin d'apporter une garantie supplémentaire d'étanchéité.
- Il est possible de construire en étage (RDC+1).

¹ <http://www.lavoutenubienne.org/fr/la-technique-vn>



Source : Association Voûte Nubienne, livret de présentation (2014)



Source : www.lavoutenubienne.org

2.2. Vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne

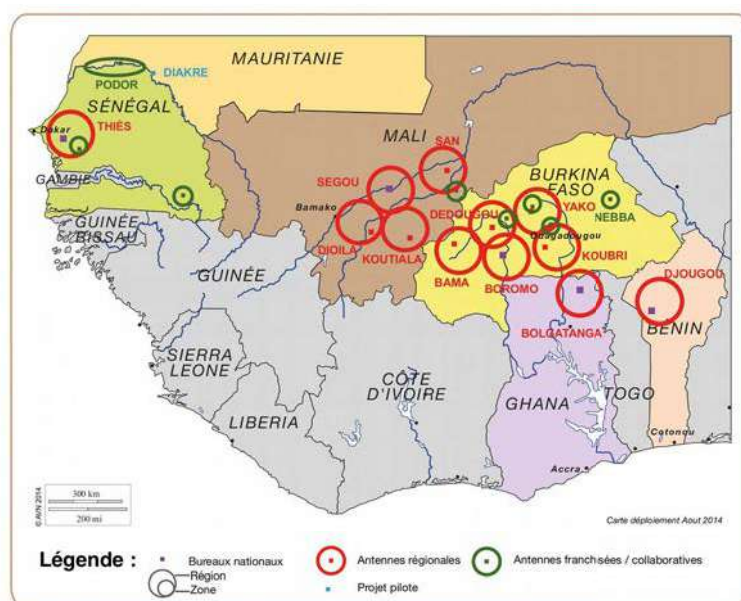
La technologie Voûte Nubienne est vulgarisée par l'Association Voûte Nubienne et ses partenaires. La création en 2000 de l'Association Voûte Nubienne part du constat que « *Plusieurs millions d'habitants des zones de type sahélien n'ont plus accès à un habitat décent. Pour réaliser leurs toitures, le recours au bois (ressources ligneuses disparaissant ou disparues) et à la tôle et au béton (inadaptés) les enferme dans un véritable cercle vicieux de pauvreté.* ». La mission d'AVN est de permettre au plus grand nombre d'entre eux d'accéder de manière pérenne et le plus vite possible à un habitat décent. Pour ce faire, elle mène le programme "Pour des Toits de Terre au Sahel", dans la logique suivante : un toit + un métier + un marché :

- UN TOIT : AVN a adapté et validé une technique constructive entièrement en matériaux locaux (terre et pierres pour les fondations) : la Voûte Nubienne (VN). Cette technique permet la réalisation de bâtiments solides et confortables, adaptés aux économies locales et donc aux attentes et demandes des populations.
- UN METIER : AVN a permis l'émergence d'une offre, le métier d'artisan-maçon VN, et la transmission de ce métier sous forme de compagnonnage.
- UN MARCHÉ - AVN propose un programme et une méthodologie permettant, au travers de la formation de "vulgarisateurs" locaux, d'amorcer un marché autonome et croissant de la VN, renversant ainsi de manière pérenne la problématique de l'habitat sahélien.

La diffusion de la technologie Voûte Nubienne a débutée à Boromo, au Burkina Faso au début des années 2000. En 2014, la technique est en cours de vulgarisation dans 5 pays d'Afrique de l'Ouest : au Burkina Faso, au Mali, au Sénégal, et depuis 2014, au Ghana et au Bénin. L'effectif des cadres locaux AVN est de 36 personnes intervenant à partir de 12 antennes régionales. 8 partenaires de terrain vulgarisent la technique dans leurs zones d'intervention, leur personnel ayant été formé à la technique et à la vulgarisation.

La vulgarisation de la technique en milieu rural s'appuie sur une centaine de personnes ressources convaincues de la technique VN et convaincantes auprès de leurs communautés villageoises, appelées « personnes clés ». Des activités spécifiques, de plus en plus nombreuses, s'attachent à formaliser davantage la technique VN pour la construction de bâtiments publics et de de bâtiments complexes. La vulgarisation rurale s'accompagne donc de nouvelles thématiques qui viennent la compléter : implication d'acteurs de la formation formelle, travail avec les banques et les instituts de micro-finance, études techniques, actions de plaidoyer...

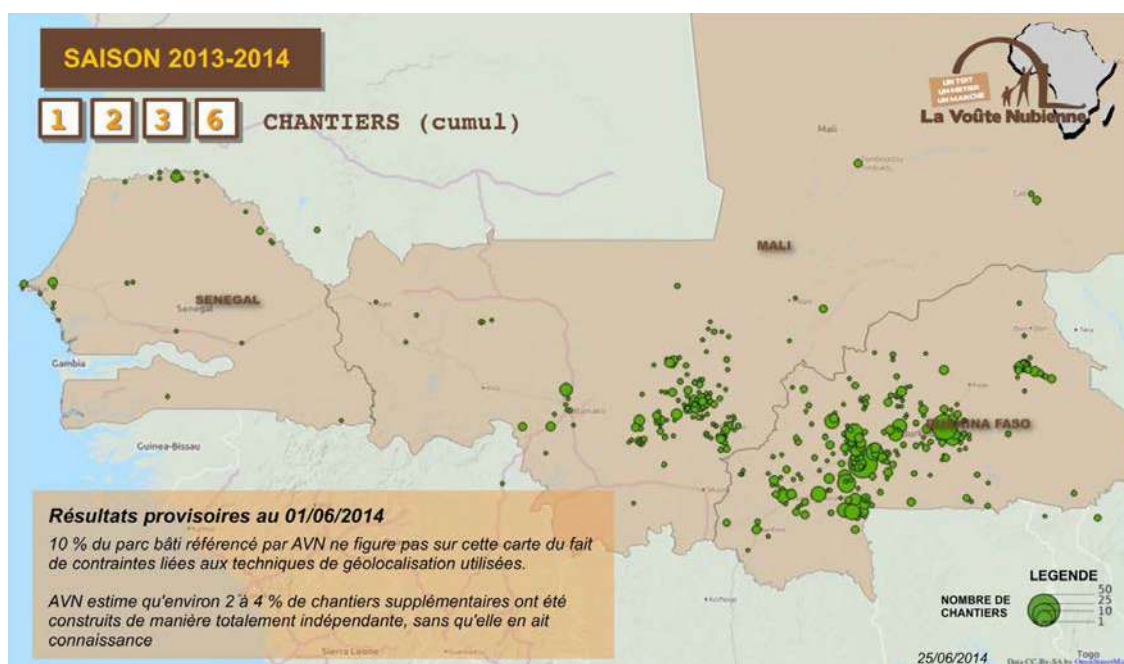
Carte des zones de vulgarisation de la technique Voûte Nubienne en Afrique de l'Ouest. Source : Association Voûte Nubienne, livret de présentation (2014)



2.3. Résultats, effets et impacts

Les résultats obtenus par la diffusion de la technologie Voûte Nubienne en Afrique de l'Ouest sont les suivants :

- 1 236 chantiers VN ont été réalisés depuis 1998 soit 58 000 m² de surface utile dans 570 localités du Burkina Faso, du Mali, du Sénégal, du Bénin, de Mauritanie et du Togo ;
- 328 maçons ont été formés depuis le début du programme : 170 maçons et 158 artisans et entrepreneurs. AVN est resté en contact avec 85 % des maçons formés. Parmi eux 83 % ont travaillé au cours des deux dernières saisons ;
- Le Taux de Croissance Annuel Moyen du marché de la technique Voûte Nubienne est estimé à 32 % sur la période 2000-2014 ;
- En 2013-2014, 70 % des clients ayant construit sont des clients locaux : cultivateurs, commerçants, fonctionnaires ayant assumé l'intégralité des coûts de construction de leur chantier ;
- Le parc bâti en Voûte Nubienne est composé d'environ 918 bâtiments d'habitation (74%) et d'environ 318 bâtiments construits pour d'autres usages (26%) : santé, éducation, agriculture & élevage, hébergement, culturel, religieux, tourisme...
- Plus de 17 000 bénéficiaires directs utilisent quotidiennement ou régulièrement les bâtiments construits ;
- La valeur du parc bâti est estimée à 1,15 Milliards de FCFA soit 1,89 Millions de \$ US, uniquement pour le lot gros œuvre. L'Association Voûte Nubienne n'a pas contribué (ou très marginalement) à ces coûts de construction, le parc ayant été financé selon la répartition suivante : 18 % sous forme d'autoconstruction, 24 % sous forme monétaire local (clients locaux), 24 % sous forme de contribution monétaire extérieure privée (dont clients expatriés), 34 % sous forme d'argent publics, en provenance d'ONG et d'associations qu'elles soient client-bénéficiaires ou non des réalisations.

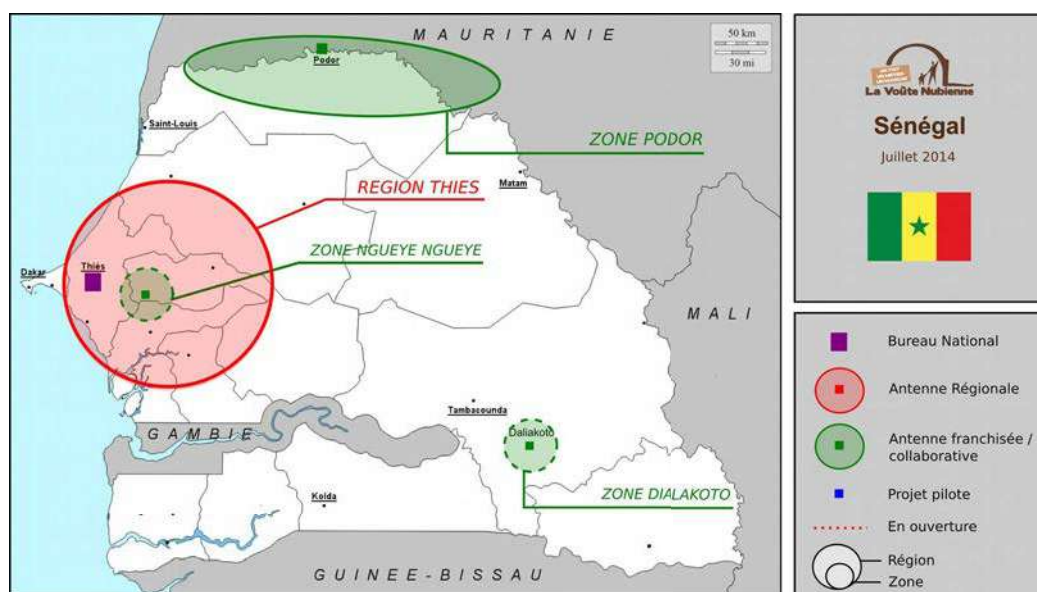


Cartographie des bâtiments Voûte Nubienne, au 01/06/2014
Source : Association Voûte Nubienne

- Les économies d'émissions de gaz à effet de serre réalisées grâce à l'utilisation du matériau terre crue sont estimées à 4 832 tonnes de CO₂ selon une étude du cabinet ERM réalisée en 2009. Cependant, ce résultat est extrapolé depuis la situation de référence du Burkina Faso et ne tient pas compte des gains en terme d'efficacité énergétique permis grâce à la performance thermique de la technologie. L'objet de cette étude est de proposer une évaluation des gains permis dans la situation de référence du Sénégal.

2.4. La Voûte Nubienne au Sénégal

2.4.1. Acteurs de la diffusion de la technologie VN au Sénégal



Cartographie des principales zones de vulgarisation de la technique Voûte Nubienne au Sénégal
Source : Association Voûte Nubienne, documentation interne

Si des bâtiments ont vu le jour au Sénégal dès 2007, la vulgarisation active a réellement débuté à partir de 2010 grâce à l'implication de l'association Le Partenariat dans la vallée du fleuve Sénégal. L'ouverture d'un bureau national AVN ne date que de 2013. Jusque là, l'appui à la diffusion de la technique au Sénégal était réalisé par des missions ponctuelles de AVN.

Le tableau suivant résume la liste des acteurs présents au Sénégal et intervenant, de manière pro-active, dans la vulgarisation de la technique Voûte Nubienne.

ACTEURS	LOCALISATION	ACTIVITES
Association Voûte Nubienne (AVN)	Bureaux nationaux : Thiès Régions d'intervention : Thiès, Diourbel, Fatick et tout le Sénégal	- Animation générale du programme - Relations institutionnelles - Vulgarisation en milieu rural - Gestion du marché dit « Semi-Autonome » à l'échelle nationale (conseils et mise en contact maçons-clients) - Suivi de la formation
Association Le	Siège : Saint Louis	- Vulgarisation formelle (marché des bâtiments publics)

Partenariat	Bureaux à Podor et Matam	et communautaires) - Suivi et études techniques - Transfert de compétences vers les bras techniques des collectivités - Suivi de la formation, implication d'entreprises BTP
Agence Régionale de Développement (ARD) de Saint-Louis	Saint-Louis	- Implication dans la réalisation de bâtiments communautaires / publics
Groupement d'Intérêts Communautaires (GIC) des Communautés Locales de Dagana	Dagana, Région de Saint-Louis	- Implication dans la réalisation de bâtiments communautaires / publics
Association les Jaambar de Nguéye Gueye	Nguéye Gueye, commune de Bambey, département de Bambey, Région de Diourbel	Organisation paysanne Sénégalaise impliquée dans le déploiement collaboratif dans la zone de Bambey (vulgarisation rurale)
Organisation pour la Promotion du Développement Autonome de Dialakoto (OPDAD Dialakoto)	Dialacoto, région de Tambacounda	Organisation paysanne Sénégalaise impliquée dans le déploiement collaboratif dans la zone de Dialacoto (vulgarisation rurale)
Association Développement Gembloux (ADG)	Siège à Thiès	- Appui structurel à l'association OPDAD - Implication potentielle dans la vulgarisation agricole

2.4.2. Parc bâti en Voûte Nubienne



Cartographie des constructions en Voûte Nubienne au 31/07/2014
Source : Association Voûte Nubienne (2014)

Au Sénégal, les premiers bâtiments ont vu le jour en 2007. 57 chantiers ont été réalisés depuis, représentant environ 5 000 m² de surface utile. La clientèle est majoritairement constituée de clients privés aisés pour des usages d'habitations et d'association, et d'ONG, groupements locaux et communautés et collectivités locales pour

des usages de service. Comme le montre le tableau suivant, les bâtiments en Voûte Nubienne construits au Sénégal ont couvert une diversité d'usages intéressante, ce qui constitue un panel de bâtiments démonstratifs pour la suite du déploiement de cette technique et la mise en œuvre du projet :

USAGES	NOMBRE DE CHANTIERS	USAGES	NOMBRE DE CHANTIERS
Habitation rurale, cultivateurs	11	Poulailler	3
Habitation, commerçants, fonctionnaires	8	Atelier, usine	2
Habitation, expatriés, diaspora	8	Bâtiments de santé	2
Hébergement, hôtel	5	Salles de classe, d'alphabétisation	2
Bureaux	3	Autres	11
Mosquée, salle de prière	3		

Typologie d'usage des bâtiments construits au 31/07/2014
Source : Association Voûte Nubienne (2014)

La taille moyenne des chantiers Voûte Nubienne au Sénégal s'établit à 72 m² pour les bâtiments à usage d'habitation et 97 m² pour les bâtiments regroupant les autres usages. Les deux zones regroupant le plus de bâtiments en Voûte Nubienne sont :

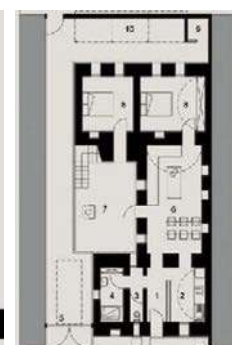
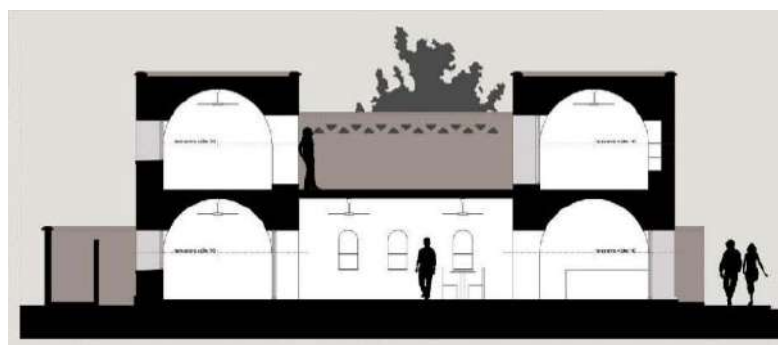
- les départements de Dagana et Podor le long du fleuve Sénégal,
- les départements de M'Bour, Thiès et Bambey

Au total, l'Association Voûte Nubienne a recensé 41 localités dans lesquelles au moins un bâtiment en Voûte Nubienne a été construit.

Deux usages ne sont pas encore représentés au Sénégal mais présentent néanmoins des potentialités certaines : les bâtiments de conservation de denrées agricoles et les logements collectifs ou lotissements.



Silos de conservation de l'oignon



Densification sur petit parcellaire
Conception Mathieu Hardy, Architecte

→ Des photographies du parc de bâtiments Voûte Nubienne au Sénégal sont disponibles en annexe.

2.4.3. Formation de maçons et entreprises

- Les chantiers sont assurés par des apprentis, maçons et artisans maliens, burkinabè et sénégalais
- 25 apprentis sénégalais sont en formation
- 2 maçons sénégalais ont été formés
- 3 entreprises BTP ont été impliquées dans des chantiers de bâtiments publics
- 1 architecte basé en Mauritanie intervient pour la conception de plans Voûte Nubienne
- L'ARD de Saint-Louis est impliquée par l'Association Le Partenariat dans le suivi de chantiers communautaires Voûte Nubienne.
- Des référentiels techniques ont été développés pour les Dossier d'Appels d'Offres (CCTP, modèles de contrat, demandes de renseignement et de prix)
- Des échanges techniques entre ARD ont lieu pour évaluer la répliquabilité / le transfert de compétences (ARD Saint-Louis, Matam, Diourbel)

2.4.4. Aspects économiques

Les données disponibles en terme de coûts de construction sont faibles. Le tableau présente une fourchette estimative des coûts de construction de la technologie Voûte Nubienne au Sénégal. Le marché de la construction étant libre et les réalités locales différentes selon les régions, ces coûts sont susceptibles de variations importantes.

LOTS	Technique Voûte Nubienne Bâtiments privés ruraux	Technique Voûte Nubienne Bâtiments communautaires / privés
Gros œuvre	40 000 à 55 000 FCFA / m ²	20 000 à 40 000 FCFA / m ²
Gros œuvre + second œuvre	90 000 à 105 000 FCFA / m ²	

CLASSES DES MACONS ET APPRENTIS	Salaire journalier Technique Voûte Nubienne
Apprenti C1	2 000 FCFA / jour
Apprenti C2	2 500 FCFA / jour
Maçon C3	2 800 FCFA / jour
Artisan Maçon C4	3 300 FCFA / jour

3. SITUATION ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU SENEGAL

3.1. Changement climatique

3.1.1. Contribution au changement climatique

Le World Resources Institute (WRI) estime les émissions de gaz à effet de serre du Sénégal en 2011 à² :

- 1,60 tonnes CO₂ eq / personne.an tous secteurs confondus hors « utilisation des terres et foresterie » (LULUCF)
- 2,04 tonnes CO₂ eq / personne.an, tous secteurs confondus en incluant LULUCF

A titre de comparaison, un pays développé comme la France a une intensité carbone par habitant en 2011 selon les mêmes sources de 7,46 tonnes CO₂ eq / personne.an (et respectivement 7,08 tonnes CO₂ eq / personne.an en incluant LULUCF).

La deuxième communication nationale du Sénégal (2010) auprès de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)³ donne les détails suivants :

- L'utilisation des terres et la foresterie représentait en 2010 la captation de 10 555 Gg de CO₂ eq en 2010 mais il est prévu que cette séquestration se réduise à 7 777 Gg CO₂ eq en 2020 (exploitation forestière, feux de brousse, dégradation des sols et changements d'affectation des surfaces). Il s'agit certainement de la contribution la plus importante du Sénégal vis à vis du changement climatique et, du fait de la dégradation de l'environnement local (désertification), elle affecte directement les populations locales.
- La répartition par secteur des émissions de gaz à effet de serre hors LULUCF était en 2000 la suivante :

Secteurs d'émissions	Répartition
Agriculture	37 %
Energie , ménages (dont combustion charbon et bois)	20 %
Energie , production d'électricité	13 %
Energie , transports	12 %
Déchets	12 %
Energie , autres industries	3 %
Procédés industriels	2 %
TOTAL	100 %

L'agriculture est le premier contributeur au changement climatique (37%), suivi par la combustion d'énergie des ménages (20%) (principalement pour la cuisson : charbon de bois, bois de feu,...), la production d'électricité (13%) et les transports (12%). Il est prévu une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dues à l'énergie

2 <http://cait2.wri.org/>

3 <http://unfccc.int/resource/docs/natc/sennnc2.pdf>

(ménages, production d'électricité, transports, autres industries) de 14 897 Gg CO₂ eq en 2010 à 21 028 Gg CO₂ eq en 2020 soit une hausse de 41 % sur 10 ans.

3.1.2. **Vulnérabilité face aux changements climatiques**

La deuxième communication nationale du Sénégal (2010) fait un état général de la vulnérabilité aux changements climatiques, dont les effets sont d'ores et déjà ressentis aujourd'hui au Sénégal :

« Le Sénégal est perpétuellement confronté aux effets adverses des changements climatiques du fait de sa façade maritime longue de 700 Km qui subit l'impact de l'élévation du niveau marin avec comme corollaire l'érosion côtière, l'intrusion saline dans les terres agricoles, la salinisation des ressources en eaux et la destruction des infrastructures. Du fait d'une agriculture essentiellement pluviale, les perturbations climatiques risquent de compromettre les efforts de lutte contre la pauvreté et l'objectif d'atteindre l'autosuffisance alimentaire. Aujourd'hui, les effets préjudiciables des changements climatiques sont réels et partagés par tous : les catastrophes naturelles sont de plus en plus fréquentes et dévastatrices et les pays en développement de plus en plus vulnérables. Les changements climatiques sont certes un phénomène mondial, mais ses effets néfastes sont plus durement ressentis par les populations des pays pauvres et des pays les moins avancés. »

A ceci s'ajoute les impacts liés à la dégradation de l'environnement local : désertification, érosion des sols... cités dans le paragraphe précédent.

D'autre part, l'étude « *Climate change, renewable energy and population impact on future energy demand for Burkina Faso built environment.* » (OUEDRAOGO, 2010) fournit un exemple pour un autre pays Sahélien des impacts attendus de la hausse des températures sur les consommations énergétiques de rafraîchissement pour les immeubles de bureaux :

« Les résultats montrent que la consommation actuelle d'énergie pour le refroidissement dans les immeubles de bureaux va augmenter de 15%, 36% et 100%, respectivement, pour la période TRY (2020-2039), TRY (2040-2059) et TRY (2070-2089) » du fait du changement climatique.

ainsi que pour les habitations domestiques :

« Les résultats ont montré que le changement climatique se traduira par une augmentation de la charge de refroidissement pour les habitations domestiques. La demande d'énergie actuelle pour la climatisation dans les ménages domestique va augmenter de 14% et 45% respectivement pour la période 2020-2039 et 2040-2059. »



Appareils de climatisation type « split »
sur la façade d'un bâtiment à Ouagadougou (Burkina Faso)

3.2. Situation énergétique

3.2.1. *Energie*

D'après la deuxième communication nationale du Sénégal auprès de CCNUCC (2010), le Sénégal, qui ne dispose pas de réserves fossiles économiquement exploitables, est obligé de recourir à des importations d'hydrocarbures et à une exploitation intensive de son couvert végétal, déjà très dégradé, pour assurer ses approvisionnements en ressources énergétiques primaires. Le bois et le charbon de bois représentent 57% du bilan énergétique du pays. L'essentiel du pétrole consommé est importé. Les produits pétroliers pèsent lourdement sur la balance commerciale du pays. En 2000, leur facture s'élevait à 248 milliards de FCFA soit 22,5% des importations.

3.2.2. *Electricité*

- La puissance installée de production d'électricité est de 493 MW, essentiellement thermique (fioul à 90 %) (chiffres clés SENELEC, consultés en 2015)
- Les ressources hydro-électriques potentielles sont estimées à 1 400 MW sur les fleuves Gambie et Sénégal. Le potentiel d'énergie renouvelable est insuffisamment mis en valeur malgré les efforts de diffusion d'équipements solaires. (Deuxième communication nationale CCNUCC, 2010)
- La production d'électricité a connu une progression moyenne annuelle de 6% entre 2000 et 2009. Cette croissance, supérieure à la croissance moyenne du PIB (4%) sur la même période, se poursuit à un rythme soutenu et devrait encore se maintenir dans le futur avec les investissements prévus (Système d'information Energétique, 2010)
- Le taux d'électrification urbaine est de 90,1 % en 2009, alors qu'en milieu rural le taux d'électrification est de 23,8% (Système d'information Energétique, 2010). Le taux d'électrification rurale était de 12,5 % en 2004 (Deuxième communication nationale CCNUCC, 2010)
- Des délestages ont lieu sur le réseau d'électricité : « par rapport à l'année 2008, l'énergie non fournie par manque de production notée en 2009 a baissé en passant de 91 à 73 GWh » (Système d'information Energétique, 2010)

3.3. Bases de données environnementales et facteurs d'émissions

3.3.1. *Base de données environnementales*

Une revue des bases de données environnementales applicables à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des bâtiments a été réalisée au début de l'étude :

NOM BASE DE DONNEES	AUTEUR	PAYS	DATE VERSION	LIEN
Bilan Carbone®, Guide des Facteurs d'Emissions	ADEME Association Bilan Carbone	France	2010	http://www.associationbilan carbone.fr/
Données écobilans dans la construction	KBOB / Eco-Bau / IPB	Suisse	2012	http://www.eco-bau.ch
Ecoinvent Database	Ecoinvent Centre	Suisse	2014	http://www.ecoinvent.org/database/
Government conversion factors for company reporting	Department for Environment, Food and Rural Affairs	Royaume-Uni	2014	http://www.ukconversionfactorscarbonsmart.co.uk/
IBO Richtwerte-Tabelle für Baumaterialien	IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie	Autriche	2013	http://www.ibo.at/
ICE - Inventory of Carbon & Energy	Department of Mechanical Engineering, University of Bath	Royaume-Uni	2011	http://www.bath.ac.uk/
ILCD - The International Reference Life Cycle Data System	European Commission, Joint Research Centre	Union Européenne	2012	https://ec.europa.eu/jrc/
Ökologische Baustoffliste Version 2.2e	EMPA Technologie & Gesellschaft	Suisse	2011	http://www.empa.ch/baustoffliste/

Aucune base de données « bâtiment » spécifique à l'Afrique de l'Ouest n'a été identifiée. La base de données sélectionnée pour l'analyse environnementale des bâtiments et du projet est la base de données Autrichienne IBO qui fournit les données les plus complètes, c'est à dire pour tous les matériaux de construction utilisés dans la construction des bâtiments étudiés. Certaines données ont été adaptées pour tenir compte du contexte sénégalais.

3.3.2. Facteurs d'émission de la consommation d'électricité au Sénégal

Selon le rapport 2009 du Système d'Information Energétique (SIE) du Sénégal, la répartition par source d'énergie de la production d'électricité au Sénégal est récapitulée dans le tableau suivant. Notons ici que la part majoritaire de la production d'électricité est assurée par des centrales thermiques fonctionnant majoritairement au Fioul. Selon le même rapport, les pertes de distribution sont estimées à 546 469 MWh, ce qui correspond à un rendement entre le lieu de production et le lieu de consommation de 80,9 % (pertes de distribution).

Source d'énergie	Autoprodu- teurs (MWh)	Centrales publiques (MWh)	Décentralisé (MWh)	TOTAL (MWh)	Répartition
Bagasse, coques d'arachide	50 249			50 249	1,8%
Hydro		239 129		239 129	8,4%
Solaire			2 969	2 969	0,1%
Thermique	377 981	2 187 948		2 565 929	89,8%
TOTAL (MWh)	428 230	2 427 077	2 969	2 858 276	100,0%

Source : SIE 2009, Sénégal

KBOB / Eco-bau / IPB fournit des données écobilans 2012 concernant les facteurs d'émissions de différentes technologies de production d'électricité, résumées dans le tableau suivant. Exprimés en prenant l'énergie finale pour référence, ces facteurs d'émissions tiennent compte de l'ensemble des rendements de la chaîne de production d'électricité, de l'extraction des matières premières, jusqu'au lieu de consommation.

Production d'électricité	Référence	Energie primaire totale (MJ)	Energie primaire non renouvelable (MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO2 eq)
Centrale, pétrole	Energie finale (MJ)	3,85	3,83	0,277
Centrale à cogénération, bois	Energie finale (MJ)	3,80	0,15	0,032
Energie hydraulique	Energie finale (MJ)	1,22	0,03	0,004
Photovoltaïque (sur place)	Energie finale (MJ)	1,43	0,31	0,023

Source : KBOB / Eco-Bau / IPS, Suisse, 2012

En tenant compte du mix de production d'électricité du Sénégal, nous en déduisons les facteurs d'émissions suivants. Ces facteurs d'émissions seront utilisés dans l'analyse environnementale des modèles d'usages de bâtiment, en particulier pour la phase « utilisation » (rafraichissement, ventilation).

Consommation d'électricité au Sénégal		Facteurs d'émissions
Energie primaire totale (MJ ep / MJ ef)		3,63
Energie primaire non renouvelable (MJ ep / MJ ef)		3,45
Emissions de gaz à effet de serre	(kg CO2 eq / MJ ef)	0,25
	(kg CO2 eq / kWh ef)	0,90

Source : SIE 2009, Sénégal / KBOB / Eco-Bau / IPS, Suisse, 2012 / calculs du consultant, 2015

3.3.3. Détermination du facteur d'émission du bois construction pour le Sénégal

Différents cas de figure existent pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre du matériau bois, selon la qualité de gestion des forêts desquelles il est issu, et selon son usage comme matériau de construction, notamment sa durée de vie dans l'ouvrage. Dans son « *guide méthodologique des facteurs d'émissions* » (2010), la méthode Bilan Carbone® résume la situation ainsi :

« A la condition de provenir de forêts bien gérées et d'être inclus dans des objets qui dureront au moins un siècle, l'emploi d'une tonne de bois d'œuvre donne un crédit de 500 kg équivalent carbone, ce qui correspond à la teneur moyenne en carbone du bois.

(...)

En ce qui concerne les bois exotiques, qui proviennent de forêts qui ne sont généralement pas bien gérées, et où les coupes ne sont pas compensées par des plantations (puisque la surface diminue), on ne peut pas parler de puits de carbone. En fait il est même probable que l'exploitation d'une tonne de bois exotique conduise à des émissions nettes significatives : pour pouvoir exploiter les quelques espèces commercialement intéressantes (pas plus de quelques exemplaires à l'hectare), les forestiers construisent des pistes qui, par la suite, servent à des paysans pour aller défricher le reste de la forêt, ce qui cause des émissions significatives de CO2. »

Le niveau de dégradation du couvert végétal au Sénégal et la faible durée de vie des habitations rurales utilisant le bois comme matériau de charpente conduisent à retenir les valeurs suivantes pour le bois d'oeuvre :

Matériaux / Système	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO2 eq / kg)	Energie primaire non renouvelable (MJ Ep / kg)	Source / Détails
MAT_Bois brousse – déforestation	1,51	14,5	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Bois import – déforestation	1,62	16,2	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable

PARTIE II : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MODELES D'USAGES DE BATIMENTS

1. Description de la méthodologie utilisée

La présente évaluation environnementale des modèles d'usage de bâtiment suit les principes d'application d'une analyse de cycle de vie (ACV) appliquée à l'utilisation de bâtiments. L'enjeu est ici d'évaluer, sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment (de l'extraction des matériaux jusqu'à la déconstruction du bâtiment) répondant à un usage précis (habitation, autres usages,...) les impacts environnementaux engendrés selon les techniques de construction retenues.

La méthodologie suit les étapes suivantes :

- **Analyse qualitative des besoins en construction et définition des modèles d'usage**
- **Définition des techniques de construction**
- **Estimation des quantitatifs de matériaux pour chaque technique**
- **Analyse des phases « construction » et « entretien » des bâtiments**
- **Analyse de la phase « utilisation » du bâtiment : besoins de rafraîchissement**

Les phases du cycle de vie du bâtiment prises en compte dans l'analyse de cycle de vie sont les suivantes :

GROUPES	PHASES	PRISE EN COMPTE DANS L'ACV
CONSTRUCTION	Extraction des matières premières et fabrication des matériaux / produits	OUI
	Transport des matériaux / produits vers chantier	OUI
	Mise en œuvre des matériaux et produits	NON
ENTRETIEN	Entretien et maintenance du bâti pour une durée de vie des bâtiments de 30 ans	OUI (Nombre de remplacements x impacts construction)
UTILISATION	Utilisation du bâtiment pour divers usages	OUI
FIN DE VIE	Déconstruction, séparation et tri des matériaux / produits, filières de traitement	NON

La phase « mise en œuvre des matériaux et produits » a été négligée dans l'étude, considérant qu'aucune machine électrique ou thermique n'est utilisée pendant la construction des bâtiments, ce qui dans les faits est le cas le plus souvent.

La phase « fin de vie » a également été négligée dans l'étude, considérant que les pratiques en matière de traitement des matériaux en fin de vie risquent d'évoluer fortement entre la construction des bâtiments aujourd'hui, et la déconstruction, dans le futur. De plus, l'état de l'art démontre que la phase « fin de vie » impacte à la marge les émissions de gaz à effet de serre et les consommations énergétiques, mais affecte plutôt d'autres catégories d'impacts (émissions de polluants spécifiques dans les sols, l'eau, l'air) qui ne sont pas mesurés et mesurables facilement dans le cadre de cette étude. Les différentes filières de traitement des matériaux en fin de vie sont listés ci-dessous en fonction du type de matière :

TYPE DE MATIERE	TRAITEMENT EN FIN DE VIE
MINERAL	Réutilisation en matériau de construction (terre) Sable, Ciment, béton : réutilisation en remblais après concassage (infrastructures)
VEGETAL	Réutilisation en matériau de construction Combustion avec valorisation énergétique (cuisson)
METALLIQUE	Réutilisation Mise en décharge Recyclage pour fabrication de nouveaux produits
ORGANIQUE	Plastique : Incinération Enduits goudron : séparabilité des matériaux impossible : réutilisation en enduits ou remblais

La présente étude analyse les impacts du bâtiment sur les deux catégories d'impacts suivantes :

- **les impacts sur le changement climatique**
indicateur : émissions de CO₂eq dans l'atmosphère
- **les impacts sur l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables**
indicateur : consommation d'énergie primaire non renouvelable



METHODOLOGIE – ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES BATIMENTS

Cette étude a pour but de quantifier de manière rigoureuse les impacts sur le réchauffement climatique et les impacts sur l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables de la construction en Voûte Nubienne comparativement aux autres techniques courantes de construction. Elle est menée sous la forme d'une Analyse de Cycle de Vie, du berceau à la tombe, pour des unités fonctionnelles types (1 bâtiment d'habitation en zone rurale, 1 bâtiment autres usages...), sur une durée de vie typique de 30 ans, incluant l'entretien et les remplacements éventuels des composants de l'ouvrage.

Pour cela, un inventaire des quantités de matériaux, mais aussi des moyens de transports a été réalisé sur le terrain. L'impact de chaque type de matériau est issu d'une base de données de référence dans le secteur du bâtiment (IBO,...) mais a fait l'objet d'adaptation pour à la situation du Sénégal.

Cette analyse de cycle de vie a suivi les grands principes des recommandations de la suite de normes ISO 14040.

Elle permet de dégager des estimations référencées de l'impact des différentes techniques constructives sur l'environnement, par mètre carré de surface construite.

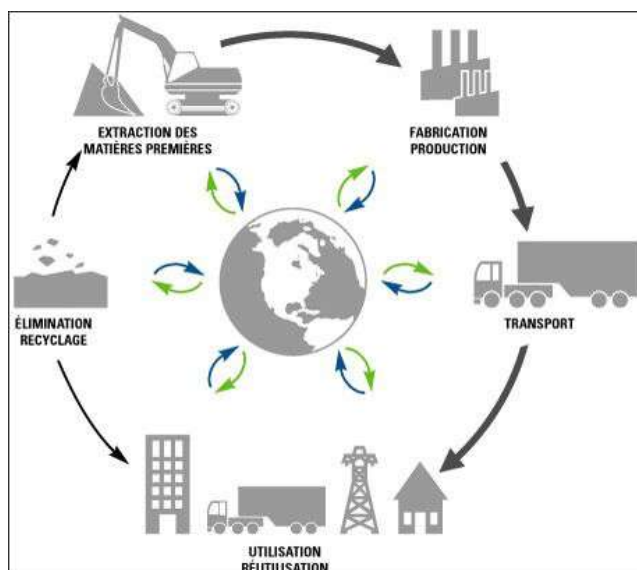


Schéma de principe général du « Cycle de Vie » d'un produit utilisé en méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (Source : dechet.com)

2. Analyse qualitative des besoins en construction et définition des modèles d'usage

Les typologies d'usages des bâtiments peuvent être nombreux et variés, en voici une liste non exhaustive ci-dessous :

- Petite habitation
- Habitation moyenne
- Grande habitation
- Atelier / usine
- Bâtiment Culturel (salle polyvalente,...)
- Bâtiment de santé
- Bureau
- Lieu de culte
- Entrepôt / stockage
- Hébergement / Hôtel
- Magasin / commerce
- Bâtiment agricole / d'élevage
- Bâtiment d'éducation (salle de classe,...)
- Bâtiment administratif (mairie, services)

Dans un souci de simplicité, nous retiendrons pour la présente étude uniquement les 4 grands modèles d'usages suivants :

- **Petite habitation**
- **Habitation moyenne**
- **Grande habitation**
- **Autres usages**

Le tableau suivant récapitule pour chacun des modèles d'usages définis précédemment les fonctionnalités attendus, définissant ainsi **l'unité fonctionnelle de chaque usage**, c'est-à-dire ce à quoi devra répondre chaque système constructif étudié.

Modèle d'usages		Petite habitation	Habitation moyenne	Grande habitation	Autres usages
Spécificités fonctionnelles					
Surface utile (m ²)		< 20 m ²	Entre 20 et 50 m ²	> 50 m ²	-
Ratio d'occupation (personnes / m ²)		0,21	0,10	0,04	0,7
Profil d'occupation (% du temps)		100 %	100 %	100 %	100 %
Exigences de confort intérieur	Scénario A	sans			
	Scénarios B et C	20°C < Température intérieure < 32°C			
Systèmes de rafraîchissement	Scénario A	Aucun système			
	Scénario B	Ventilateur			
	Scénario C	Climatisation type split			
Durée de vie minimum de l'ouvrage		30 ans			
Besoins d'entretien du bâti		Moyen à important		Faible à moyen	

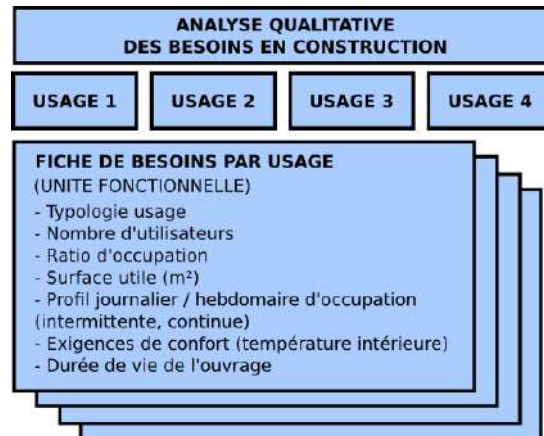


Schéma de principe de la méthodologie pour l'analyse qualitative des besoins :
Fiches de besoins par modèles d'usage



REPERE METHODOLOGIQUE : UNITE FONCTIONNELLE

L'unité fonctionnelle représente une quantification de la fonction d'un produit ou service. C'est à partir de cette unité qu'il sera possible de comparer des scénarios de produits a priori différents (dans notre cas, des techniques de construction). Comme toute unité, elle se doit d'être précise, mesurable et additive. D'une manière générale, l'unité fonctionnelle devrait contenir une composante fonctionnelle, un critère de performance, et une durée. Par exemple, l'unité fonctionnelle d'un usage « Habitat » pourra être par exemple : « loger 5 personnes dans un habitat durable et confortable, sans appareil de climatisation, pendant une durée de 30 ans (durée de vie de l'ouvrage) »

3. Définition des techniques de construction

Pour évaluer la réponse aux différents besoins en bâtiments, deux groupes de techniques de construction sont considérés :

- **Les techniques de construction dites « de référence »** : elles sont représentatives des modes de construction à disposition au Sénégal en milieu rural et utilisées dans les réalités sociales et économiques ;
- **La technique de construction Voûte Nubienne** utilisant la terre crue pour les murs et la toiture voûtée, ainsi que, le cas échéant, ses variantes : technique Voûte Nubienne + système de reprise poteaux-poutre en béton armé.

Le tableau suivant récapitule les techniques de construction retenues et qui devront répondre aux 4 modèles d'usages précédents. Les techniques de références y sont décrites en fonction de la nature des matériaux constitutifs des murs et des toitures. Par souci de simplification, les techniques constructives existantes mais peu diffusées au Sénégal ont été négligées dans cette étude : il s'agit des habitats nomades (tente,...), des techniques utilisant le bois comme matériau constitutif des murs et des différentes techniques constructives alternatives utilisant le banco comme matériaux constitutif des murs (briques d'adobe, BTC, terre stabilisée,...).

Techniques disponibles	Modèle d'usages	Petite habitation	Habitation moyenne	Grande habitation	Autres usages
------------------------	-----------------	-------------------	--------------------	-------------------	---------------

Techniques de référence					
MURS	TOITURE				
Ciment	Zinc	X	X		
Banco	Paille	X	X		
Banco	Zinc	X	X		
Paille	Paille	X	X		
Ciment	Paille	X	X		
Ciment	Béton		X	X	X
Ciment	Bac Acier			X	X

Technique Voûte Nubienne				
Voûte Nubienne simple	X	X	X	X
Voûte Nubienne + Béton Armé			X	X

4. Estimation des quantitatifs de matériaux pour chaque technique

Les quantitatifs de matériaux nécessaires pour chaque technique de construction et pour chaque modèle d'usage ont été déterminés à partir de relevés de terrain sur des bâtiments existants, ainsi qu'à partir de divers documents descriptifs techniques. Pour la technologie Voûte Nubienne, l'Association AVN dispose d'abaques permettant de déterminer les quantités de matériaux nécessaires en fonction de la taille des bâtiments. L'association le Partenariat dispose de documents de consultation des entreprises et de fiches techniques regroupant les quantités de matériaux nécessaires.

En particulier, pour les modèles d'usages « Habitation », les quantitatifs de matériaux s'inspirent des bâtiments suivants, visités lors de la mission de terrain, dans le village de Ngueye Gueye, commune et département de Bambey, région de Diourbel. Afin de permettre une représentativité sur l'ensemble du Sénégal, certaines adaptations ont été apportées.



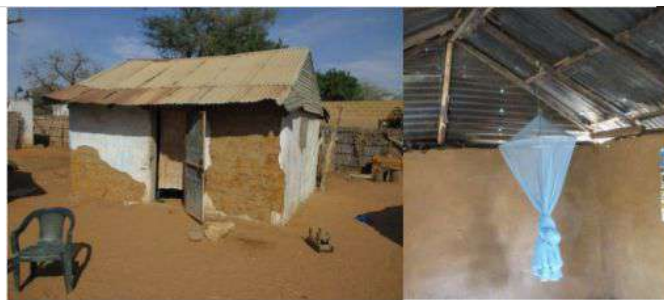
Voûte Nubienne



Ciment – Zinc



Banco – paille



Banco – zinc



Banco – paille

Le tableau suivant indique les quantités de matériaux nécessaires pour répondre au besoin d'usage « petite habitation » d'une surface de 15 m² avec chacune des différentes techniques de référence et Voûte Nubienne :

- Matière minérale : terre crue, sable, ciment, granulats
- Matière végétale : bois, paille, roseaux
- Métallique : fer à béton, tôle alu-zinc, bac acier
- Organique : goudron pour enduits, plastique pour bâche d'étanchéité toiture
- Mixte : béton armé

Quantité de matière (kg)	MINERAL	VEGETAL	METAL-LIQUE	ORGA-NIQUE	MIXTE
--------------------------	---------	---------	-------------	------------	-------

Techniques de référence					
MURS	TOITURE				
Ciment	Zinc	10 793	21	57	1 357
Banco	Paille	6 675	432		
Banco	Zinc	10 370	135	94	
Paille	Paille	1 205	504		
Ciment	Paille	5 811	432		1 430

Technique Voûte Nubienne					
Voûte Nubienne simple	77 276		6	170	

Les enseignements suivants peuvent être tirés :

- La masse des matériaux – principalement terre crue - nécessaires à la mise en œuvre dans le cas de la technologie Voûte Nubienne (77 tonnes) est plus de 6 fois supérieure à celle requise pour les autres techniques de construction ;
- La masse de sable, d'agregats, de ciment et de fer à béton nécessaire à la construction de l'habitat ciment-zinc est de l'ordre de 12 tonnes. La masse du bois d'importation est faible (21 kg), la couverture en zinc étant légère et la charpente optimisée ;
- La masse de bois nécessaire pour la confection de la toiture en paille est de l'ordre de 145 kg (432 kg avec la paille et le bois).. Cette quantité est à mettre en relation avec les consommations de bois pour la cuisson des ménages. Une étude du programme PERACOD menée en 2010 sur les consommations en combustibles domestiques dans la région de Fatick⁴ relève une consommation moyenne journalière de bois de brousse pour la cuisson par ménage en zone rurale de l'ordre de 5,7 kg lorsque le combustible unique utilisé est le bois. Dans ce cas précis, la quantité de bois consommée pour la toiture en paille correspond à environ 25 jours de cuisson ;

→ **Le descriptif des matériaux constitutifs des parois et des quantités retenues est détaillé en annexe.**

4 <http://www.peracod.sn/IMG/pdf/comb-dom-fatik-peracod.pdf>

En particulier, pour le modèle « autres usages », les quantitatifs de matériaux s'inspirent des salles de classe suivantes, visitées lors de la mission de terrain, dans le village de Kodith, département de Podor, région de Saint-Louis :



Le tableau suivant indique les quantités de matériaux nécessaires pour répondre au besoin d'usage « autres usages » d'une surface de 70 m² avec chacune des différentes techniques de référence et Voûte Nubienne.

Quantité de matière (kg)	MINERAL	VEGETAL	METAL-LIQUE	ORGA-NIQUE	MIXTE
--------------------------	---------	---------	-------------	------------	-------

Techniques de référence					
MURS	TOITURE				
Ciment	Béton	40 803			22 667
Ciment	Bac Acier	22 190		2 862	6 613

Technique Voûte Nubienne					
Voûte Nubienne simple		315 427		451	
Voûte Nubienne + Béton Armé		285 076		451	12 820

- Les techniques ciment – dalle béton, ciment – bac acier et voûte nubienne n'utilisent pas de matière végétale.
- La technique Voûte Nubienne + béton armé utilise un système poteau – poutre en béton armé pour ouvrir les espaces intérieurs (la technique Voûte Nubienne classique a pour contrainte un entraxe maximal de voûte de 3,25m). Ici, la quantité de béton armé nécessaire pour la stabilité de l'ouvrage a été surdimensionnée.
- **Le descriptif des matériaux constitutifs des parois et des quantités retenues est détaillé en annexe.**



REPERE METHODOLOGIQUE – METRES ET QUANTITATIFS DE MATERIAUX

Afin de permettre la quantification environnementale de chaque type de bâtiments et de chaque modèle et de chaque variante, un métré des caractéristiques dimensionnelles des bâtiments a été réalisé ainsi qu'un quantitatif des masses en kg des différents matériaux de construction nécessaires incluant la description du type de matériau ainsi que sa composition (minéral, métallique, végétal, organique, composite).

5. Évaluation des phases « construction » et « entretien du bâti »

5.1. Principe du calcul

La quantification des impacts pour les phases « Construction » et « entretien » suit les principes de calcul suivant :

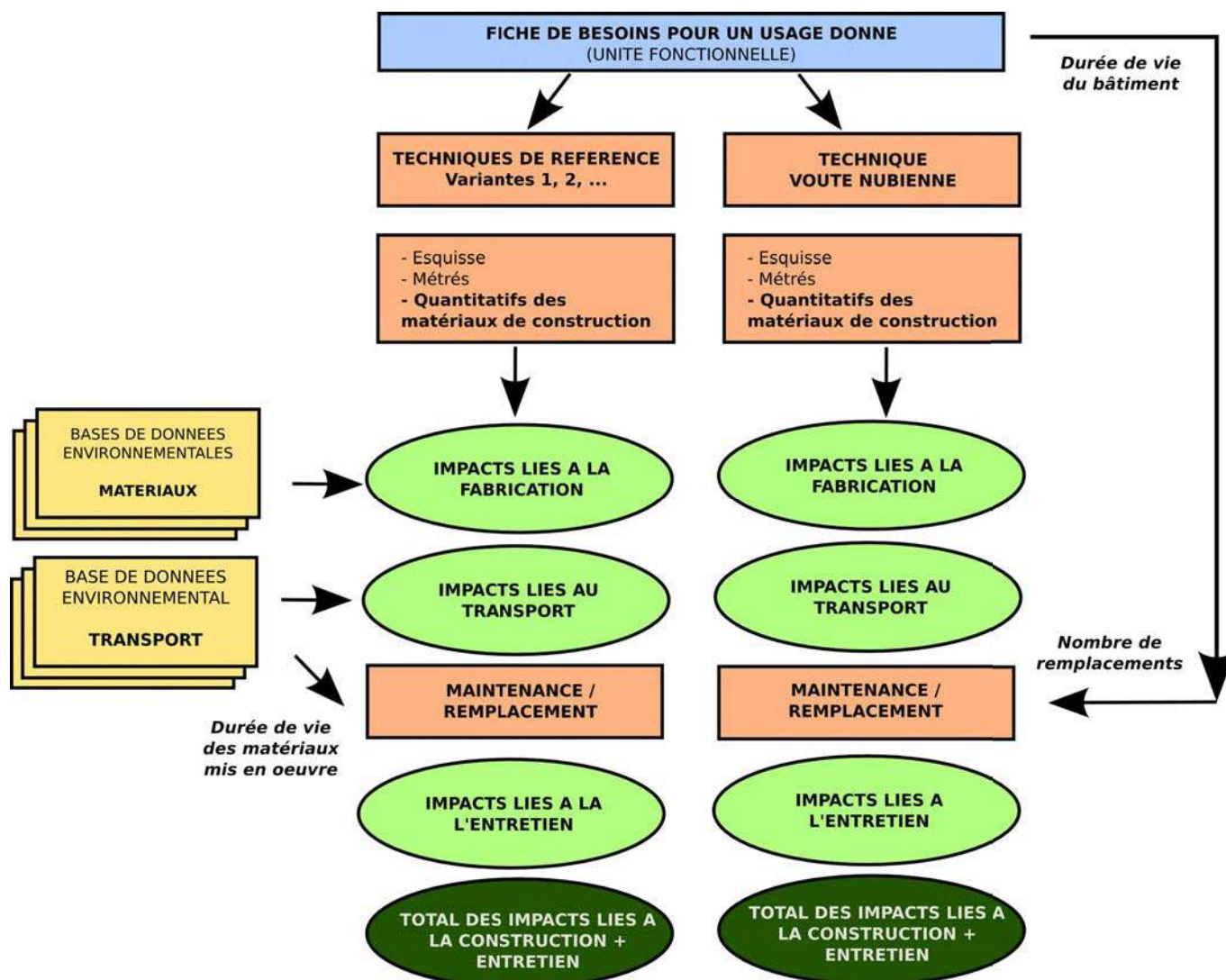


Schéma de principe de la quantification des impacts environnementaux liés à la construction des bâtiments

5.2. Hypothèses de calcul

5.2.1. Estimation des impacts liés à la fabrication des matériaux

Les facteurs d'émissions de CO₂ eq et de consommation d'énergie primaire non renouvelable des matériaux sont conciliés dans le tableau suivant et proviennent de l'institut IBO. Certaines données ont été adaptées au contexte sénégalais.

Matériaux / Système	Masse volumique (kg/m ³)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq / kg)	Energie primaire non renouvelable (MJ Ep / kg)	Source / Détails
MAT_Bois brousse – déforestation	500	1,51	14,5	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Bois import – déforestation	500	1,62	16,2	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Goudron	1050	0,43	49,0	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Paille – déforestation	120	1,47	15,4	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Pierre sauvage	2000	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
MAT_Terre crue	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Bâche Plastique	900	2,11	57,5	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
SYS_Béton	2300	0,10	0,7	IBO
SYS_Béton armé	2400	0,14	1,4	IBO
SYS_Brique de terre crue	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Enduit ciment	1500	0,19	1,9	IBO
SYS_Enduit terre	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_IPN	7800	1,37	21,7	IBO
SYS_Mortier ciment	1500	0,19	1,9	IBO
SYS_Mortier de terre	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Parpaing de ciment	1000	0,10	0,7	IBO
SYS_Tôle acier zinc	7800	2,14	34,1	IBO

Sources :

- Données environnementales : sauf mention contraire : Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, IBO Richtwerte-Tabelle, 2013, Disponible sur : www.ibo.at/

Les consommations d'énergie primaire « renouvelable » - dans le contexte européen - ont été considérées « non renouvelable » dans le contexte ouest-africain

- Données physiques : OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, L'isolation Thermique Ecologique, Editions Terre Vivante, 2010

5.2.2. Estimation des impacts liés au transport

Les facteurs d'émissions de CO₂ eq et de consommation d'énergie primaire non renouvelable des modes de transport sont résumés dans le tableau suivant :

Matériaux / Système	Type transport	Référence	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq)	Energie primaire non renouvelable (MJ Ep)	Source / Détails
CAMION	7,5 à 20 tonnes	tonne.km	4,38	0,26	IBO
CAMION	> 28 tonnes	tonne.km	3,01	0,19	IBO
CAMIONNETTE	< 3,5 tonnes	tonne.km	32,18	1,91	IBO
CARGO	Container	tonne.km	0,17	0,01	IBO
CHARETTE	Traction animale	tonne.km	0,00	0,00	IBO

Sources :

- Données environnementales : sauf mention contraire : Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, IBO Richtwerte-Tabelle, 2013, Disponible sur : www.ibo.at/
 Les consommations d'énergie primaire « renouvelable » - dans le contexte européen - ont été considérées « non renouvelable » dans le contexte ouest-africain
 - Données physiques : OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, L'isolation Thermique Ecologique, Editions Terre Vivante, 2010

Les modes de transport et les distances du lieu de production / extraction jusqu'au lieu de construction sont conciliés par type de matériaux, dans le tableau suivant :

MATERIAUX	LIEU DE PRODUCTION / EXTRACTION	DISTANCE RETENUE	MODE DE TRANSPORT
Terre crue	site d'extraction à proximité directe du chantier de construction	10 km	Camion
Goudron, pétrole, huile pétrole	Achat à proximité du chantier	30 km	Camion
Sable, granulats	carrière à proximité du chantier	30 km	Camion
Ciment	Sites de production au Sénégal	500 km	Camion
Ferrailage à béton Tôle ondulée acier-zinc IPN acier	Importation de la matière première depuis l'étranger (Chine), transformation à Dakar, transport intérieur jusqu'au lieu de vente à proximité du chantier, transport du lieu de vente vers le lieu du chantier	500 km	Camion
		13 000 km	Cargo
Bois d'importation	Sites forestiers au Sud du Sénégal ou dans la sous région	500 km	Camion
Bois de brousse	prélèvements à proximité directe du chantier	10 km	Charette à traction animale

5.2.3. Mise en œuvre

La phase mise en œuvre a été négligée dans cette étude, considérant qu'aucune machine thermique ou électrique n'est utilisée pendant la construction. Les coffrages et étais à base de bois n'ont pas non plus été considérés dans cette étude, considérant qu'ils sont réutilisés sur plusieurs chantiers et qu'ils peuvent également être réutilisés pour d'autres usages. Les impacts des quantités d'eau utilisée pour le chantier (pompage, transport) sur le changement climatique et sur l'épuisement des ressources énergétiques ont été négligés.

La technologie Voûte Nubienne nécessite d'importantes quantités d'eau pour la mise en œuvre (estimées à 240 hectolitres pour un bâtiment de 25 m²). Les ressources en eau peuvent présenter des difficultés d'approvisionnement suivant les lieux et les saisons, supposant la prise en compte de cette contrainte lors de la planification des chantiers par les clients et les maçons.



Utilisation d'étais en bois, source : <http://assomorgane.fr>



utilisation d'eau pour la mise en oeuvre

5.2.4. Entretien du bâti

La durée de vie des bâtiments a été fixée dans cette étude à 30 ans. Les nombre de remplacements des composants des bâtiments ont été estimés, sur cette durée de vie, dans le tableau suivant :

COMPOSANTS	DUREE DE VIE ESTIMEE	NOMBRE DE REMPLACEMENTS SUR LA DUREE DE VIE
Enduits extérieurs (goudron, ciment)	15 ans	2
Enduits intérieurs (ciment, terre)	20 ans	1
Couverture en tôle ondulée acier-zinc	15 ans	2
Charpente en bois pour couverture acier-zinc	15 ans	2
Couverture en paille et murs en paille	5 ans	6
Charpente en bois pour couverture en paille	10 ans	3
Ossature bois pour murs en paille	10 ans	3

5.3. Résultats obtenus

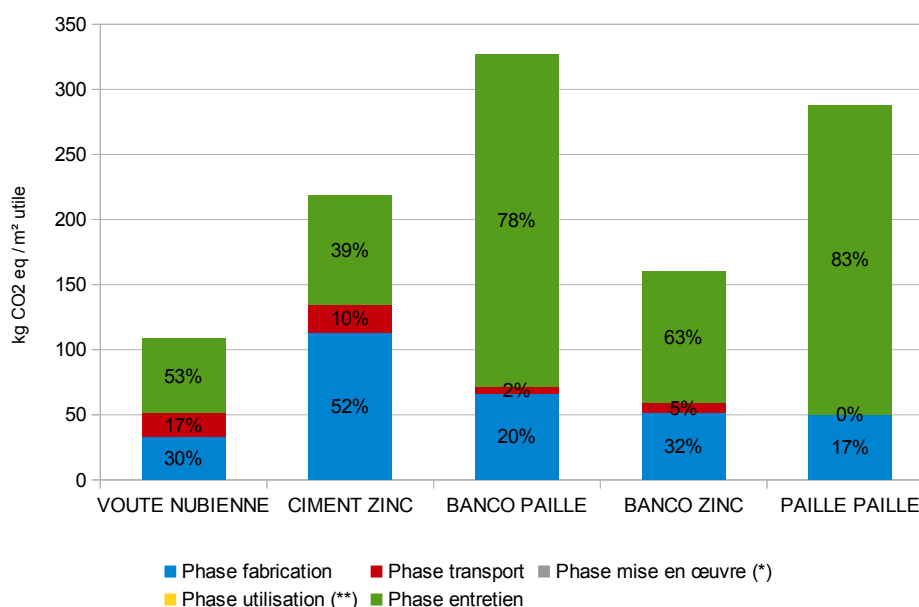
5.3.1. Modèle d'usage : Petite habitation

Pour le modèle « petite habitation (< 20 m²) », le calcul des émissions de gaz à effet de serre sur les phases « construction » et « entretien du bâti » aboutit à un gain pour la technologie Voûte Nubienne de 51 à 218 kg de CO₂ eq / m² sur 30 ans, fonction de la technique de référence considérée, soit 0,8 à 3,3 tonnes pour un bâtiment de 15 m².

Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	1 413	3 498	4 118	2 473	3 629
TOTAL / m², dont :	109	219	327	160	288
Phase fabrication	33,1	113,5	66,4	51,3	50,0
Phase transport	18,2	20,9	5,2	7,7	0,3
Phase mise en œuvre (*)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase utilisation (**)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase entretien	57,4	84,2	255,1	100,7	237,7
Différence / VN	0 0%	110 101%	218 201%	51 47%	179 165%

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



- A titre de comparaison, la combustion d'1 L d'essence produit 2,3 kg de CO₂ eq. Les gains d'émissions permis par la technologie Voûte Nubienne pour une unité d'habitation de 15 m² correspondent donc à la consommation (combustion) de 11 à 47 L d'essence par an pendant 30 ans ;
- Les techniques de construction qui ont recours aux matériaux bois et paille sont celles qui ont l'impact le plus important sur le changement climatique ;
- Pour ce modèle d'usage, la phase « entretien du bâtiment » est celle qui émet le plus de gaz à effet de serre pour toutes les techniques de construction, à l'exception de la technique ciment-zinc ;
- La part de la phase « transport » dans le bilan des émissions est inférieure à 20 %.

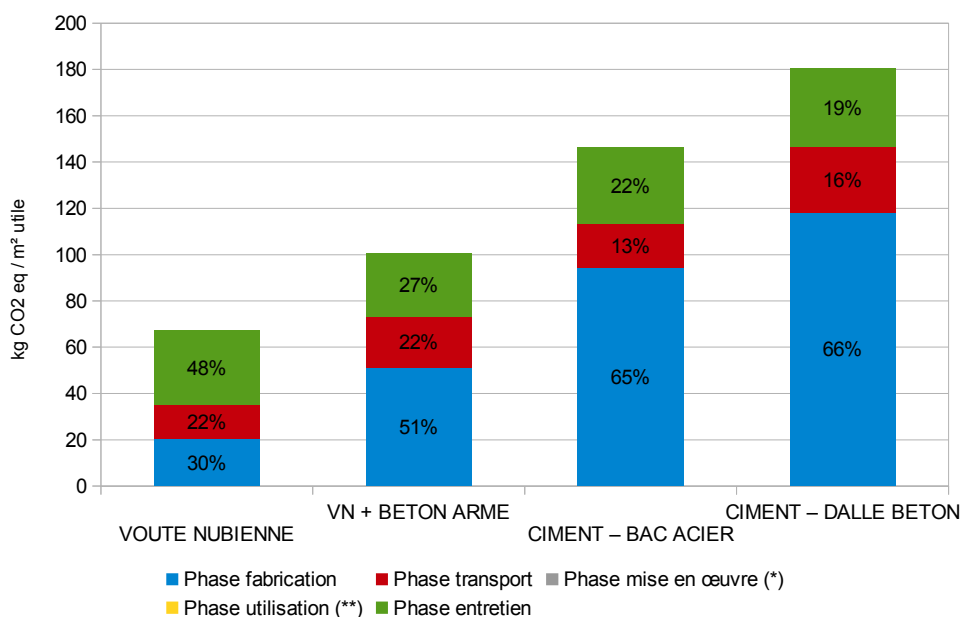
5.3.2. *Modèle d'usage : autres usages*

Pour le modèle « autres usages », le calcul des émissions de gaz à effet de serre sur les phases « construction » et « entretien du bâti » aboutit à un gain pour la technologie Voûte Nubienne de 79 à 113 kg de CO₂ eq / m² sur 30 ans, fonction de la technique de référence considérée, soit 5,5 à 7,9 tonnes pour un bâtiment de 70 m².

Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	4 585	6 874	9 207	11 362
TOTAL / m², dont :	67	101	146	180
Phase fabrication	20,3	51,3	94,3	118,4
Phase transport	14,6	22,0	19,0	28,1
Phase mise en œuvre (*)	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase utilisation (**)	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase entretien	32,2	27,3	32,9	33,9
Différence / VN	0 0%	34 50%	79 118%	113 168%

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



- La technique ciment-dalle béton est la technique qui a le plus grand impact sur le changement climatique, suivi de la technique ciment-bac acier, la technique Voûte Nubienne + béton armé et enfin la technique Voûte Nubienne ;
- Pour ce type d'usages, la phase fabrication des matériaux est celle qui émet le plus de gaz à effet de serre pour toutes les techniques à l'exception de la technique Voûte Nubienne classique.

→ **Les résultats détaillés des impacts environnementaux incluant une ventilation des résultats par phase, par type de matière et par type de parois sont donnés en annexe.**

6. Évaluation de la phase « utilisation des bâtiments – besoins de rafraîchissement »

La quantification des impacts pour la phase « Utilisation : besoins de rafraîchissement » suit les principes de calcul suivant. Par « rafraîchissement », on comprendra dans ce chapitre aussi bien l'utilisation de ventilateurs mécaniques que l'utilisation d'appareils de climatisation.

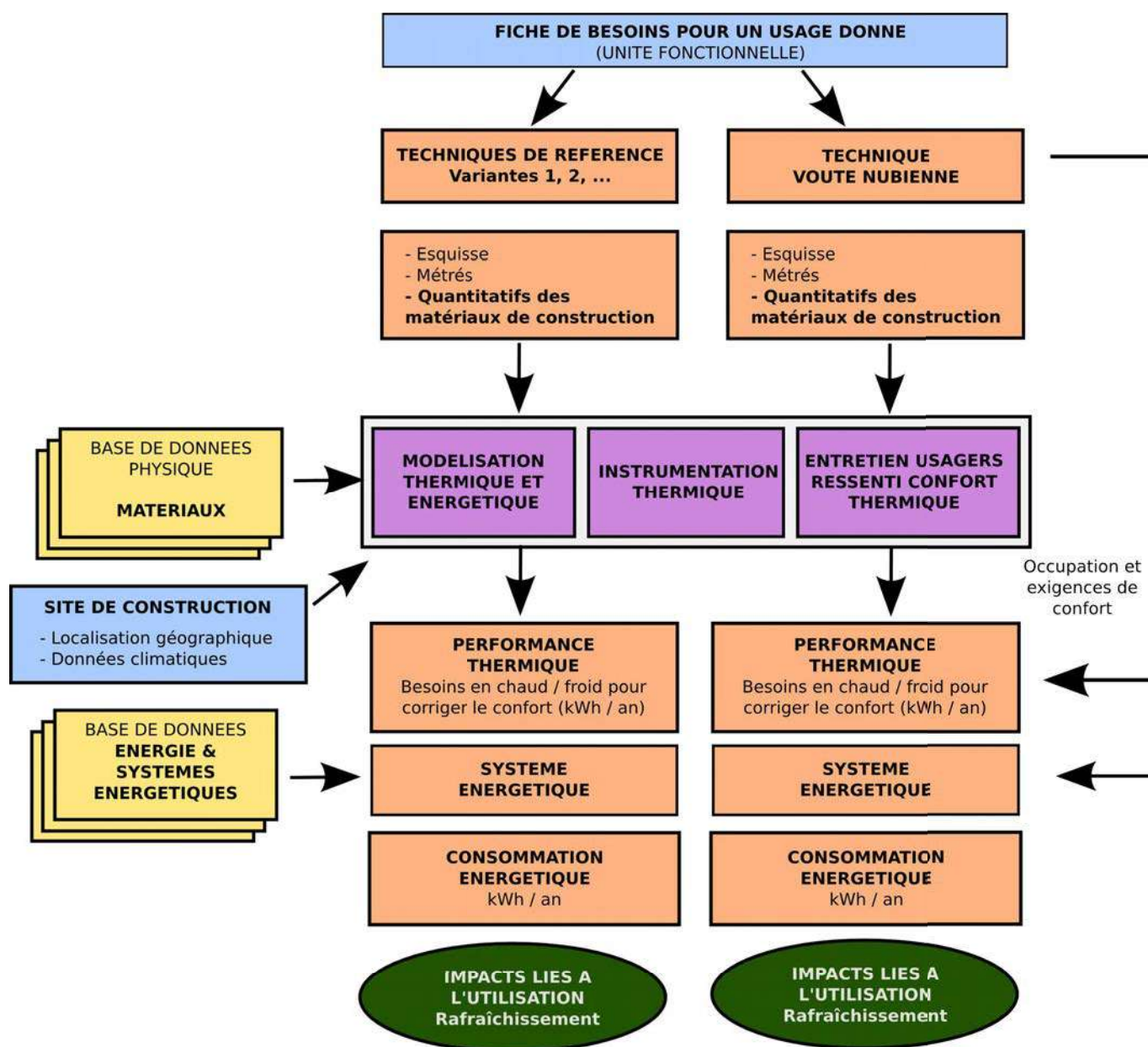


Schéma de principe de la quantification des impacts environnementaux liés à l'utilisation des bâtiments pour la fonction de rafraîchissement (évaluation du confort thermique et de la performance énergétique)

6.1. Définition de la plage de confort thermique

Une définition du confort thermique est donnée dans l'étude « Confort thermique des bâtiments en Voûte Nubienne » (Madiana HAZOUME, 2013) : « *D'un point de vue physiologique, l'être humain éprouve une sensation de confort thermique lorsque les conditions climatiques environnantes permettent au corps d'éliminer la chaleur produite au rythme de son métabolisme, sans pour cela transpirer ou frissonner d'une manière désagréable. L'inconfort est ressenti lorsque l'organisme n'a pas atteint cet équilibre. Si l'organisme ne réussit pas à dissiper ou à conserver la chaleur à un niveau interne acceptable, il en résulte une accumulation de chaleur, qui conduit à une augmentation de la température interne et à des sensations d'inconfort.* »

Les facteurs influençant la sensation de confort thermique sont liés à l'individu (habillement, activité, état physique et psychologique) et à l'environnement immédiat :

- Température de l'air
- Température des parois
- Vitesse de l'air
- Taux d'humidité relative de l'air ambiant

La norme « ISO 7730 – Ergonomie des ambiances thermiques » définit une méthode de calcul décrite par Fanger en 1970 permettant de prédire le pourcentage de personnes ressentant un inconfort en fonction de l'ambiance thermique dans laquelle ils se trouvent. Ces pourcentages de confort / inconfort valent pour des personnes vivant dans des climats tempérés ou froids. Des personnes vivant dans des climats chauds ont une perception de confort différente. Dans le cadre de cette étude, afin de fournir de grandes tendances concernant l'inconfort dans les bâtiments étudiés, nous retiendrons les plages suivantes :

Noms des plages de confort / inconfort	Plage de température intérieure correspondante
Plage d'inconfort froid	Température intérieure < 20°C
Plage de confort	20°C ≤ Température intérieure < 32 °C
Plage d'inconfort chaud	Température intérieure ≥ 32°C
Plage d'inconfort chaud extrême	Température intérieure ≥ 37°C

Ces plages d'inconfort s'inspirent des études existantes, des normes, mais aussi des retours d'expériences concernant l'évaluation subjective du confort par les occupants de bâtiments. Il a été ainsi fixé une limite inférieure caractérisant l'inconfort « froid » pour une température inférieure à 20°C, nombre d'occupants sénégalais ressentant un inconfort pendant la nuit lors de la saison sèche froide.

Par souci de simplicité, il n'a pas été tenu compte ici de l'influence des paramètres « humidité relative de l'air » et « vitesse du vent ». Si ce second paramètre s'avère déterminant dans la caractérisation du confort thermique, l'étude de son influence conjointe avec le paramètre température dépasse le cadre de cette étude.

Note : Dans la suite de ce document, les résultats obtenus seront nuancés chaque fois que l'influence de la vitesse du vent – et plus largement du renouvellement d'air – s'avère déterminant.

6.2. Instrumentation thermique comparative

Deux instrumentations thermiques comparatives de bâtiments Voûte Nubienne ont été réalisées par le passé :

- « *Indicateurs de confort dans la technique de la Voûte Nubienne* » (Urs WYSS, 2007) réalisée à Boromo au Burkina Faso ;
- une instrumentation de bâtiments de conservation de l'oignon à Yako, Burkina Faso, dont les résultats d'analyse ne sont pas encore disponibles.

Aucune instrumentation thermique de bâtiments en Voûte Nubienne n'avait été réalisée à ce jour au Sénégal.

6.2.1. Protocole de mesure

Lors de la mission de terrain, 4 bâtiments ruraux d'habitation ont été instrumentés avec des sondes thermiques : il s'agit des bâtiments ayant servi au relevé des quantitatifs de matériaux (voir Partie II / § 4). Les objectifs de cette campagne de mesures étaient :

- d'appréhender le comportement thermique des différentes technologies de construction ;
- d'évaluer l'inconfort thermique résultant ;
- de valider les paramètres d'entrée de la simulation thermique dynamique menée en parallèle, destinée à évaluer la performance énergétique des bâtiments.

Période d'instrumentation :	26 janvier au 23 mars 2015, 57 jours, 1368 heures analysées
Localisation :	Village de Nguéye Gueye, commune et département de Bambey, région de Diourbel
Pas de mesures :	toutes les 15 minutes
Grandeurs mesurées :	Température extérieure et humidité extérieure Température intérieure et humidité intérieure
Bâtiments instrumentés :	idem bâtiments ayant servi au relevé des quantitatifs de matériaux (surface utile intérieure de l'ordre de 12,6 à 16 m ²)
Position des instruments :	Suspendus à environ 50 à 80 cm du plafond
Masques solaires :	Faibles pour tous les bâtiments
Usage des bâtiments :	Bâtiments d'utilisation, occupés lors de la période d'instrumentation

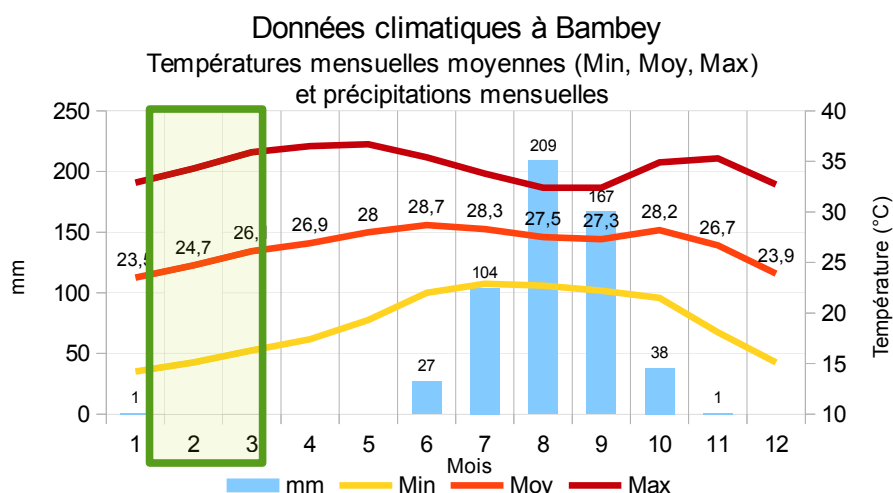
Les occupants des bâtiments instrumentés ont été prévenus de l'installation de ces instruments, avec pour recommandations principales :

- de ne jamais toucher ou déplacer la sonde thermique à aucun moment ;
- de ne modifier aucun comportement quand à l'utilisation de leur bâtiment (occupation, gestion des ouvrants,...)

L'interprétation des résultats obtenus reste donc tributaire des paramètres comportementaux des occupants qui

différent forcément d'un bâtiment à l'autre. Fixer ces paramètres comportementaux aurait nécessité la mise à disposition de bâtiments non occupés, ce qui était ni envisageable, ni suffisamment représentatif des conditions réelles d'utilisation de bâtiments par des individus.

La période instrumentée correspond à la fin de la saison sèche froide et au début de la saison sèche chaude : il ne s'agit donc pas de la période la plus défavorable (la plus chaude) en terme d'inconfort.



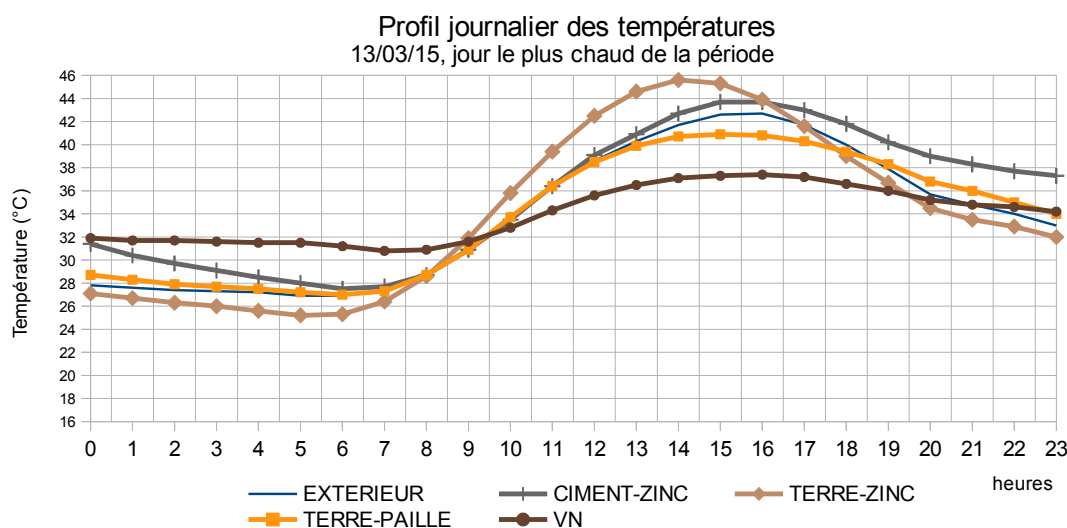
Données climatiques à Bambey
Source : Climate-data.org

Modèle du thermohygromètre utilisé
dans le cadre de la campagne de mesures

6.2.2. Résultats obtenus

6.2.2.1. Évolutions des températures relevées

Le profil journalier des températures du jour le plus chaud de la période est utilisé pour visualiser la réponse des différents bâtiments aux variations de température et d'ensoleillement.



- Pour le bâtiment en Voûte Nubienne, on note une faible amplitude journalière des températures intérieures, malgré l'amplitude des températures extérieures ;
- Les bâtiments qui connaissent les amplitudes de températures journalières intérieures les plus importantes sont les bâtiments aux toitures de zinc ;
- Les bâtiments en Voûte Nubienne et avec une toiture en paille sont les deux seuls bâtiments pour lesquels la température intérieure est inférieure à la température extérieure pendant la journée.

Ci-dessous sont représentées les températures minimales, moyennes et maximales ainsi que l'amplitude moyenne des températures sur la période d'instrumentation :

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
Température minimale sur la période	17,6	18,6	15,8	18,1	24,8
Température moyenne sur la période	27,4	29,3	28,1	27,7	30,7
Température maximale sur la période	43,4	45	46,9	41,3	37,6
Amplitude moyenne journalière des températures (Tmax – Tmin)	15,1	15,5	19,9	13,2	5,3

Ces analyses permettent de mettre en évidence la forte inertie thermique des bâtiments en Voûte Nubienne :

Lorsque le soleil frappe le mur d'un bâtiment, une partie du rayonnement est réfléchi, l'autre partie est absorbée par la paroi. L'onde de chaleur se transmet de l'extérieur vers l'intérieur à travers les murs en subissant un certain amortissement et un déphasage. On peut définir l'inertie thermique d'un bâtiment, comme étant sa capacité à stocker et à déstocker de l'énergie dans sa structure. Elle définit la vitesse à laquelle le bâtiment se refroidit ou se réchauffe. Elle permet d'amortir les variations de température intérieure.

L'inertie du bâti Voûte Nubienne procurée par la forte épaisseur des parois en terre se caractérise par ainsi par une forte atténuation des variations de températures à l'intérieur du bâtiment.

6.2.2.2. Évaluation du confort thermique résultant

La méthode utilisée ici pour évaluer l'inconfort thermique dans les bâtiments instrumentés consiste :

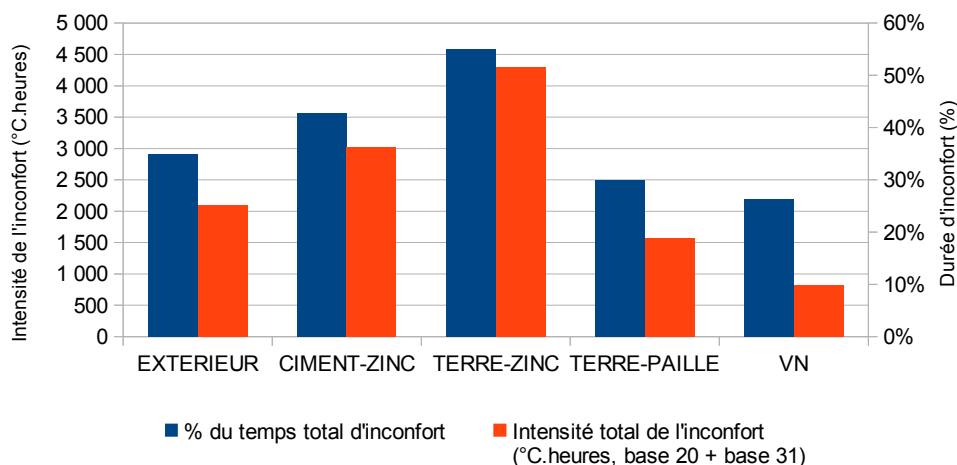
- à compter le nombre d'heures pendant lesquelles la température intérieure se trouve en dehors de la plage de confort définie dans le paragraphe précédent pour caractériser la durée pendant laquelle le confort n'est pas atteint ;

- à compter les °C.heures pendant ces périodes d'inconfort pour caractériser l'intensité de l'inconfort.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau et le graphique ci-dessous :

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
% du temps d'inconfort avec T > 32°C	24%	32%	31%	24%	26%
Intensité de l'inconfort chaud (°C.heures, base 31)	1332	1957	2378	1141	785
% du temps d'inconfort extrême avec T > 37°C	7%	10%	14%	4%	0%
Intensité de l'inconfort chaud extrême (°C.heures, base 31)	677	1051	1686	386	33
% du temps d'inconfort avec T < 20°C	5%	1%	10%	2%	0%
Intensité de l'inconfort froid (°C.heures, base 20)	88	20	232	43	0
% du temps total d'inconfort	35%	43%	55%	30%	26%
Intensité total de l'inconfort (°C.heures, base 20 + base 31)	2097	3027	4296	1570	818

Evaluation de l'inconfort



- Les bâtiments avec toiture en zinc connaissent l'inconfort le plus important, en terme de durée et d'intensité. Cet inconfort est principalement dû au rayonnement solaire transmis à l'intérieur du bâtiment par le métal (forte conductivité thermique) ;
- L'inconfort dans le bâtiment avec toiture en paille est beaucoup moins important grâce à la bonne isolation thermique des matériaux paille / roseaux ;

- L'inconfort dans le bâtiment en voûte est le moins important, grâce à la forte inertie thermique procurée par les épaisses parois en terre-crue.

D'après la méthode d'évaluation utilisée, le bâtiment Voûte Nubienne est celui dans lequel l'inconfort est le plus réduit, tant en terme de durée que d'intensité. Il n'enregistre pas, sur la période d'instrumentation de période d'inconfort extrême (température > 37 °C) ni d'inconfort du au froid, contrairement aux autres techniques de construction.

S'il semble indéniable que la technologie Voûte Nubienne permet une amélioration sensible du confort thermique intérieur, les résultats de cette évaluation doivent cependant être nuancés par les observations suivantes :

- L'instrumentation thermique a été réalisée sur une période de 57 jours et non sur l'ensemble des saisons ;
- L'instrumentation thermique a été réalisée sur la commune de Bambey. On ne peut pas en déduire les influences des variations climatiques sénégalaises sur le comportement et le confort thermique des bâtiments ;
- Il s'agit d'une étude de cas pour 4 bâtiments sélectionnés et non d'une analyse de données sur un échantillon de bâtiments plus importants ;
- Les bâtiments étudiés n'ont pas les mêmes taux de renouvellement d'air : les deux bâtiments en toiture de zinc disposent de deux portes disposées face à face, de part et d'autre du bâtiment. Cette disposition permet de favoriser la ventilation naturelle traversante, atténuant ainsi la sensation d'inconfort.
- Il n'a pas été tenu compte ici de la vitesse du vent dans l'évaluation du confort intérieur : ce paramètre est pourtant essentiel et permet de réduire sensiblement la sensation d'inconfort des individus à température intérieure égale ;



Disposition des ouvertures permettant une ventilation naturelle traversante du bâtiment afin d'atténuer l'inconfort

→ **Les résultats détaillés de l'évaluation du confort thermique d'après cette instrumentation thermique comparative sont disponibles en annexe**

6.3. Simulation thermique dynamique

L'objectif de la simulation thermique dynamique est d'évaluer pour chaque technique constructive les besoins en énergie nécessaire pour le rafraîchissement du bâtiment dans les différents climats du Sénégal et les émissions de gaz à effet de serre qui en découlent.

6.3.1. Hypothèses de calcul et protocole suivi

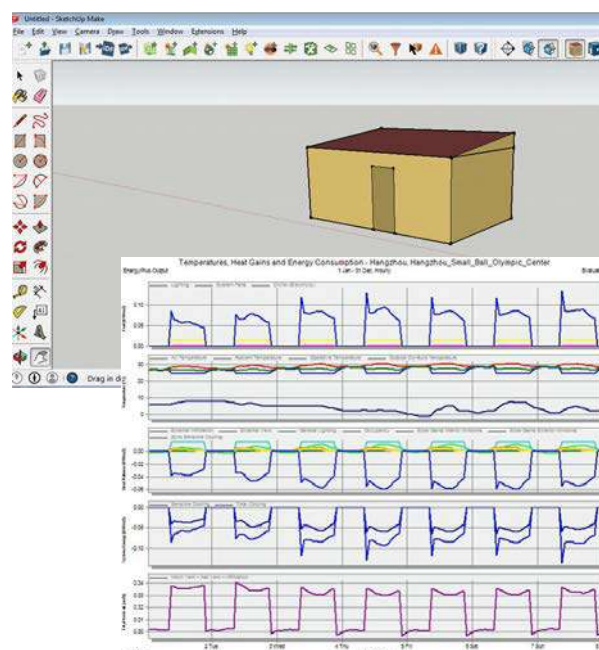
Moteur de calcul thermique :	Energy Plus 8.2
Logiciels de simulation :	Sketch Up 8 (modélisation du bâti) Open Studio 1.6 (modélisation des systèmes) Energy Plus 8.2 (calculs)
Données physiques matériaux :	OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, <i>L'isolation Thermique Ecologique</i> , Editions Terre Vivante, 2010
Données climatiques :	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), IWE22 weather data (2011) Sites : Dakar, Diourbel, Kaolack, Linguere, Matam, Podor, Tambacounda, Ziguinchor Température, pluviométrie, ensoleillement, vitesse du vent : données au pas horaire Température du sol : température extérieure moyenne mensuelle déphasée d'un mois
Pas de simulation :	Calculs au pas horaire
Simulations réalisées :	Pour chacun des 8 sites climatiques et des 4 variantes de systèmes constructifs : - Simulation sans thermostat (libre) pour évaluer les évolutions de températures intérieures - Simulation avec thermostat (20 – 32 °C) pour évaluer les besoins énergétiques de chauffage et de rafraîchissement
Renouvellement d'air :	Calcul du renouvellement d'air selon Sherman and Grimsrud (1980), fonction de la vitesse du vent, de la température et de la surface d'ouvertures. Renouvellement d'air moyen effectif compris entre 1,7 et 3,6 vol/heure, selon les régions.



REPÈRE METHODOLOGIQUE – ETUDE THERMIQUE DYNAMIQUE

L'étude thermique permet de modéliser un bâtiment en saisissant son orientation, ses ouvertures, ces parois, la nature des matériaux... dans un lieu et un climat donné pour connaître l'évolution de sa température intérieure, de ses besoins d'énergie de chauffage et/ou de climatisation.

L'étude thermique dynamique permet la prise en compte de l'inertie des matériaux (chaleur spécifique et masse volumique), l'ensoleillement sur les parois et les variations climatiques (température et ensoleillement) correspondant au climat dans lequel le bâtiment est modélisé. La simulation se fait au pas horaire et permet d'obtenir les grandeurs que l'on souhaite mesurer et qu'il aurait été long et fastidieux de relever in-situ par des campagnes d'instrumentation.



La simulation thermique dynamique a été réalisée à partir du logiciel Energy Plus pour les 4 bâtiments suivants. Les dimensions caractéristiques des bâtiments modélisés (surface intérieure, volume habitable, surfaces de parois extérieures,...) sont relativement proches malgré les exigences dimensionnelles que doivent respecter les bâtiments en Voûte Nubienne (largeur maximale de voûte). Les menuiseries ont été positionnées sur les façades Nord et Sud pour réduire l'influence du rayonnement solaire sur celle-ci dans les résultats à interpréter. Il a été choisi un renouvellement d'air fonction de la vitesse du vent, de la différence entre la température intérieure et extérieure et de la dimension des ouvertures d'aération. Les bâtiments ont été positionnés dans 8 climats différents : Dakar, Diourbel, Kaolack, Linguere, Matam, Podor, Tambacounda et Ziguinchor.

VARIANTES	ORIENTATION	MENUISERIES	SURFACE INT.	Dimensions intérieures	DESCRIPTIF
VOUTE NUBIENNE	Façades Longues orientées Nord-Sud	Huisseries métalliques 1 porte en façade Sud (0,9 m x 2,05m) 2 fenêtres en façade Nord (0,9 m x 1,2 m)	24 m²	L x l = 7,40m x 3,25m Hauteur Sous Plafond : min = 1,60 m / max = 3,20 m	- Murs et toiture en Voûte Nubienne, enduits extérieurs ciment, enduits intérieur terre
CIMENT + BAC ACIER				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : min = 2,50 m / max = 3,00 m	- Murs en plots de ciment - toiture bac acier - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment
CIMENT + DALLE BETON				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : 2,80 m	- Murs en plots de ciment - Toiture dalle béton 20 cm - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment
CIMENT + TOITURE PAILLE				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : 2,80 m	- Murs en plots de ciment - Toiture paille, épaisseur 10 cm - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment

La simulation thermique dynamique permet d'obtenir les valeurs horaires des températures intérieures (°C) et des besoins d'énergie utile pour le rafraîchissement (W) sur toute l'année dans le climat considéré. A partir de ces données, sont calculées :

- La consommation d'énergie finale électrique nécessaire pour ventiler le bâtiment lors des périodes d'inconfort ;
- La consommation d'énergie finale électrique nécessaire pour climatiser le bâtiment et le garder dans la plage de confort définie au paragraphe précédent.

Le détail des hypothèses de calculs figurent dans le tableau suivant :

Système de ventilation :	Ventilateur mécanique type : ventilateur sur pied ou ventilateur plafonnier, puissance installée : 100 W / m² sur réseau électrique
Calcul des besoins de ventilation :	Fonctionnement du ventilateur lorsque la température intérieure simulée est supérieure ou égale à 32°C. Modulation de la vitesse du ventilateur en fonction de la température intérieure : 32°C : 20 % ; 33°C : 30 % ; 34°C : 50 % ; 35°C : 70 % ; 36°C : 90 % ; 37°C et plus : 100 % Application des facteurs d'émissions du mix de production d'électricité sénégalais
Système de climatisation :	Climatiseur type SPLIT (COP moyen annuel = 2) sur réseau électrique Rendement de régulation : 80 %
Calcul des besoins de climatisation :	Modélisation des besoins utiles de froid d'après simulation thermique dynamique, charges idéales, thermostat entre 20°C et 32°C. Application du rendement de régulation, du COP du système et des facteurs d'émissions du mix de production d'électricité sénégalais

6.3.2. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont présentés ici **pour le climat de Diourbel** qui est le climat « médian » pour les différentes données climatiques du Sénégal utilisées :

	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
CLIMATISATION					
Besoins froid max. (kW)	-	3,91	2,22	1,95	1,48
Energie finale froid (kWh ef / m².an)	-	78,4	30,8	20,0	5,5
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	70,58	27,73	17,97	4,91
VENTILATION					
Energie finale Ventilateur (kWh ef / m².an)	-	12,1	7,5	5,5	2,0
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	10,93	6,78	4,97	1,77

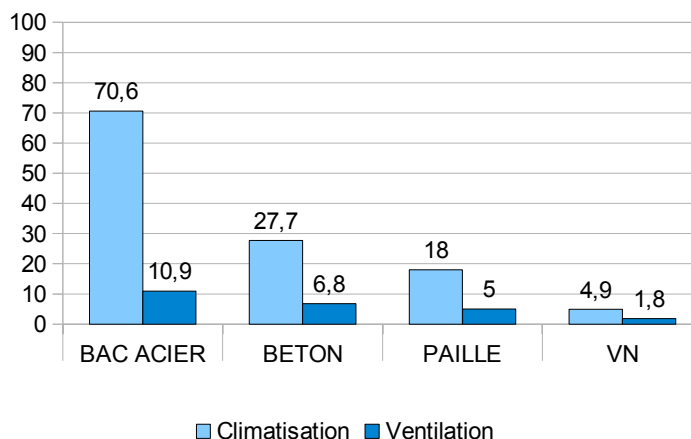
VENTILATION

- L'énergie électrique finale consommée pour les besoins de rafraîchissement du bâtiment Voûte Nubienne sont de 2 kWh / m².an.
- L'énergie électrique finale consommée pour les besoins de rafraîchissement des autres techniques de construction est comprise entre 5,5 et 12,1 kWh / m².an
- **soit un gain permis par la technologie Voûte Nubienne de 3,5 à 10,1 kWh / m².an, ce qui correspond à un gain d'émissions de gaz à effet de serre de 3,2 à 9,1 kg CO2 eq / m².an en considérant le mix de production d'électricité sénégalais**

CLIMATISATION

- L'énergie électrique finale consommée pour les besoins de rafraîchissement du bâtiment Voûte Nubienne sont de 5,5 kWh / m².an.
- L'énergie électrique finale consommée pour les besoins de rafraîchissement des autres techniques de construction est comprise entre 20,0 et 78,4 kWh / m².an
- **soit un gain permis par la technologie Voûte Nubienne de 14,5 à 72,9 kWh / m².an, ce qui correspond à un gain d'émissions de gaz à effet de serre de 13,1 à 65,7 kg CO2 eq / m².an en considérant le mix de production d'électricité sénégalais**

Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraîchissement (kg CO₂ eq / m².an)
Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C



Ces résultats démontrent des gains potentiels importants en terme d'efficacité énergétique des bâtiments permis par la technologie Voûte Nubienne, qui peuvent se traduire par les avantages suivants sur la conception des systèmes énergétiques et le réseau de production et de distribution d'électricité :

- Réduction de la demande globale en électricité finale pour le rafraîchissement ;
- Réduction de la demande en électricité pendant les pics de consommation, la journée, lorsque l'ensoleillement est le plus important ;
- Les besoins maximum en froid, exprimés en kW d'énergie utile permettent le dimensionnement de la puissance des appareils de climatisation. La puissance froid maximale pour la technologie Voûte Nubienne est inférieure à celle des autres techniques de construction. Il est donc possible de sous-dimensionner les appareils de climatisation à installer sur le bâti, et donc de réduire les coûts d'investissement. Il s'agit d'un avantage certain dans le cas d'une installation non reliée au réseau d'électricité (off-grid), notamment pour les installations solaires ;
- Bonne adéquation a priori entre le bâti Voûte Nubienne et les appareils de climatisation, la continuité des parois murs /toitures réduisant les points d'infiltration/exfiltration de l'enveloppe thermique et permettant ainsi une meilleure maîtrise des flux d'air.

Si des gains importants en terme d'efficacité énergétique semblent réalisables grâce au bâti Voûte Nubienne, il convient de préciser ici les limites de cette simulation thermique dynamique :

- La présente modélisation thermique n'a pas « exploré » les multiples pistes d'optimisation permises par la conception bioclimatique : orientation du bâtiment, loggias, couloirs et volumes tampons, fenêtres au nus intérieur, protections solaires, ventilation naturelle... La conception d'habitat vert et la recherche d'un confort optimal doit s'attacher à tenir compte de ces principes avant d'envisager un système électrique de rafraîchissement.

- La présente simulation a été réalisée en prenant une surface extérieure d'aération par défaut pour le calcul du renouvellement naturel de l'air. L'influence de ce paramètre sur les consommations énergétiques calculées a été analysée et montre cependant une variation relativement faible des gains potentiels ;
- L'influence de l'isolation thermique de la toiture a été analysée, et les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

Un matériau d'isolation permet, du fait de sa porosité élevée (alvéoles, interstices ou vides remplis d'air ambiant) de réduire fortement le flux de chaleur qui le traverse et qui traverse la paroi dans laquelle il est mis en œuvre. En zone tropicale, la paroi la plus exposée au rayonnement solaire est de très loin la toiture, ce qui la positionne comme la paroi à isoler en priorité (pour isoler fortement un bâtiment, il convient cependant d'en isoler toutes les parois sans exception).

La simulation thermique dynamique a été utilisée ici dans le climat de Matam pour apprécier les gains obtenus en terme de performance thermique de 10 cm d'isolation en toiture. Il s'agit ici de grandes tendances qui nécessiteraient d'être évaluées in situ.

EVOLUTION DES INDICATEURS APRES ISOLATION TOITURE (*)	AVANT ISOLATION				APRES ISOLATION			
	CIMENT-ZINC	CIMENT-ZINC + FAUX-PLAFOND	CIMENT-DALLE BETON	VOUTE NUBIENNE	CIMENT-ZINC	CIMENT-ZINC + FAUX-PLAFOND	CIMENT-DALLE BETON	VOUTE NUBIENNE
Refroidissement actif								
Energie primaire froid (kWh ep / m².an)	318	204	205	108	151	143	142	91
Emissions CO2eq froid (kgCO2 eq / m².an)	83	53	53	28	39	37	37	24

(*) couche d'isolation uniforme sur toute la surface de la toiture, épaisseur 10 cm, λ isolant = 0,04 W/m.K, position extérieure pour toiture dalle béton et Voûte Nubienne, position sous couverture pour toiture zinc. Données climatiques : ASHRAE 2011, localisation : Matam

Il apparaît que les gains sont d'autant plus importants que la paroi initiale est faiblement isolante / fortement conductrice, et que les performances thermiques obtenues pour les autres techniques avec isolation (151 à 142 kWh ep / m².an) sont en deçà des performances thermiques de la technique Voûte Nubienne sans isolation (108 kWh ep / m².an). Les gains pour la technique Voûte Nubienne restent faibles (-17 kWh ep / m².an). La large majorité des bâtiments ruraux n'étant pas climatisés et les exigences de confort des occupants encore relativement faibles, le gain potentiel en terme de confort de l'isolation des toitures par un matériau d'isolation ne semble pas probant, du moins pas dans les réalités économiques locales.

L'isolation thermique présente pourtant un intérêt vraisemblablement intéressant pour concevoir des bâtiments en voûte nubienne à très faible consommation énergétique, par exemple pour la construction de salles frigorifiques (bâtiments de conservation agricole, conservation de médicaments,...), et ceci lorsque toutes les règles de conception bioclimatique ont été suivies et les flux d'air maîtrisés et exploités (surventilation nocturne) pour optimiser les performances thermiques du bâtiment. A ce jour, il semble qu'aucun bâtiment pilote en voûte nubienne de ce type n'a été construit, ni au Sénégal, ni en Afrique de l'Ouest.

La performance thermique du bâti Voûte Nubienne permet des gains importants :

- **en terme d'amélioration du confort thermique**
- **en terme d'efficacité énergétique et donc de réduction des consommations d'électricité finale pour le rafraîchissement, et des émissions de gaz à effet de serre qui en résultent.**

Cependant, il est important de rappeler ici qu'en milieu rural, du fait du faible niveau de ressources des populations et d'un faible taux d'électrification rurale :

- **la très large majorité des bâtiments ne sont pas climatisés**
- **la majorité des bâtiments ne sont pas ventilés**

Dans la situation actuelle, les gains environnementaux potentiels ne sont donc que très partiels. Pourtant, le Sénégal aspire à un développement économique et humain permettant à sa population de vivre dans des conditions décentes : le taux d'électrification rurale, la demande en électricité et les exigences de confort augmentent année après année. Ainsi, la performance thermique du bâti Voûte Nubienne permettrait d'anticiper la croissance future de la demande en énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

→ La partie III / § 3.2 fournit des informations supplémentaires sur le mécanisme de « Suppressed demand » permettant de valoriser les économies d'émissions qui sont réalisables dans le futur, c'est à dire en tenant compte du développement économique et social du Sénégal

7. Synthèse des résultats obtenus

Le tableau suivant propose une synthèse des économies d'émissions de gaz à effet de serre permises par la technologie Voûte Nubienne, comparativement aux techniques courantes constructives du Sénégal, pour la construction de bâtiments neufs, sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages (durée de vie des ouvrages = 30 ans) :

- Pour les phases "fabrication des matériaux", "transport des matériaux sur chantier", "entretien du bâti
- Pour la phase "utilisation" : usages de rafraîchissement uniquement

Type d'usage	GAIN par rapport à l'habitat / le climat régional de référence ⁽¹⁾		CONSTRUCTION (fabrication, transport) + ENTRETIEN	Suppressed Demand VENTILATION ⁽²⁾	Suppressed Demand CLIMATISATION ⁽³⁾
Petite habitation < 20 m ² 1 pièce	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	100 à 170	50 à 260	270 à 2 000
		Moyenne	130	240	1 700
	<i>Exemple : Pour 15 m², en tonnes CO2 eq Sur 30 ans</i>	Min : Max	1,50 à 2,60	0,820 à 3,90	4,00 à 29,9
		Moyenne	1,9	3,8	26
Habitation moyenne Entre 20 et 50 m ² Plusieurs pièces	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	100 à 140	5 à 230	20 à 1 600
		Moyenne	120	200	1 200
	<i>Exemple : Pour 30 m², en tonnes CO2 eq Sur 30 ans</i>	Min : Max	3,10 à 4,25	0,150 à 6,86	0,570 à 47,7
		Moyenne	3,6	6,0	37
Autres usages ou Grande habitation > 50 m ² Plusieurs pièces	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	85 à 110	5 à 230	20 à 1 700
		Moyenne	96	210	1 300
	<i>Exemple : Pour 70 m², en tonnes CO2 eq Sur 30 ans</i>	Min : Max	6,00 à 7,80	0,350 à 16,2	1,33 à 117
		Moyenne	6,7	15	93
Technique Voûte Nubienne – Béton Armé (VN-BA)	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	50 à 80	5 à 230	20 à 1 700
		Moyenne	63	210	1 300
	<i>Exemple : Pour 70 m², en tonnes CO2 eq Sur 30 ans</i>	Min : Max	3,7 à 5,4	0,350 à 16,2	1,33 à 117
		Moyenne	4,4	15	93

(1) Habitat de référence = répartition régionale des constructions neuves par typologie des murs (ciment, banco, paille) et toitures (béton, zinc, paille), calculs du consultant d'après données ANSD 2002 et 2013

Climat de référence = données climatiques d'après ASHRAE pour Dakar, Diourbel, Kaolack, Linguere, Matam, Podor, Tambacounda, Ziguinchor

(2) Suppressed Demand VENTILATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour ventiler les bâtiments lorsque la température intérieure se trouve en dehors de la plage de confort comprise entre 20°C et 32°C, par un système de ventilation type ventilateur sur pied ou ventilateur plafonnier (puissance max = 100 W pour 25 m², modulation de puissance (vitesse) en fonction de la température intérieure ; mis de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

(3) Suppressed Demand CLIMATISATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour maintenir les bâtiments dans une plage de confort comprise entre 20°C et 32°C par un système de climatisation type SPLIT sur réseau électrique (COP = 2 ; mix de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

PARTIE III : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DU PROJET

1. Sites retenus pour le projet

1.1. Échelle d'intervention

Du point de vue de la diffusion de la technique Voûte Nubienne, il semble essentiel de choisir une échelle d'intervention permettant :

- La gestion locale de la mise en œuvre du projet
- L'accès d'un nombre suffisant de bénéficiaires
- La réalisation d'un nombre suffisant de bâtiments
- La mise en place d'un marché pérenne
- L'implication d'acteurs clés dans les territoires
- La pérennité et la répliquabilité

Au regard de ces objectifs et des expériences précédentes en matière de diffusion de la technologie Voûte Nubienne, les échelles villageoises et communales semblent trop restreintes pour la mise en œuvre du projet. Les échelles départementales et régionales avec un focus sur des territoires identifiés (un ou plusieurs départements, une ou plusieurs communes, ensemble de villages pilotes...) semblent les plus pertinentes.

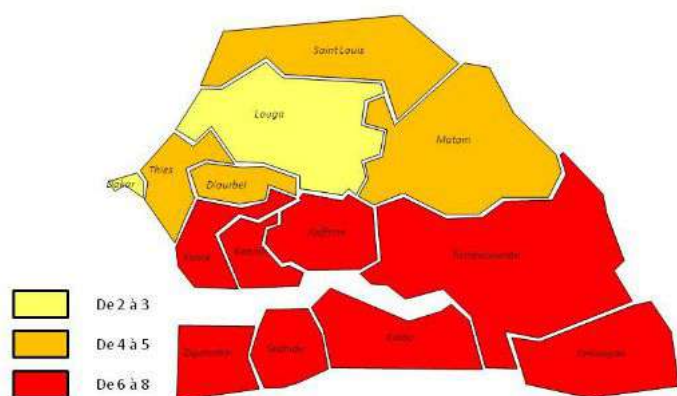
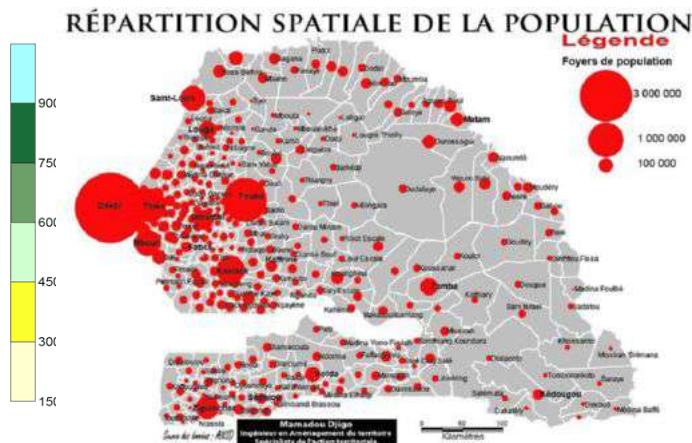
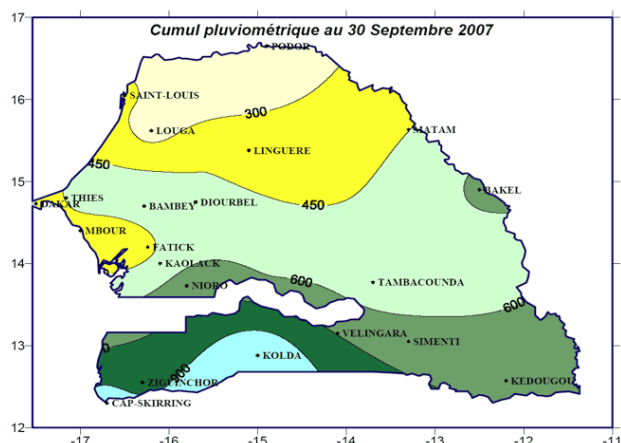
1.2. Localisation

Trois sites sont à choisir pour la mise en œuvre du projet dans l'une des 14 régions administratives du Sénégal. Une analyse des critères déterminants pour la réussite du projet est proposée dans le tableau ci-dessous. Les cartes de situation de la page suivante aident à positionner chaque région relativement à chaque critère.

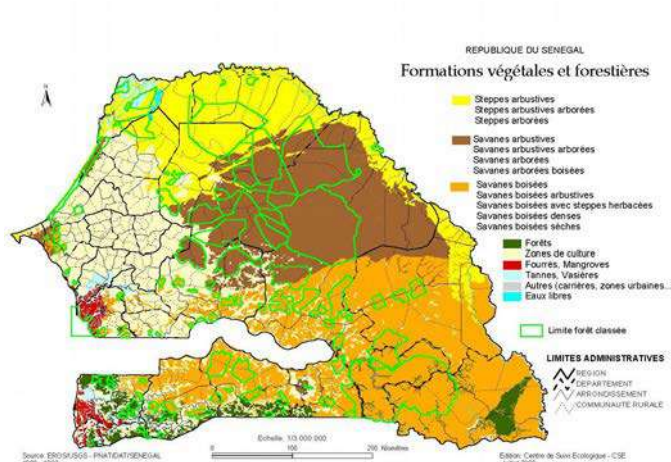
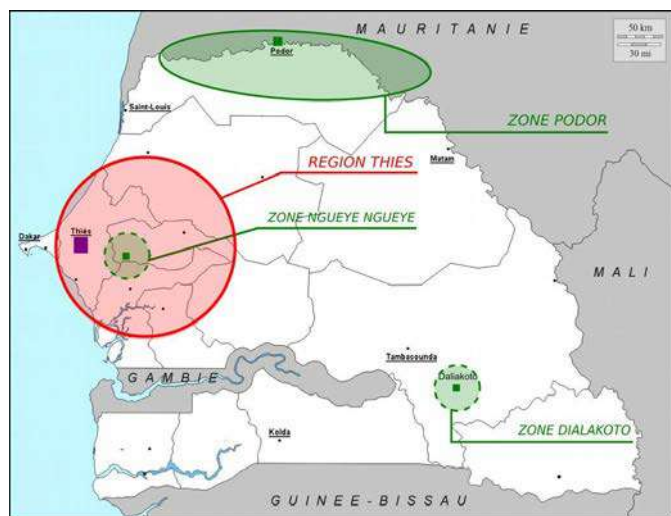
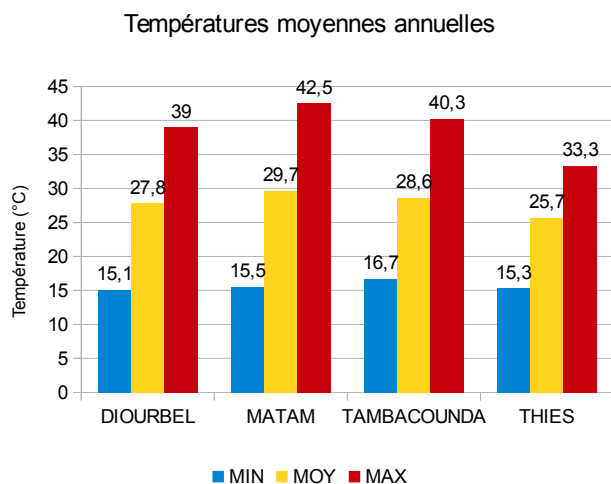


Régions administratives du Sénégal, source : d-maps.com

Groupes de critères	Critères	Évaluation
Critères techniques	- Niveau de pluviométrie < 1 000 à 1 200 mm / an - Sols stables, zones non inondables, - Disponibilité en terre de construction - Disponibilité en eau	- S'il est possible de construire en Voûte Nubienne jusqu'à 1000 à 1 200 mm/an (exemple : Banfora, Burkina Faso : 1 086 mm/an), on pourra se limiter dans le cadre du projet à des zones < à 900-1 000 mm/an ce qui exclut les régions de Ziguinchor, Sedhiou, Kolda, Kedougou. Pour comparaison : Boromo, Burkina Faso : 871 mm, plus forte concentration de bâtiment voûte nubienne en Afrique de l'Ouest - Certains sols trop sableux rendent difficile l'accès à la terre (très profond) : exemple : zones des Niayes, région de Louga,...
Critères démographiques et socio-économiques	- % de population rurale suffisante (projet en milieu rural) - Densité suffisante de population et de villages pour faciliter la vulgarisation et la diffusion, - Typologie du parc bâti et caractéristiques du marché de la construction facilitant l'appropriation locale (recours au banco, main d'œuvre locale,...) - Niveau de pauvreté : ciblage des populations bénéficiaires	- La région de Dakar est à exclure pour la mise en œuvre du projet car quasiment uniquement urbaine ; la région de Thiès n'est pas à privilégier - La zone sylvo-pastorale (Louga, Matam, Tambacounda) et la région de Kedougou ont une faible densité de population ce qui n'est pas propice à la diffusion de la technologie - La vallée du fleuve possède une densité de population importante, mais son étalement le long du fleuve sur plus de 700 km pour 30 à 50 km de large est une contrainte, certes surmontable, en terme de diffusion - La densité de population est importante dans le bassin arachidier. - Le territoire situé sur l'axe Fatick – Kaolack – Kaffrine – Tambacounda tendra potentiellement à se densifier dans les années à venir - Le ciblage des populations le plus dans le besoin d'un habitat décent priorise les régions du Sud du Sénégal : Fatick, Kaolack, Kaffrine, Tambacounda, Ziguinchor, Sedhiou, Kolda, Kedougou
Critères de confort et d'efficacité énergétique	- Réduction de l'inconfort en périodes froides - Réduction de l'inconfort en périodes chaudes et réduction de la consommation d'électricité finale - Taux d'électrification rurale	Vues les données climatiques, toutes les populations du Sénégal sont dans le besoin d'une amélioration du confort en périodes chaudes, mais ce besoin sera beaucoup moins marqué pour les régions de Dakar et Thiès
Critères de mise en œuvre	- Prise en compte de l'historique du déploiement Voûte Nubienne : Tirer partie des réalisations et acteurs sensibilisés / formés existants, soit sur place, soit par répliquabilité / duplication / transfert de compétences - Recherche de synergies avec les pratiques de Gestion Durable des Terres - Présence d'acteurs spécifiques à impliquer	- Des acteurs déploient la technologie Voûte Nubienne dans les régions de Saint-Louis, Thiès, Diourbel, Fatick et Tambacounda - Des bâtiments en Voûte Nubienne ont été réalisés principalement dans la vallée du fleuve Sénégal et dans le bassin arachidier
Critères environnementaux	- Choix des sites en fonction de la disponibilité en fibres végétales (bois, paille) comme matériau de construction et en fonction du niveau de dégradation du sols et du couvert végétal	3 types d'espaces : - steppes et savanes arbusives - zones de culture - savane boisée



Proportion de pauvres au Sénégal, nombre moyen sur 10 personnes



Cette analyse multicritères permet de positionner les régions du Sénégal en fonction de leur potentiel pour la mise en œuvre du projet :

Les régions de Saint-Louis, Tambacounda, Kaolack et Kaffrine (et dans une moindre mesure les régions de Diourbel, Fatick et Matam) offrent le meilleur potentiel pour la mise en œuvre du projet, du point de vue de l'appropriation et de la diffusion de la technologie Voûte Nubienne.

Ce résultat devra être croisé avec les potentialités offertes par la Gestion Durable des Terres afin de finaliser le choix des sites retenus pour le projet.

Les sites pourront être choisis en fonction du niveau de dégradation des sols et du couvert végétal, et donc en fonction de la disponibilité en fibres végétales comme matériau de construction, c'est à dire dans chacun des 3 types d'espaces suivants :

- **steppes et savanes arbusives**
- **zones de culture**
- **savane boisée**

2. Besoins en construction

En terme quantitatif, les besoins sont très importants sur tous les territoires que ce soit pour des bâtiments à usage d'habitation ou pour des usages de services. Le fort taux de croissance démographique du Sénégal (13,5 millions d'habitants en 2013 ; 26,6 millions d'habitants en 2040)⁵ implique des besoins en bâtiments soutenus pour les prochaines décennies alors que les moyens en terme d'investissement peinent déjà à répondre aux besoins d'infrastructures de services. Les besoins surpassent dans tous les cas la capacité actuelle de construction en Voûte Nubienne au Sénégal :

- En zone rural, le dernier recensement général de la population (2013) indique que 47 % des ménages résident dans des habitations en toiture de zinc, largement inconfortables et que 38 % des ménages résident dans des habitations en toiture de paille, peu durables.
- Le « Rapport national sur la situation de l'éducation 2013 » du ministère de l'éducation nationale indique que 11,5 % des 42 203 salles de classe (cours élémentaire) du Sénégal sont déclarées en mauvais état ce qui pose le problème de la réhabilitation des infrastructures scolaires. A ces besoins s'ajoutent ceux de la construction de nouvelles salles de classe pour remplacer les 4 815 abris provisoires existants. Ces tendances en terme de besoins sont valables globalement pour toutes les régions, même si certaines disparités régionales sont notables.
- Selon la « Carte sanitaire du Sénégal mise à jour en 2010 » du ministère de la santé et de la prévention, étaient recensés en 2010 sur le territoire national :
 - 1 240 postes de santé avec un besoin exprimé de 320 nouveaux postes
 - 89 centres de santé dont 20 postes de santé faisant office de centre de santé
- Dans le domaine agricole, les orientations stratégiques en faveur de la sécurité et de l'autosuffisance alimentaire implique nécessairement la construction d'infrastructures agricoles pour le stockage et la conservation de denrées alimentaires, pour la transformation agro-alimentaire. Ces besoins se concentrent dans les zones agricoles et d'agroforesterie.

Une priorisation des besoins en terme qualitatif et à l'échelle nationale est proposé dans le tableau ci-dessous. Ces priorités sont susceptibles de changements importants à l'échelle des localités. Les besoins des localités pourront être également trouvées dans les Plans Locaux de Développement.

5 RGPHAE 2013, ANSD ; United Nations, 2013

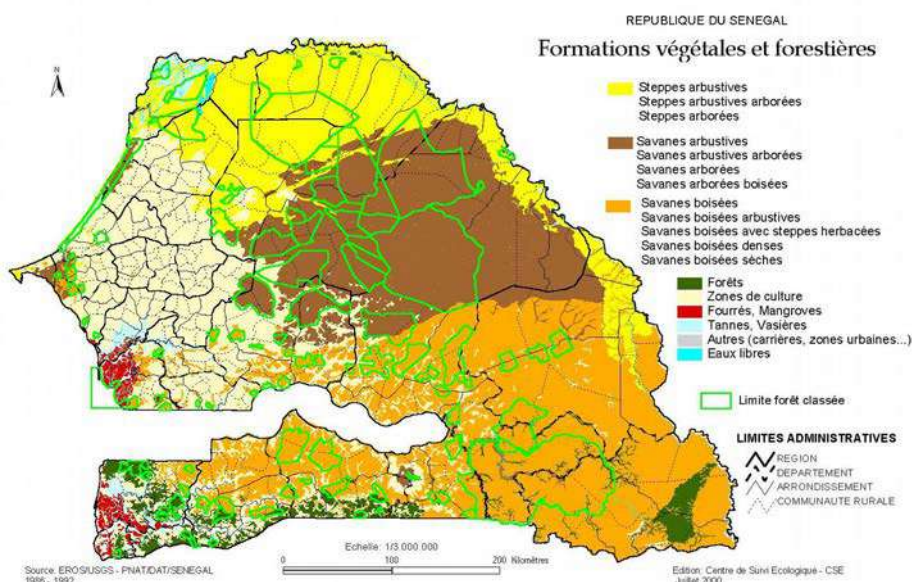
Besoins qualitatifs	Priorisation du besoin
Logements privés	Besoins très élevés
Bâtiments d'éducation Salles de classes, salles d'alphabétisation, salles de maîtres,...	Besoins élevés
Bâtiments de santé Dispensaires, maternité, case de santé,...	Besoins élevés
Bâtiments agricoles Silos de conservation de céréales, de produits maraîchers, de semences,...	Besoins assez élevés
Bâtiments de bureaux Bureaux, services,...	Besoins variables en fonction du lieu
Bâtiments culturels Salles polyvalentes, maisons des jeunes,...	
Lieux de culte Mosquées, salles de prière, églises,...	
Autres usages divers Ateliers, usines, commerces, hôtels, thialys, bâtiments de tourisme	

3. Définition de la situation de référence du marché de la construction

Afin de fournir la situation de référence du marché de la construction par région permettant le calcul des gains environnementaux pour le projet, 3 types de données ont été croisées :

- La répartition du parc bâti par système constructif pour les murs et pour la toiture (ANSD 2013)
(voir partie I / § 1.3.1)
- L'évolution du parc bâti par système constructif entre 2002 et 2013 (ANSD 2002, ANSD 2013)
(voir partie I / § 1.3.2)
- L'évaluation de la disponibilité et de la capacité à prélever les matériaux locaux végétaux dans l'environnement : la paille, les tiges, le bois :

Les causes de la déforestation au Sénégal sont multiples : le bois énergie (bûches, charbon) principalement pour la cuisson, les feux de brousse, la conversion en terres agricoles et urbaines, le surpâturage, le marché du bois d'œuvre, le bois et les fibres végétales utilisés pour la construction de bâtiments, de clôture... La déforestation impacte en retour la capacité des populations à disposer des matériaux locaux traditionnellement utilisés pour la construction. La carte ci-dessous fournit des informations concernant les formations végétales et forestières du Sénégal.



Source : CSE, centre de suivi écologique (2000)

Le tableau suivant estime la disponibilité des matériaux locaux de construction d'origine ligneuse en fonction du type de formation végétale :

Formation végétales	Matériaux de construction (bois et fibres végétales)
Steppes / Savanes arbustives	Ressources quasi-inexistantes donc prélèvements impossibles (*)
Zones de culture	Ressource faible donc prélèvements difficiles mais encore possibles (*)
Savanes boisées	<i>Ressource existante donc prélèvements possibles</i>
	<i>Ressource existante mais prélèvements interdits ou réglementés par des quotas (forêts classées). Fraudes constatées</i>

(*) Dans les zones de culture principalement, la paille est désormais utilisée pour la nourriture du bétail, faute de zones de pâture suffisantes. Dans les zones de savanes, la paille est récoltée et exportée également pour la nourriture du bétail (par exemple vers Dakar)

Source : consultant, 2015

Ces trois types de données aboutissent à une répartition des constructions neuves par typologie constructive pour chaque région (disponible en annexe) et d'une manière globale à l'échelle du Sénégal. Par souci de simplification, certaines techniques constructives ont été négligées, en particulier, les habitats nomades et semi-nomades (tentes), les constructions aux murs en bois, les constructions alternatives à base de banco (BTC,...)

TECHNIQUE CONSTRUCTIVE		REPARTITION DES BATIMENTS NEUFS		
MURS	TOITURE	PETITE HABITATION (< 20 m ²)	HABITATION MOYENNE (entre 20 et 50 m ²)	GRANDE HABITATION ET AUTRES USAGES
CIMENT	ZINC	73 %	40 %	-
CIMENT	BETON	0 %	45 %	50 %
CIMENT	BAC ACIER	-	-	50 %
CIMENT	PAILLE	14 %	8 %	-
BANCO	ZINC	9 %	5 %	-
PAILLE	PAILLE	5 %	3 %	-
BANCO	PAILLE	0 %	0 %	-
		100 %	100 %	100 %

A chaque technique constructive correspond des facteurs d'émissions qui ont été calculés et présentés dans la partie II (voir § 5.3) de ce présent rapport. Nous dressons ainsi la situation de référence moyenne pour le Sénégal :

FACTEURS D'EMISSIONS	PETITE HABITATION (< 20 m ²)	HABITATION MOYENNE (entre 20 et 50 m ²)	GRANDE HABITATION ET AUTRES USAGES
Émissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq / m ² sur 30 ans)	238	196	163
Émissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = ventilation	533	450	429
Émissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = climatisation	2 007	1 577	1 638

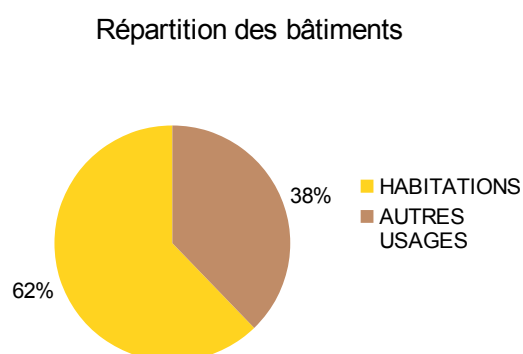
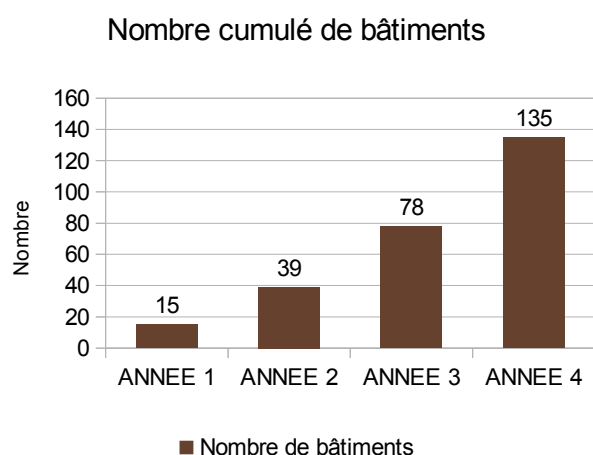
Ces facteurs d'émissions sont donnés à titre informatif afin d'avoir une représentation globale de la situation de référence. Dans les faits, il existe des variations régionales – voir locales – assez importantes du fait des habitudes constructives, des possibilités de prélèvement de matériaux dans l'environnement et des variations climatiques. Les impacts environnementaux pour le projet ont donc été calculés sur la base des déclinaisons régionales de cette situation de référence.

4. Résultats attendus en terme de constructions

En terme de nombre de bâtiments construits sur les 4 années du projet, le facteur limitant principal est la disponibilité en main d'œuvre qualifiée et non qualifiée, qui constitue le plus gros frein à la diffusion des Voûtes Nubiennes en général en Afrique de l'Ouest, et particulièrement au Sénégal. Les chiffres indiqués ici tiennent compte de ce paramètre, mais propose aussi d'inscrire le projet dans une dynamique de diffusion, d'appropriation et de répliquabilité (croissance du marché de 55 % sur les 4 années du projet). Les choix des sites, de l'échelle territoriale et des modalités de vulgarisation de la technique Voûte Nubienne permettront de fixer des objectifs de résultats plus précis. Ces prévisions sont également dépendantes de l'impulsion donnée au projet ainsi que des mécanismes de soutien (financiers, institutionnels) au marché Voûte Nubienne.

Pour résultats attendus, il est ainsi proposé la construction de :

- **135 chantiers pour près de 7.700 m² ;**
- **dont 84 habitations privées et 51 bâtiments de services ;**
- **avec une croissance moyenne de 55 % sur les 4 années du projet ;**
- **près de 3 400 bénéficiaires utilisateurs réguliers des bâtiments construits ;**
- **pour un montant du gros œuvre estimé à 308 millions de FCFA (0,51 M\$ US)**



Le tableau suivant détaille les résultats répartis sur les 4 années du projet :

INDICATEURS	TOTAL	HABITATIONS	AUTRES USAGES	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4
Nombre de bâtiments	135	84	51	15	24	39	57
Surface construite (m²)	7 695	3 360	4 335	870	1 365	2 235	3 225
Nombre de Voûtes Nubiennes	276	123	153	33	48	81	114
Bénéficiaires utilisateurs ⁽¹⁾	3 375	336	3 039	393	597	990	1 395
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions FCFA) ⁽²⁾	308	134	173	35	55	89	129
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions \$ US) ⁽³⁾	0,506	0,221	0,285	0,057	0,090	0,147	0,212
Taux de Croissance Annuel Moyen du marché VN (%)	55%	-	-	-	57%	64%	44%

(1) Bénéficiaires utilisateurs utilisant régulièrement les bâtiments construits pour des usages d'habitation ou des usages autres, calculés d'après les ratios suivants, arrondis à l'unité supérieure :

- Petite habitation (< 20 m²) : 0,21 personne / m² utile
- Habitation moyenne (entre 20 et 50 m²) : 0,10 personne / m² utile
- Grande habitation (> 50 m²) : 0,04 personne / m² utile
- Autres usages : 0,70 personne / m² utile

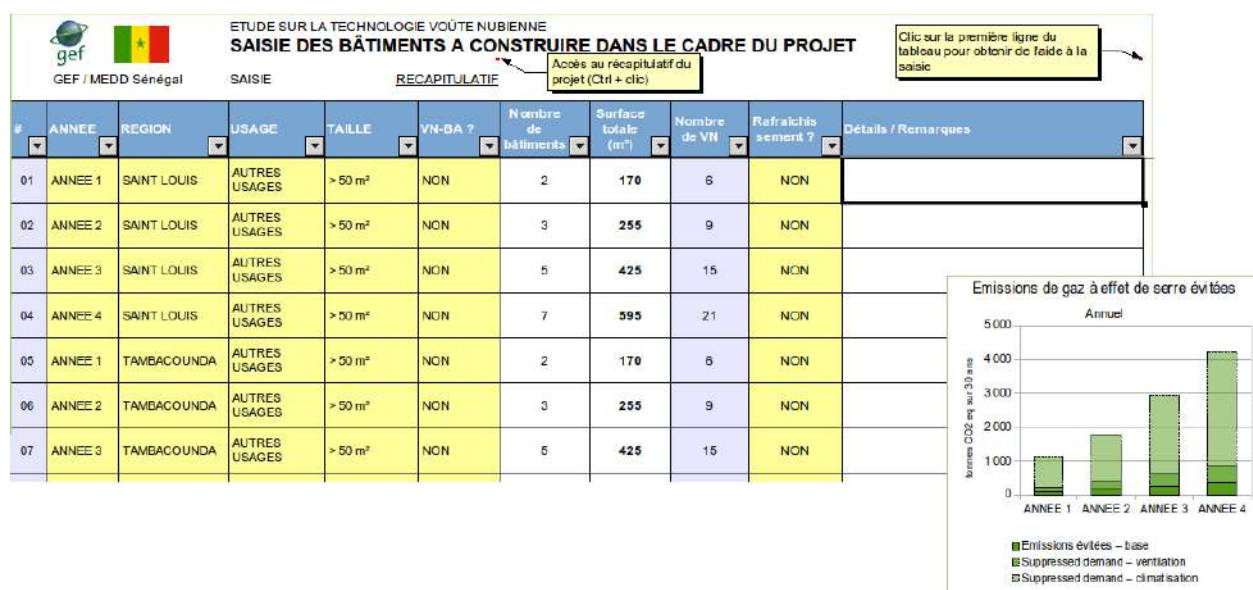
(2) Coût estimatif du gros œuvre Voûte Nubienne (hors enduits de finition, revêtements de sol, peintures, menuiseries, électricité, ventilation,...) calculé sur la base d'un ratio de 40 000 FCFA / m² utile

(3) 1 \$ = 608,6 FCFA, au 09/04/2015



OUTIL DE MODELISATION DU PROJET

Afin de permettre d'affiner les résultats attendus lors de la phase de concertation (réalisation du cadre logique et rédaction du document projet), il est proposé avec ce rapport un outil de modélisation permettant d'obtenir les résultats, effets et impacts en fonction des paramètres d'entrées (régions, années, nombre de bâtiments, surface en m²,...).



5. Évaluation environnementale du projet

5.1. Introduction

A la date de rédaction de ce rapport, les sites retenus pour l'étude n'étaient pas disponibles. Afin de disposer de données chiffrées concernant les gains environnementaux du projet, il a été retenu ici trois régions qui sont apparus parmi les plus intéressantes sur la base de l'analyse multicritère réalisée (voir Partie III / § 1.) :

- Région de Saint-Louis
- Région de Kaffrine
- Région de Tambacounda

Le nombre de bâtiments à construire a été réparti équitablement sur ces 3 régions (5 en année 1, 8 en année 2, 13 en année 3, 19 en année 4). La situation de référence calculée pour le projet et par conséquent les impacts environnementaux qui en découlent, dépendent des régions retenues.

Les gains environnementaux permis par la technologie Voûte Nubienne, comparativement à la situation de référence, ont été calculés pour le projet sur les deux catégories d'indicateurs d'impacts suivants :

- **Émissions de gaz à effet de serre sur la durée de vie des bâtiments**
Unité : tonnes CO₂ eq sur 30 ans
- **Consommation annuelle d'énergie finale électrique pour les besoins de rafraîchissement**
Unité : MWh ef / m².an

Afin de tenir compte de l'augmentation future prévisible des émissions de gaz à effet de serre due au développement économique du pays, à l'augmentation du taux d'électrification rurale, à l'utilisation des appareils de rafraîchissement et à l'augmentation des niveaux d'exigence de confort des populations, trois scénarios ont été mis en place : (voir aussi partie II / § 6.3.2 et § 7.)

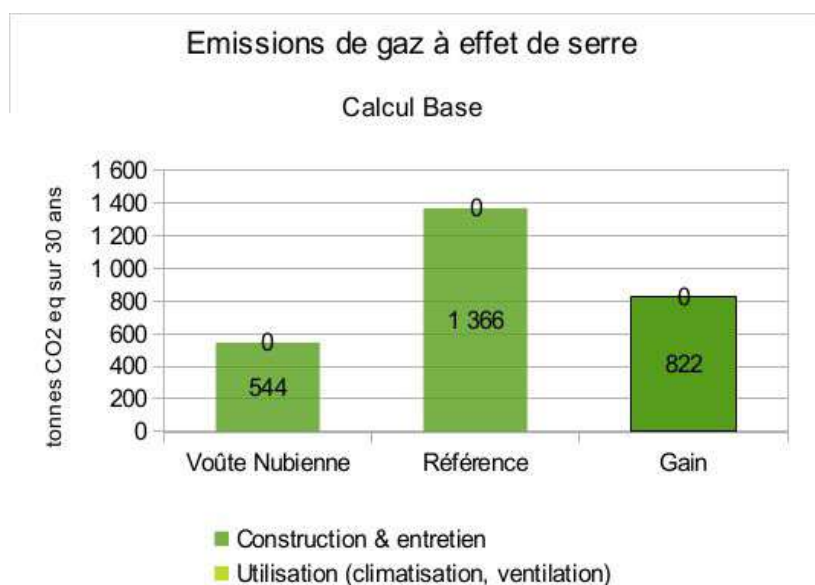
SCENARIOS	DUREE DE VIE DES OUVRAGES	PHASES PRISES EN COMPTE
SCENARIO DE BASE (A)	30 ans	Phases fabrication des matériaux, transport des matériaux jusqu'au chantier, mise en œuvre, entretien du bâti
SCENARIO SUPPRESSED DEMAND – Ventilation (B)	30 ans	Idem scénario A + ventilation des bâtiments lorsque la température est supérieure ou égale à 32°C
SCENARIO SUPPRESSED DEMAND – Climatisation (C)	30 ans	Idem scénario B + climatisation des bâtiments lorsque la température est supérieure ou égale à 32°C

5.2. Synthèse des résultats

5.2.1. Émissions de gaz à effet de serre

Pour le scénario « A - Base », le calcul des émissions de gaz à effet de serre aboutit à un résultat de :

- 1 366 tonnes CO₂ eq émises sur 30 ans pour la situation de référence
- 544 tonnes CO₂ eq émises sur 30 ans en utilisant la technologie Voûte Nubienne
- **soit un gain d'émission correspondant à 822 tonnes CO₂ eq sur 30 ans**

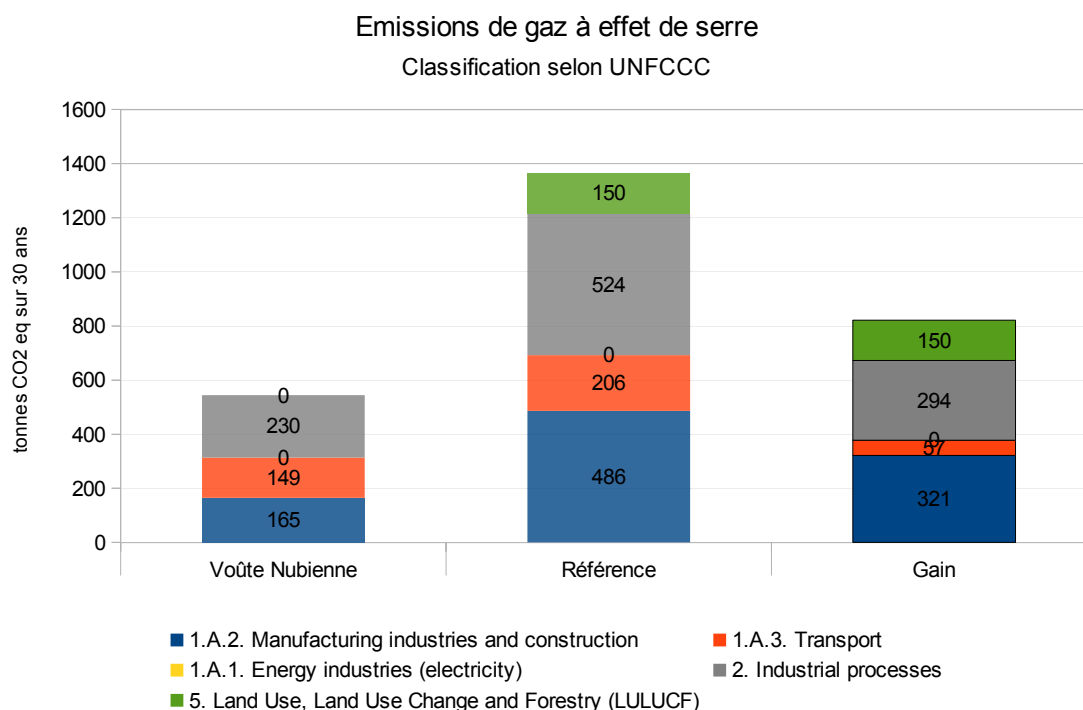


INDICATEURS	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN	
			(valeur)	(%)
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base (tonnes CO ₂ eq)	544	1 366	822	-60%
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppress Demand Système de référence = ventilation	1 329	3 417	2 088	-61%
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppress Demand Système de référence = climatisation	3 091	13 191	10 101	-77%

En tenant compte de la phase utilisation du bâtiment pour des usages de rafraîchissement, c'est à dire en considérant que tous les bâtiments construits sont, soient ventilés, soient climatisés pendant les périodes d'inconfort, on obtient des gains d'émissions :

- **Scénario « B - Ventilation » : 1 329 tonnes CO2 eq (+ 144 % par rapport au scénario « A - Base »)**
- **Scénario « C - Climatisation » : 3 091 tonnes CO2 eq (+ 468 % par rapport au scénario « A - Base »)**

La ventilation des impacts attendus selon la classification UNFCCC est donnée dans le tableau suivant **pour le scénario A (hors ventilation / climatisation) :**



Nous visualisons que les gains d'émissions permis par la technologie Voûte Nubienne se répartissent comme suit :

- **39 % « Manufacturing industries and construction »**, du à une réduction de la consommation de matériaux de construction à fort impact environnementaux (ciment, acier principalement)
- **36 % « Industrial processes »**, ce qui correspond spécifiquement à une réduction des émissions liées au mode de production du ciment (décarbonation)
- **18 % « LULUCF »**, du fait d'une réduction des prélèvements de matière ligneuse dans l'environnement (bois, paille,...) ;
- **7 % « Transport »**, ce qui représente un gain relativement faible, les matériaux étant beaucoup plus locaux dans le cas de la Voûte Nubienne mais aussi beaucoup plus important en masse.⁶

Cette ventilation est spécifique aux situations de référence des régions sélectionnées. Le tableau suivant indique la ventilation de ces émissions pour chacune de ces régions :

⁶ Modélisation environnementale réalisée avec un transport de la terre par camion du lieu d'extraction jusqu'au chantier, à une distance moyenne de 10 km.

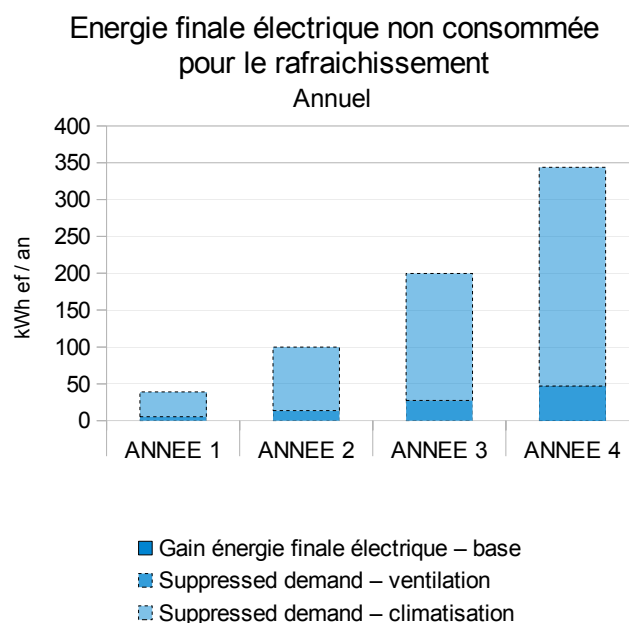
Secteurs	Kaffrine	Saint-Louis (Podor)	Tambacounda	Projet
Manufacturing industries and construction	40 %	42 %	36 %	39 %
Industrial processes	29 %	43 %	35 %	36 %
LULUCF	27 %	6 %	22 %	18 %
Transport	4 %	9 %	7 %	7 %
TOTAL	100 %	100 %	100 %	100 %

On constate un gain d'émission faible (6%) sur le secteur LULUCF pour la région de Saint-Louis, car celle-ci ne disposant peu ou plus de ressources ligneuses, les constructions neuves ne peuvent utiliser cette ressource. Au contraire, cette part est importante dans les régions de Kaffrine (27%) et Tambacounda (22%) car la ressource y est, certes rare, mais encore disponible (même illégalement) et que la confection de toiture en paille sur charpente en bois est une technique traditionnelle encore répandue.

5.2.2. Énergie finale électrique non consommée pour les besoins de rafraîchissement

Le calcul de l'énergie finale électrique non consommée pour les besoins de rafraîchissement aboutit à :

- 0 MWh ef / an économisés dans le cas où aucun bâtiment n'est ventilé / climatisé (scénario A)
- 46,9 MWh ef / an économisés dans le cas où tous les bâtiments sont ventilés (scénario B)
- 343,6 MWh ef / an économisés dans le cas où tous les bâtiments sont climatisés (scénario C)



INDICATEURS	TOTAL	HABITATIONS	AUTRES USAGES	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4
Énergie finale électrique non consommée (MWh ef / an)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	46,9	19,1	27,8	5,3	13,6	27,2	46,9
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	343,6	137,4	206,2	39,0	99,9	199,8	343,6

5.2.3. Suppressed Demand

Les scénarios B et C pointent ainsi la pertinence de la technologie Voûte Nubienne, et notamment de la bonne performance thermique de son bâti qui permet un niveau de confort décent (inférieur à 32°C) atteignable en générant 60 % moins d'émissions de CO₂eq pour la ventilation et 78 % moins d'émissions de CO₂eq pour la climatisation. Cependant, du fait du niveau de vie des populations rurales Sénégalaises, et du fait du faible taux d'électrification rurale, les bâtiments ruraux sont dans leur très large majorité non climatisés, et encore pour une large majorité non ventilés. En l'état actuel du développement économique du Sénégal, l'impact environnemental du projet correspond donc davantage au scénario A qu'aux scénarios B et C.

Le Sénégal, comme nombre de pays émergents, aspire à un développement économique permettant d'améliorer substantiellement les conditions de vie de sa population, et en outre en leur procurant un habitat adapté, confortable et économique. Si les gains en terme d'efficacité énergétique ne sont constatables que partiellement dans la situation actuelle, l'augmentation du niveau de vie impliquera à l'avenir un accès plus importants des populations à des appareils de ventilation et de climatisation. L'Etat des lieux de cette étude (voir Partie I / § 3.) souligne notamment une augmentation du taux d'électrification et de la consommation d'électricité sur la période 2000-2009... et cette tendance se prolonge selon les projections pour la période 2010-2020.

La technologie Voûte Nubienne est donc particulièrement adaptée pour anticiper la demande future en électricité, et donc pour maîtriser l'augmentation prévisible des gaz à émissions de serre dû à l'augmentation du niveau de développement du Sénégal. Cette anticipation de la demande future correspond au concept de « Suppressed Demand » décrite dans le document « Annex 2, Guidelines on the consideration of suppressed demand in CDM Methodologies » (UNFCCC, 2012)⁷. Ce document fournit une méthodologie permettant de valoriser cette « Suppressed Demand » dans le Mécanisme de Développement Propre « MDP » de l'UNFCCC (Protocole de soutiens des réductions dans les pays non tenus par des objectifs d'émissions). La faisabilité de cette valorisation devra être étudié dans le cadre de ce projet.

→ Les résultats détaillés des impacts environnementaux incluant une ventilation des résultats par phase et par type de matière sont donnés en annexe.

⁷ https://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/meth/meth_guid41.pdf (consulté le 15/02/2015)

6. Projections à 25 ans

Le tableau suivant analyse les résultats et impacts qu'il est possible d'obtenir à 25 ans selon trois scénarii de croissance du marché de la technologie Voûte Nubienne (taux de croissance annuelle moyen des superficies bâties annuellement) :

- croissance annuelle de 20 %
- croissance annuelle de 40 %
- croissance annuelle de 60 %

INDICATEURS	RESULTATS ATTENDUS A 4 ANS	PROJECTIONS A 25 ANS (2040)		
		Croissance annuelle 20 %	Croissance annuelle 40 %	Croissance annuelle 60 %
Nombre de bâtiments	135	15 527	234 540	2 940 091
Surface construite (m ²)	7 695	878 544	13 270 014	167 041 983
Nombre de Voûtes Nubiennes	276	31 060	469 080	5 904 740
Bénéficiaires utilisateurs ⁽¹⁾	3 375	134 002	1 990 502	25 056 297
Population totale du Sénégal ⁽²⁾	16,1 Millions	26,6 Millions		
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions FCFA)	308	35 142	530 801	6 681 679
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions \$ US) (*)	0,506	58	872	10 979
Émissions évitées (tonnes CO2 eq sur 30 ans)	822	94 135	1 421 901	17 898 788
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	2 088	238 502	3 602 479	45 347 748
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	10 101	1 151 924	17 399 131	219 019 017
Énergie finale électrique non consommée (MWh ef /an)	0,0	0	0	0
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	46,9	5 349	80 799	1 017 098
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	343,6	39 229	592 533	7 458 768

(1) World Population Prospects. Nations Unies. 2013 (Medium Variant) ; (2) ratio utilisé : 0,15 bénéficiaires moyen / m² de surface utile

Ces projections indiquent d'ici 2040, pour le scénario médiant à 40 % de croissance :

- **234 450 bâtiments construits**
- **13,3 millions de m² de surface utile**
- **2,0 millions de bénéficiaires**
- **un gain en terme d'émissions de gaz à effet de serre sur le scénario A de base (hors prise en compte des consommations d'électricité pour le rafraîchissement) de 1 420 Gg de CO₂ eq sur 30 ans.**
- **Une réduction des consommations d'énergie finale électrique pour le rafraîchissement en 2040 de :**
 - 81 GWh / an dans le scénario B – Suppressed Demand – Ventilation**
 - 592 GWh / an dans le scénario C – Suppressed Demand - Climatisation**

Les économies possibles à 25 ans en terme de demande en électricité dans un scénario où la technologie Voûte Nubienne serait massivement diffusée sur le territoire sont importantes (81 GWh / an dans le scénario B, 592 GWh dans le scénario C) et sont à mettre en relation avec les conditions de production d'électricité actuelles du Sénégal : le pays importe massivement du combustible depuis l'étranger pour ses centrales thermiques et les délestages sont encore courant. A titre de comparaison, la SENELEC indique dans son rapport annuel une vente d'énergie finale de 2 000 GWh en 2010.

Nous visualisons ici que pour donner accès à la technologie Voûte Nubienne à une part substantielle de la population Sénégalaise d'ici à 25 ans, un taux de croissance de 20 % du marché n'est pas suffisant. En effet le taux projeté de croissance démographique au Sénégal amènera le nombre d'habitants à 26,6 millions en 2040. Le scénario à 20 % ne permet de toucher que 134 000 bénéficiaires d'ici 2040, contre 2,0 millions pour le scénario à 40 %, et 25 millions pour le scénario à 60 % de croissance. Les méthodes de vulgarisation et d'évaluation de l'Association Voûte Nubienne recherchent l'ambition suivante : « *La mission d'AVN est de permettre au plus grand nombre d'entre eux d'accéder de manière pérenne et le plus vite possible à un habitat décent.* ». L'association Voûte Nubienne indique dans ces résultats un taux de croissance annuel moyen du marché de 32 % en Afrique de l'Ouest depuis 2000 et de 36 % au Sénégal depuis 2007. Au regard de ces projections, il semble légitime et essentiel d'insuffler au présent projet une dynamique de diffusion, d'appropriation et de répliquabilité, tel que le fait d'ores et déjà l'Association Voûte Nubienne.

PARTIE IV : MODALITES DE VULGARISATION DE LA TECHNOLOGIE VN

1. Analyse des politiques réglementaires et institutionnels

1.1. Environnement

L'analyse des cadres réglementaires et institutionnels nationaux, sous-régionaux et internationaux fait ressortir une prise en compte de plus en plus importante de l'atténuation et de l'adaptation du/au changement climatique. En particulier dans le bâtiment, par la diffusion de mesures d'efficacité énergétique et le recours à des matériaux locaux à faible impact environnemental :

- **La deuxième communication nationale du Sénégal (2010) auprès de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)⁸** fait l'état suivant :

« Le problème de gestion de l'environnement lié à la construction des logements est la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception des bâtiments. Cet aspect constitue un important facteur d'économie d'énergie. »

et propose les éléments stratégiques d'adaptation suivants :

« L'objectif visé à travers la stratégie nationale d'adaptation est de prévenir et réduire les impacts des changements climatiques sur la croissance et le développement économique et social du Sénégal. » ;

« Développement de schémas architecturaux cohérents » ; « Mettre en place des programmes d'habitat social et adaptés » ; « Promouvoir l'utilisation de types de matériaux appropriés aux effets du Changement climatique »

- **Le Plan Sénégal Emergent (2014)** fait le constat que *« L'adaptation aux changements climatiques constitue également un nouveau défi majeur avec, notamment, le développement des phénomènes tels que les inondations, l'érosion côtière et la salinisation des terres. Des solutions durables doivent être trouvées pour permettre aux populations de développer une culture de prévention et d'adaptation aux changements climatiques. »*

La section 3.1.3 de l'axe 1 est consacré à « habitat social et écosystème de construction » avec pour ambition le lancement d'une « *dynamique pérenne de construction de logements sociaux répondant à la demande (entre 10.000 à 15.000/an) et de structurer une filière de production de matériaux de construction (...) améliorer la qualité en introduisant les matériaux locaux* ».

La section 3.2.6 de l'axe 2 est consacré à « l'habitat et cadre de vie » et fait la relation avec l'impact sur l'environnement : *« L'habitat et le cadre de vie sont largement influencés par la dégradation des ressources naturelles et de l'environnement. Dans les villes comme dans les campagnes, on assiste à un développement de l'habitat spontané et précaire. »*.

Politique environnementale et Développement Durable sont décrits spécifiquement dans la section 3.2.8., notamment : *« Dans le secteur de l'environnement, le Sénégal s'est engagé à intégrer les principes de développement durable dans les politiques nationales et à inverser la tendance notée par rapport à la déperdition de ressources environnementales. Il poursuit notamment l'objectif de réduction de la perte de*

8 <http://unfccc.int/resource/docs/natc/sennnc2.pdf>

biodiversité. ».

La section 3.2.7. cite le phénomène d'érosions cotières accentué par les prélèvements de sable de construction et par le changement climatique : *« De par sa position géographique avancée sur l'Océan atlantique, le Sénégal est exposé aux effets néfastes du changement climatique notamment à l'érosion côtière qui menace l'habitat et les installations le long des côtes. Ces changements augmentent la vulnérabilité des populations et de certaines activités économiques ».*

- **L'article R.36 du décret portant n°2010-99 du 27 janvier 2010 portant code de la construction** stipule que les bâtiments et parties de bâtiments auxquels s'appliquent les dispositions de la présente section doivent être construits et aménagés de telle sorte que les consommations d'énergie pour la climatisation et l'éclairage puissent être aussi réduites que possible.
- Le projet PNEEB prépare la réalisation et les modalités de mise en application de la **futur réglementation thermique** qui s'appliquera dans un premier temps qu'à un nombre limité de bâtiments neufs (grandes opérations).
- Au niveau de la sous région, **le centre ECREEE⁹ de la CEDEAO** impulse la dynamique sur l'efficacité énergétique.
- En 2014, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) fait le constat suivant dans son cinquième rapport d'évaluation :

« En 2010 le secteur du bâtiment est responsable de 32 % de la consommation d'énergie finale et de 19 % des émissions de gaz à effet de serre relatives à la consommation d'énergie. Cette consommation d'énergie et les émissions associées devraient doubler et même potentiellement tripler d'ici le milieu du siècle en raison de plusieurs tendances clés. Une tendance très importante est l'accès croissant de millions de personnes dans les pays en développement à un habitat adapté, à l'électricité et à des équipements de cuisson améliorés »¹⁰

Le rapport précise spécifiquement la situation des pays les moins avancés :

« Ce groupe de pays est toujours à la périphérie des processus modernes de développement et a des besoins particuliers en terme d'accès à l'habitat, à des vecteurs énergétiques modernes et à des appareils de cuisson propres et efficaces. (...) Afin d'éviter de rester bloqué dans des options à forte intensité de carbone pendant plusieurs décennies, le passage à l'électricité et à des combustibles modernes doit être accompagné par des solutions d'économie d'énergie (technologiques et architecturales), ainsi que par l'adoption de sources d'énergie renouvelables, une gestion adéquate et des modes de vie durables. Les techniques et connaissances modernes peuvent être utilisées pour améliorer la conception vernaculaire. Les principes de la conception de bâtiments basse énergie permettent d'améliorer les conditions de confort la majeure partie du temps, réduisant ainsi la nécessité d'installer des équipements de refroidissement à forte intensité énergétique tels que les climatiseurs. Ces principes sont intégrés aux conceptions des

9 <http://www.ecreee.org/fr>

10 WG III Assessment Report 5, Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, chapter 9 Buildings, page 675

habitats vernaculaires à travers le monde et ont évolué au fil des siècles en l'absence de systèmes d'énergie active »¹¹

1.2. **Bâtiment**

L'analyse du cadre réglementaire et législatif « Bâtiment » en rapport avec la technologie Voûte Nubienne indique un cadre peu contraignant pour les constructions privées mais davantage contraignant pour les bâtiments communautaires recevant du public. Des efforts de normalisation sont à prévoir pour permettre une diffusion adéquate des bâtiments publics en Voûte Nubienne :

- Obtention d'une « Autorisation de construire » délivré par les services de l'urbanisme de la mairie du lieu de construction. Les bâtiments Voûte Nubienne construits pendant le projet sortiront de ce champ d'application car limités à deux niveaux maximum (RdC / R+1)
- Respects des règles de construction suivantes : code de la construction (2009), code de l'urbanisme (2008), décret d'application du code de la construction (2010)
- Respect du code des marchés publics dans le cas des bâtiments publics, communautaires, institutionnels : procédure spécifique simplifiée de « *Demande de Renseignement de Prix* » dans le cas de marchés inférieurs à 25 millions de FCFA, ce qui sera le cas dans le cadre de ce projet
- Les contrôleurs techniques ont pour objectifs de vérifier la conformité aux réglementations en vigueur des travaux / ouvrages réalisés, afin d'en permettre les assurances.
- Pour les bâtiments institutionnels, la nécessité d'un bureau de contrôle est dictée par l'article R53 du code de la construction, soit en particulier aux établissements recevant du public, au sens de l'article R.2. L'article R-93 précise par ailleurs que le classement le plus « faible » des bâtiments recevant du public est la catégorie 4, pour les établissements recevant entre 51 à 300 personnes. Aucune réglementation ne régissant la construction terre ni au Sénégal, ni en France, il y a un risque de « blocage » pour la construction d'Etablissements Recevant du Public en Voûte Nubienne, s'il accueillent plus de 51 personnes.
- La normalisation de la technique de construction Voûte Nubienne semble donc essentiel pour surmonter ce blocage. Le cas échéant, elle pourra s'inspirer des normes existantes sur la fabrication de briques en termes comprimées (14 normes NS) et s'effectuera sur les phases : extraction des terres , fabrication des briques , mise en œuvre, entretien. Les caractérisations physiques et techniques des matériaux mis en œuvre est également à fournir.

11 WG III Assessment Report 5, *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, chapter 9 Buildings*, page 679

2. Freins identifiés et défis à relever

Les principaux freins identifiés pour le volet « technologie Voûte Nubienne » du projet sont les suivants. Ils constituent autant de défis qui, s'ils sont atteints, positionneront la technologie Voûte Nubienne comme solution d'accès à un habitat adapté au Sénégal. Dans la mise en œuvre du projet, une stratégie d'actions devra être formulée en réponse à chacun d'eux :

- **Trop faible appropriation de la technologie par les populations rurales**

Depuis 2007, les populations rurales sénégalaises, notamment celles vivant de l'agriculture de l'élevage accèdent finalement trop peu à la technologie Voûte Nubienne alors que ce sont les populations les plus nombreuses et le plus dans le besoin d'un habitat décent : 44 % des clients de la Voûte Nubienne au Sénégal appartiennent à cette typologie contre 70 % pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Parmi les explications de cette trop faible appropriation de la technologie Voûte Nubienne :

- le coût d'investissement initial de la technologie Voûte Nubienne plus important que pour les autres techniques constructives pour la construction d'habitations privées (petites et moyennes) ;
- le faible recours à l'autoconstruction (fabrication de matériaux, fourniture de main d'œuvre gratuite) pour financer en nature la construction (jusqu'à 75 % des coûts de construction du gros-œuvre telle que pratiquée au Burkina Faso et au Mali)

- **Manque de main d'œuvre locale maîtrisant la technologie Voûte Nubienne**

Les chantiers de construction en Voûte Nubienne au Sénégal sont assurés par des apprentis, maçons et artisans burkinabè, maliens et sénégalais avec pour objectif le transfert de compétences vers la main d'œuvre sénégalaise. Actuellement, 25 apprentis sénégalais sont en formation, mais seulement 2 maçons sénégalais maîtrisent la technique de construction Voûte Nubienne. 3 entreprises BTP ont été impliquées dans la réalisation de bâtiments communautaires / publics. Ces résultats en terme de formation et de main d'œuvre locale qualifiée sont très en deçà des besoins de construction identifiés. L'Association Voûte Nubienne et l'Association Le Partenariat affirment rencontrer des difficultés pour susciter de l'intérêt pour la formation et le métier de maçon Voûte Nubienne au sein des populations locales, mais aussi pour trouver des manœuvres sénégalais non qualifiés (particulièrement dans les régions de Saint-Louis et Matam). L'offre est très largement inférieure à la demande, et l'Association Voûte Nubienne affirme par exemple tenir une liste de clients potentiels qui s'allonge au fil du temps. Les projections à 25 ans indique que pour donner accès à un nombre significatif de personnes à un habitat Voûte Nubienne d'ici à 2040, des taux de croissance annuels du marché de 40 à 60 % sont à rechercher. Ces taux ne seront atteignables que si un équilibre de l'offre et de la demande est possible.

- **Transfert de compétences et appropriation de la technique Voûte Nubienne par l'État, les collectivités locales et leurs services techniques**

L'implication de l'Etat sénégalais et ces collectivités locales joue un rôle primordial dans la mise en place d'un marché de la construction de bâtiments publics et communautaires en Voûte Nubienne. Depuis 2011,

L'Agence Régionale de Développement de Saint-Louis est impliquée par l'Association Le Partenariat dans la réalisation de chantiers et le suivi de bâtiments communautaires / publics construits en Voûte Nubienne : maternité, salle de classe, salle d'alphabétisation, bureaux administratifs, mosquée... ont été construits dans les départements de Dagana et de Podor. Des référentiels techniques sont développés (CPTP, modèles de contrat, demandes de renseignement et de prix, suivi de l'entretien et de l'usage,...) dans le but de transférer ces compétences aux bras techniques des collectivités mais des efforts supplémentaires importants en terme de normalisation de la technique Voûte Nubienne sont indispensables pour développer de manière significative le marché des bâtiments communautaires et publics : le passage du secteur informel de la construction (maîtrise d'ouvrage privés, propriétaires, et populations) vers celui des institutionnels doit nécessairement s'accompagner de l'établissement de référentiels, auxquels les maîtrises d'ouvrages doivent pouvoir se raccrocher. En effet, les maîtrises d'ouvrages institutionnels doivent disposer, pour réaliser leurs projets, d'un cadre législatif et normatif défini.

3. Analyse des acteurs et projets

3.1. Analyse des acteurs

Le tableau résume de manière globale les implications possibles des différents types d'acteurs dans le projet :

ACTEURS	IMPLICATIONS POSSIBLES DANS LE PROJET
Ministère de l'Environnement et du Développement Durable DEEC, DREEC DEFCCS, DFVP, DPN, DPVE, CILSS, COMNACC, CSE	- Coordination, pilotage, suivi, évaluation - Points focaux nationaux et régionaux - Vérification et respect de la gestion durable des ressources, de l'efficacité énergétique dans les bâtiments - Communications locales Changement Climatique
Association Voûte Nubienne (AVN)	- Mise en œuvre globale du projet : sensibilisation, communication, accompagnement, suivi-évaluation, coordination, pilotage, transfert de compétence - Expertise technique et programme voûte nubienne (depuis 15 ans) - Expertise dans l'appui au développement du marché rural des bâtiments privés
Association Le Partenariat	- Mise en œuvre du projet : sensibilisation, communication, accompagnement, suivi-évaluation, coordination, pilotage, transfert de compétence - Expertise technique, documentation technique - Expertise dans l'appui au développement du marché des bâtiments publics, transfert de compétences vers les collectivités et leurs bras techniques (depuis 3 ans)
Organisations de la société civile, groupements locaux, OCB	- Mise en œuvre du projet, appui au développement du marché rural des bâtiments privés : Sensibilisation, communication, accompagnement, suivi-évaluation, coordination, pilotage, transfert de compétence
Organisation pour la Promotion du Développement Autonome de Dialacoto (OPDAD)	- Mise en œuvre du projet, appui au développement du marché rural des bâtiments privés dans la région de Tambacounda
Association Développement Gembloux (ADG)	- Implication potentielle sur problématiques agricoles / construction de bâtiments agricoles
Collectivités locales et élus locaux (Départements, communes, association des Élus Locaux...)	- Maîtrise d'Ouvrage des bâtiments publics / communautaires. - Communication, sensibilisation
Bras techniques des collectivités ARD, CADL, services techniques, GIC,...	- Mise en œuvre du projet : volet bâtiments publics - Organisation et suivi de chantiers, suivi des bâtiments - Sensibilisation des élus locaux, Communication - Appropriation des référentiels Voûte Nubienne
Ministères et services déconcentrés de l'Etat	Implication selon thématique Urbanisme, construction, formation, emploi, éducation, développement local,... Clients Potentiels pour la réalisation de bâtiments administratifs
Clients privés	Clients des entreprises, artisans et maçons, bénéficiaires
Entreprises BTP, artisans,	Bâtisseurs (OFFRE)

maçons	Intégration / appropriation de la technique Voûte Nubienne, formation
Organismes de formation CFBTP, centres de formation régionaux,...	Ponts à établir entre formation formelle et informelle Communication auprès des apprentis potentiels
Organismes techniques, centres de recherche et universités Ordre des architectes, association des Ingénieurs du bâtiment, Association Sénégalaise de Normalisation, École Polytechnique,...	Recherche & tests techniques, référentiels techniques permettant la codification et la reconnaissance officielle de la technique Voûte Nubienne
Banques & instituts de micro- finances,...	Réflexions puis conception de produits financiers permettant l'accès au bâti
Agences et projets en lien avec l'Habitat et l'efficacité énergétique	- Le cas échéant, recherche de synergies d'actions : Projet PNEEB, Programme PNB, Programme PERACOD, Agence ANEV, Agence AEME...

3.2. Analyse des projets

3.2.1. *Agence Nationale des Ecovillages*

Le Gouvernement du Sénégal a initié le « programme Ecovillages » avec la création de l'Agence Nationale des Ecovillages (ANEV). Ce programme répond aux soucis de l'Etat de faire face aux effets néfastes des changements climatiques et aux actions anthropiques. Les Ecovillages constituent des « pôles de développement » intégrés fonctionnant autour des 4 axes suivants : gouvernance locale, sécurité Alimentaire, maîtrise des énergies renouvelables, gestion des ressources naturelles.

Actuellement, le projet des Ecovillages intervient sur les dix sites suivants :

- Lompoul de la zone écogéographique (ZEG) des Niayes,
- Ndick et Thiasky de la ZEG du fleuve Sénégal,
- Kack et Toubel Bali de la ZEG du Ferlo,
- Dar Salam et Dindéfelo de la ZEG du Sénégal Oriental,
- Mansarinko du delta du Saloum
- Mbackombel de la ZEG du bassin arachidier

Parmi ceux-ci, certains sont situés en dehors des zones à fort potentiel pour le projet (voir Partie III / §1.). L'échelle d'intervention permettant une diffusion optimale (appropriation et répliquabilité) de la technologie Voûte Nubienne au Sénégal est visiblement l'échelle départementale, voir régionale. Si les écovillages ne peuvent constituer à eux seuls la base de la mise en œuvre du volet « habitat vert » du projet, les sites retenus pour le projet pourront inclure des écovillages dans leurs périmètres.

3.2.2. Projet TYPHA

Typha australis est une plante envahissante de la famille des roseaux, qui colonise les zones d'inondation des fleuves Sénégal et Niger avec des conséquences graves sur les activités humaines et l'écosystème (pêche, accès à l'eau, santé, irrigation...). La coupe et le contrôle du développement de cette plante coûte extrêmement de temps et d'argent. Deux principales filières de valorisation économique du typha existent : la valorisation en combustible domestique et la valorisation en matériaux de construction.

Si à ce jour aucun modèle économique de filière n'a pu voir le jour, ni être testé au Sénégal, les technologies nécessaires à la production de matériaux de construction à base de typha sont similaires à de nombreuses technologies utilisées et validées en Europe. Les présentations suivantes sont envisagées :

- panneaux légers à base de typha
- briques allégées à base de typha
- formulation d'enduits à base de typha
- fibres de typha en vrac

Les pistes d'utilisation de ces matériaux à base de typha sont séduisantes, mais l'adéquation avec la technologie Voûte Nubienne et les gains potentiels sont loin d'être évidents et parfois impossibles. A ceci s'ajoute l'impact du coût des matériaux à base de typha sur le budget total d'un bâtiment. Aucune information sur les coûts de production et de vente de ces produits n'est pour l'instant disponible, mais le coût de la technologie voûte nubienne a cependant déjà été identifié comme un facteur limitant important de l'accession des populations rurales à ce type d'habitat.

Propriétés mécaniques (réduction de la masse de matériau à mettre en œuvre) : La technologie de la Voûte Nubienne a été codifiée par l'Association Voûte Nubienne afin de faciliter sa vulgarisation et d'assurer sa tenue structurelle quelques soient les situations (par exemple : murs latéraux en briques de terres pleines de minimum 60 cm d'épaisseur, entraxe des voûtes de 3,25 m maximum,...). L'utilisation de briques allégées pour toutes les parois structurelles des bâtiments en voûte nubienne est donc à exclure, car elle porterait atteinte à la tenue structurelle des ouvrages.

Amélioration du confort acoustique : L'utilisation de panneaux isolants à base de typha pour construire des cloisons phoniques entre logements est un débouché envisagé pour les produits à base de typha. Dans le cas de la Voûte Nubienne en milieu rural, l'habitat reste très majoritairement individuel et les murs de forte épaisseur procurent déjà un niveau de confort acoustique satisfaisant pour les occupants.

Formulation d'enduit : L'adjonction dans les enduits terres de fibres végétales ou d'autres substances issues de l'environnement local (eau de karité, bouse de vache,...) est encore largement pratiqué dans beaucoup de lieux en Afrique de l'ouest pour améliorer leurs propriétés (tenue, imperméabilité,...). Mais ces pratiques tendent à disparaître ou ont largement disparues au Sénégal qui privilégie les enduits ciment dits « en dur ».

Amélioration du confort thermique : L'influence de l'isolation thermique des toitures a été étudiée dans la partie II / § 6.3. La large majorité des bâtiments ruraux n'étant pas climatisés et les exigences de confort des occupants

encore relativement faibles, le gain potentiel en terme de confort de l'isolation des toitures en Voûte Nubienne par un matériau d'isolation ne semble pas probant. Des études spécifiques sont à mener dans le cas de bâtiment à fortes exigences de confort / conditions intérieures (bâtiments de conservation agricole, conservation de médicaments,...).

L'isolation thermique des bâtiments en voûte nubienne se heurte également à la problématique de la mise en œuvre. L'isolation thermique par l'extérieur de la toiture en voûte nubienne implique le confinement du matériau typha dans un milieu potentiellement humide alors qu'il s'agit d'un matériau putrescible. En paroi verticale, la mise en œuvre, sous forme de vrac entre deux parois d'un double mur semble moins problématique et présente des risques beaucoup plus faibles liés à l'humidité.

3.2.3. *Projet PNEEB*

Le PNEEB est le programme National de réduction des émissions de gaz à effet de serre à travers l'Efficacité Énergétique dans le secteur du Bâtiment au Sénégal. Partant du constat que l'utilisation de l'énergie électrique pour des usages commerciaux et résidentiels représentent la moitié des émissions de gaz à effet de serre du Sénégal, l'objectif global du projet est le développement de pratiques d'efficacité énergétique :

- Appuyer le processus d'élaboration des arrêtés d'application du code de construction du Sénégal ;
- Promouvoir l'utilisation des matériaux et des techniques de construction testés et éprouvés qui permettront grâce à leur utilisation de réduire la consommation d'énergie, le rejet des GES et d'améliorer le confort dans les bâtiments ;
- Renforcer les capacités techniques et le cadre institutionnel du secteur du bâtiment.
- Disséminer les bonnes pratiques d'efficacité énergétique

La **partie II / § 6.** de cette étude met en évidence les gains en terme de confort et de performance énergétique des bâtiments en voûte nubienne comparativement aux bâtiments construits avec les techniques de références étudiées. La diffusion de bâtiments Voûte Nubienne à grande échelle pour permettre l'accès au plus grand nombre à un habitat adapté et de qualité coïncide ainsi avec les objectifs globaux du projet PNEEB. Des synergies pourront être recherchées entre les deux projets, notamment la prise en compte de la technique Voûte Nubienne dans le projet de Réglementation Thermique en tant que technique constructive à bonne performance énergétique.

4. Mise en œuvre

4.1. Réalisabilité du projet

4.1.1. *Pertinence en réponse aux besoins*

Au chapitre II, l'analyse environnementale de la technologie Voûte Nubienne confirme que qu'il s'agit d'un « Habitat Vert » / « écologique », puisque :

- ayant recours à des matériaux locaux à faibles impacts environnementaux ;
- permettant de réduire de manière conséquente les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie ;
- dont la performance de l'enveloppe thermique procure une amélioration du confort et une réduction potentielle des consommations énergétiques de rafraîchissement.

En juillet 2014, l'Association Voûte faisait l'état de 1 236 chantiers Voûte Nubienne depuis 15 ans en Afrique de l'Ouest (principalement au Burkina Faso et au Mali) pour près de 60 000 m² de surface bâtie. Le marché de la Voûte Nubienne enregistre une croissance annuelle moyenne de 32 % des surfaces bâties. 70 % des clients ayant construits sont des cultivateurs, des commerçants, des fonctionnaires locaux qui ont financé leurs bâtiments sans apport extérieur. Plus de 17 000 bénéficiaires utilisent régulièrement les Voûtes Nubiennes. Ces résultats tendent à montrer que la technique de construction Voûte Nubienne constitue une solution d'accès, pour le plus grand nombre à un habitat décent, durable et économique au Burkina Faso et au Mali.

Au Sénégal, il s'agit de valider cette position en adéquation avec les réalités économiques et sociales locales et de positionner la Voûte Nubienne dans une filière « Habitat adapté » à impulser.

4.1.2. *Aspects innovants*

La technologie Voûte Nubienne est une méthode de construction ancestrale utilisée dans l'antiquité en Nubie et en Mésopotamie mais dont la connaissance et la maîtrise n'était jamais parvenue jusqu'en Afrique de l'Ouest. Les bâtiments en Voûte Nubienne sont construits presque exclusivement en terre crue, avec très peu d'outillage et pourtant fournissent un service au moins équivalent, voir très supérieur à des constructions modernes en terme de durabilité, de confort et d'efficacité énergétique. C'est une technique dite à Haute Intensité de Main d'Oeuvre (HIMO), dont plus de 90 % de la valeur du gros œuvre correspond à de la main d'œuvre. Elle ne nécessite pas d'importation de matériaux de construction et donc contribue davantage à l'essor des économies locales / nationale.

4.1.3. *Durabilité et pérennité*

La diffusion de la technologie Voûte Nubienne est basée sur une approche de marché, dans lequel clients et artisans-maçons contractualisent directement sans apports financiers extérieurs. L'Association Voûte Nubienne

indique une croissance annuelle moyenne du nombre de construction de 32 % depuis 2000, début de son programme, au Burkina Faso, Mali, Sénégal, Bénin, Ghana. Au Mali et au Burkina Faso, des zones dites de « retrait » ont été mises en place dans lesquelles un marché autonome et pérenne est observé.

4.2. Activités

Il est recommandé de réaliser une phase préalable de concertation avec l'ensemble des parties prenantes du projet au niveau national et sur chacun des sites dans le but :

- de construire la stratégie à mettre en œuvre, les objectifs à atteindre, les activités à mener ;
- de définir le rôle et les responsabilités de chaque acteur, et les relations entre eux.

La stratégie à mettre en place pourra s'articuler autour des grandes thématiques suivantes :

- **L'appui au développement d'un marché rural de bâtiments privés d'habitation ;**
- **L'appui au développement d'un marché de bâtiments publics ou communautaires ;**
- **La formation et le renforcement de capacités des acteurs du bâtiment ;**
- **La mise en place et la structuration d'une filière habitat adapté au Sénégal**

Les paragraphes suivants donnent les pistes d'activités à mener sur chacune de ces thématiques.

4.2.1. L'appui au développement d'un marché rural de bâtiments privés d'habitation

- Implication de groupements locaux / société civile dans la vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne ;
- Sensibilisation de base en milieu rural par des animateurs issus de la région et convaincant localement : organisation de mission de sensibilisation, identification de clients potentiels et d'apprentis, suivi de la réalisation des chantiers ;
- Sensibilisation et formation des élus locaux ;
- Ces activités pourront s'inspirer des méthodologies d'interventions utilisées par l'Association Voûte Nubienne (méthodes d'amorce de marché, Déploiement du Programme à partir d'un Village Pilote,...). Mais elles devront aussi les dépasser, ces méthodologies ayant montré leurs limites dans le contexte du Sénégal (a contrario des retours d'expériences obtenus au Burkina Faso et au Mali) ;
- Bâtiments agricoles et d'élevage : impliquer les groupements agricoles dans la définition des besoins, la construction et le suivi de bâtiments pilotes pour évaluer la pertinence et la répliquabilité ;

4.2.2. L'appui au développement d'un marché de bâtiments publics et communautaires

- Implication des services techniques des collectivités locales dans la concertation, la réalisation et le suivi de chantiers Voûte Nubienne (Consultations, suivi de chantier, entretien et maintenance) ;
- Sensibilisation et formation des élus locaux ;

- Normalisation de la technologie Voûte Nubienne (études et tests techniques, rédaction de normes et textes de références, prise en compte de la technologie Voûte Nubienne dans le projet de réglementation thermique...) ;
- Rédaction de référentiels permettant la rédaction d'Appels d'Offres (CPTP, modèles de contrat, demande de renseignement de prix,...), le suivi de chantier, le suivi des bâtiments ;
- Ces activités pourront s'inspirer du travail de vulgarisation accompli par l'Association Le Partenariat dans la région de Saint-Louis auprès de l'Agence Régional de Développement de Saint-Louis, du GIC de Dagana... Elles impliquent le transfert de compétences, la formation et le renforcement de capacités des acteurs concernés sur les sites retenus.

4.2.3. La formation et le renforcement de capacités des acteurs du bâtiment

- Amélioration de la formation professionnelle en milieu formel et informel : stratégie de recrutement et de formation à formuler (profilage des candidats à la formation, formation dynamisée sur chantier, implication des entreprises BTP...)
- Formation dynamisée sur les chantiers : l'Association Voûte Nubienne teste depuis fin 2014 cette stratégie qui consiste à réserver des financements spécifiques à hauteur d'environ 20-30 % du coût du chantier pour organiser sur les chantiers, c'est-à-dire en situation réelle, des temps de formation spécifiques à destination d'apprentis identifiés ;
- Implication d'entreprises BTP (dossier d'Appel d'Offre, processus d'apprentissage, mise à disposition de maçons) pour les mettre en capacité d'intégrer la technologie Voûte Nubienne dans leurs offres ;
- Implication des centres de formation professionnelle régionaux et nationaux : communication sur les parcours de formation Voûte Nubienne, recherche de ponts entre formation formelle et formation informelle, construction de Voûte Nubienne dans les centres de formation

4.2.4. La mise en place et la structuration d'une filière habitat adapté au Sahel

- Sensibilisation et formation des élus locaux ;
- Exemplarité de l'État par la construction de bâtiments administratifs en Voûte Nubienne ;
- Implication des acteurs de la finance et de la micro-finance pour des solutions de financement du bâti (subventions, crédits habitats, prêt à taux zéro) ;
- Accès à la finance carbone ;
- Réflexions avec les acteurs et organismes de logements sociaux (HLM) pour la construction de cités et lotissements pilotes ;
- Sensibilisation, réflexion, mise en place de projets dans les régions avec les différents acteurs qui s'y impliquent : chambre de commerce, GIC, ARD, urbanisme... ;
- Plaidoyer et exemplarité de l'Etat sénégalais au sein de la sous région et dans la communauté internationale : prise en compte et valorisation du projet et de la technologie Voûte Nubienne dans le cadre des mécanismes existants de communications et négociations sur le changement climatique ;

4.3. Suivi et évaluation

4.3.1. *Liste des chantiers réalisés*

Une liste de l'ensemble des constructions réalisées dans le cadre du projet, par site et par année, devra être tenue à jour. Elle devra comporter l'ensemble des informations concernant le chantier, notamment : nom du client, type d'usage, nombre de voûtes, superficie, localisation, équipes de maçons... L'Association Voûte Nubienne et l'association Le Partenariat utilisent une nomenclature des informations requises ainsi que des outils qui pourront être soit utilisés directement, soit adaptés pour les besoins du projet.

Cette liste est essentielle car elle constitue la base de calcul des résultats obtenus, tant en terme de constructions que d'émissions de gaz à effet de serre évitées. Ce besoin de suivi devra faire l'objet d'encore plus d'attention dans le cas où le projet accéderait à la finance carbone et/ou à des financements de type Results-Based Financing.

4.3.2. *Méthodologie de suivi-évaluation*

Une méthodologie de suivi-évaluation devra être développée pour permettre d'évaluer annuellement les résultats obtenus en fonction des objectifs fixés et d'en déduire les orientations stratégiques à prendre. Cette méthodologie pourra utiliser des outils spécifiques pour suivre les missions réalisées et surtout pour permettre le suivi de la formation des apprentis, maçons et entreprises (effectifs, parcours de formation,...)

4.4. Financements

4.4.1. *Financement Carbone*

Les financements carbone permettant de valoriser les émissions de gaz à effet de serre du projet devront être envisagés. Il peut s'agir des modes de financements suivants dont la faisabilité devra être évaluée :

- Les mécanismes de développement propre (MDP) de l'UNFCCC
- Au niveau national, dispositif NAMA de l'UNFCCC¹²
- Les modes de financement de type Results-Based Financing (RBF)
- Le marché du carbone volontaire

Afin de tenir compte de l'efficacité énergétique des bâtiments Voûte Nubienne non ventilés et non climatisés dans la valorisation carbone, il conviendra de réaliser une évaluation de la Suppressed Demand selon la méthodologie proposée dans le document « *Annex 2, Guidelines on the consideration of suppressed demand in CDM*

12 http://unfccc.int/cooperation_support/nama/items/7476.php

Methodologies ¹³» de l'UNFCCC.

4.4.2. Financement des constructions

4.4.2.1. Bâtiments institutionnels, publics, communautaires

Le financement des bâtiments publics / communautaires sera couvert par les fonds alloués pour le projet. Pour un nombre de 51 bâtiments d'une surface moyenne de 85 m² et d'un coût global de construction de 100 000 FCFA par m² bâti (gros œuvre + finitions), le financement des constructions s'élèverait à 433,5 millions de FCFA, soit un montant de 712 000 \$.

Dans le but d'accélérer la diffusion des bâtiments en Voûte Nubienne au Sénégal, les pistes de financement suivantes pourront être étudiées dans chacun des cas :

- utiliser les fonds déjà alloués pour la construction de bâtiments de services sociaux (écoles, postes de santé,...) par exemple dans le cadre des Plans Locaux de Développement, et réserver les financements du projet pour l'accompagnement, le suivi, le transfert de compétences, la formation de maçons... ;
- étudier les possibilités de cofinancement sur les thématiques spécifiques (par exemple formation professionnelle,...), par exemple dans le cadre de chantier de formation ;

4.4.2.2. Bâtiments privés

Dans le cas de constructions privés, le client prend en charge l'ensemble du budget du chantier. Au Burkina Faso, au Mali, l'expérience de l'Association Voûte Nubienne montre que beaucoup de clients modestes ont recours à l'autoconstruction (fabrication des briques, participation en tant que manœuvre,...) pour financer jusqu'à parfois 75 % des coûts du gros œuvre. A contrario, ces pratiques ne sont pas du tout répandues au Sénégal, et on constate que les clients modeste peinent à accéder à la voûte nubienne. En assumant que le mécanisme de marché offre / demande doit rester la règle, différentes solutions financières, à élaborer en collaboration avec des instituts bancaires, pourront être étudiées, testées et validées pour permettre l'accès à la technique Voûte Nubienne : prêts à taux zéro, crédits, subventions conditionnés à de bonnes pratiques GDT, ... Leur financement peut être alimenté en partie par des mécanismes de financement carbone ou de results-based financing.

13 https://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/meth/meth_guid41.pdf

4.5. Liens avec la Gestion Durable des Terres

En milieu rural, les populations tirant leurs revenus de l'agriculture et de l'élevage sont les premières concernées par la nécessité d'une gestion durable des terres et par le besoin d'un habitat adapté. Il existe de plus une complémentarité possible entre le métier de maçon Voûte Nubienne, exercé pendant la saison sèche, et les métiers agricoles exercés pendant la période hivernale.

Des synergies entre le volet Gestion Durable des Terres et le volet Habitat Vert en technologie Voûte Nubienne devront être recherchées dans la phase de concertation du projet. Il pourra s'agir notamment :

- de retenir pour le projet des sites représentatifs des différentes configurations de dégradations des sols rencontrées au Sénégal, par exemple : 1. steppes arbusives où la ressource bois est quasi inexistante, 2. zones de culture où la ressource bois est faible, 3. zones forestières où la ressource bois reste encore importante mais est réglementée (parcs nationaux, zones protégées)
- de faire porter une partie de la vulgarisation de la technologie Voûte Nubienne par des acteurs du monde agricole (groupements de producteurs, OCB,...) qui pour certains œuvreront déjà à la diffusion de pratiques GDT ;
- de construire des bâtiments pilotes agricoles (stockage, conservation, transformation) et d'en évaluer les usages, dans le but notamment d'améliorer les revenus de productions issues de pratiques agricoles / forestières GDT, de participer à la sécurité alimentaire ;
- d'évaluer la capacité à mener des actions communes (GDT et voûte nubienne) de sensibilisation, de communication, d'information ;
- pour les clients potentiels de la Voûte Nubienne : de conditionner l'accès à des solutions de financement de l'habitat (subventions, crédits,...) à la mise en place de pratiques GDT
- de mener une étude d'impact sur les méthodes d'extraction du banco (terre) et sur les besoins d'encadrement de cette activité afin d'organiser les prélèvements de manière à protéger les milieux naturels et minimiser les impacts locaux ;

4.6. Gestion environnementale : Encadrement de l'extraction du banco

Toute technique d'extraction et de production de matériaux de construction a un impact sur l'environnement qu'il faut s'efforcer de minimiser. Dans le cas de la technologie Voûte Nubienne, il s'agit de l'extraction de la terre crue (banco) qui se fait dans la plupart des cas à proximité du chantier, dans un rayon de 0 à 20 km. Une diffusion massive de cette technologie dans les territoires impliquerait donc la réhabilitation / la création de carrières dans pratiquement chaque village. Menée de manière chaotique, cette activité d'extraction pourrait induire des impacts sur l'environnement local tels que ravinements et érosions du sol et peut poser des problèmes de sécurité. Menée en suivant certaines règles de base, comme c'est encore le cas dans beaucoup d'endroit au Mali et au Burkina

Faso (pour la voûte nubienne et pour la construction traditionnelle), cette activité ne pose que peu de problème, voir se révèle être une opportunité de développement et d'aménagement du territoire.



Carrières de banco au Burkina Faso

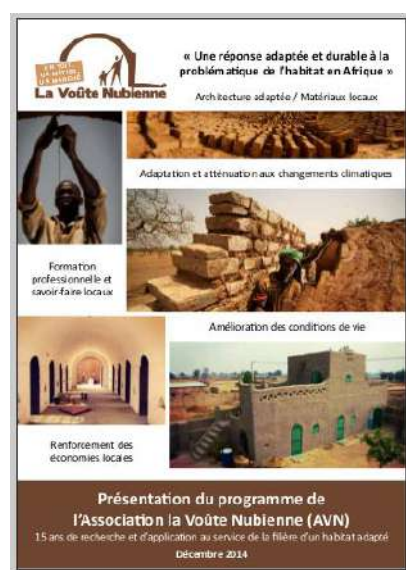
Les recommandations suivantes sont des pistes pour encadrer la pratique de l'extraction du banco et minimiser les impacts locaux :

- Réhabilitation des carrières existantes dans les villages
- Identification par les autorités locales de sites d'extraction existants ou à créer
- Encadrement et réglementation de la pratique d'extraction de banco et de fabrication de briques
- Sécurisation des sites
- Réduction de l'érosion des sols et ravinements par des pratiques de gestion durable des terres à proximité
- Dans les zones soumises à des risques d'inondations (rives du fleuve Sénégal par exemple) : Les sites d'extraction du banco peuvent jouer le rôle de bassins de rétention au moment de l'hivernage, réduisant ainsi les risques d'inondations pour les quartiers les plus exposés.
- Synergies possibles avec des activités génératrices de revenus au moment de l'hivernage : maraîchage
- Plans locaux d'aménagement

Dans le cadre de la mise en œuvre de ce projet, une étude d'impact sur les méthodes d'extraction du banco (terre) et sur les besoins d'encadrement de cette activité pourra être menée dans le but de protéger les milieux naturels, minimiser les impacts locaux et assurer la sécurité des populations.

4.7. Outils de sensibilisation et de plaidoyer

L'Association Voûte Nubienne et l'Association Le Partenariat disposent de documents de sensibilisation et de communication axés sur la vulgarisation en milieu rural : bâches, livrets, cahiers photos... qui pourront être révisés et le cas échéant, adaptés spécifiquement aux régions des sites retenus pour le projet. De nouveaux supports pourront être développés spécifiquement pour l'appui au marché des bâtiments publics/communautaires et pour la formation professionnelle (communication au niveau des collectivités locales, des centres de formation). Il pourra également être envisagé la diffusion de reportages audio / vidéo sur les chaînes TV et radios nationales et régionales



Supports de communication utilisés par l'Association Voûte Nubienne

BIBLIOGRAPHIE

ABDESSELAM Mohamed. *Les bases de la bonne conception thermique*. [en ligne] SOLENER, Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 12 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

Affordable Land and Housing in Africa, volume 3 [en ligne] UN Habitat, 2011, 101 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3376>> (Consulté le 13/12/2014)

Annex 2, Guidelines on the consideration of suppressed demand in CDM Methodologies (version 0.2.0) [en ligne] UNFCCC, 2012, 7 p. Format PDF. Disponible sur : <https://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/meth/meth_guid41.pdf> (consulté le 15/02/2015)

BERTHOME Ahmed., SILVESTRE Eric Silvestre., KOUAME Claude. *Matériaux locaux et éco architecture au Sénégal, état des lieux et perspectives dans le cadre d'une transition verte*. [en ligne] Bureau International du Travail, 2013, 33p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.ilo.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

Bilan à mi-parcours, projet de préservation participative de la biodiversité et développement faiblement émissif en carbone d'écovillages pilotes à proximité des aires protégées du Sénégal (écovillages) [en ligne] Agence Nationale des Ecovillages, ANEV, Dakar, 2014, 54p. Format PDF. Disponible sur : <<http://ecovillages.sn/>> (Consulté le 25/03/2015)

BUFFLIER Claire. *Architecture de terre : L'utilisation des matériaux locaux dans les bâtiments scolaires au Mali* [en ligne] École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008, 163 p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.unil.ch/enseignement/files/live/sites/enseignement/files/shared/pdf/8._Resume_C._Bufflier.pdf> (Consulté le 13/01/2015)

Carte sanitaire du Sénégal, mise à jour de 2010 [en ligne] Ministère de la Santé et de la Prévention, 2010, 177 p. Format PDF. Disponible sur <www.sante.gouv.sn> (Consulté le 25/03/2005)

CISSE, Ouma, *Profil du secteur du logement au Sénégal*. [en ligne] ONU Habitat, 2012, 148p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.unhabitat.org/>> (Consulté le 13/01/2015)

Climate and Climate Change. [en ligne] CEDEAO, Atlas on Regional Integration in West Africa, environment series, 2008, 24p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.oecd.org/regional/atlasonregionalintegrationinwestafrica.htm>> (Consulté le 09/01/2015)

Communication initiale du Sénégal à la convention-cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques. [en ligne] République du Sénégal, 1997, 118p. Format PDF. Disponible sur : <<http://unfccc.int/resource/docs/natc/sennnc1.pdf>> (Consulté le 07/01/2015)

DE HERDE André., LIEBARD, André. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Le Moniteur Éditions, 2006, 740 p.

Décret n°2010-99 du 27 janvier 2010 portant code de la construction (partie réglementaire) [en ligne] République du Sénégal, Sénégal, 2010, 59p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.gouv.sn/Code-de-la->

[Construction.html](#)> (Consulté le 25/03/2015)

Deuxième communication nationale du Sénégal, convention-cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques. [en ligne] République du Sénégal, 2010, 177p. Format PDF. Disponible sur : <<http://unfccc.int/resource/docs/natc/senncc2.pdf>> (Consulté le 07/01/2015)

Deuxième enquête de suivi de la pauvreté au Sénégal (ESP-II 2011) : rapport définitif. [en ligne] République du Sénégal, ANSD, 2013, 191 p. Format PDF. Disponible sur : <www.ansd.sn/ressources/rapports/Rapport_ESPS-2011.pdf> (Consulté le 16/12/2014)

DIENG Cheikh., KAIRE Maguette. *Etude du bilan carbone territorial des écovillages en vue d'un projet de finance carbone, rapport final provisoire [en ligne]* Agence Nationale des Ecovillages, ANEV, Dakar, 2013, 40p. Format PDF. Disponible sur : <<http://ecovillages.sn/>> (Consulté le 11/01/2015)

DIONE Ernest. *Présentation PNEEB, Programme National de réduction des émissions de gaz à effet de serre à travers l'Efficacité Énergétique dans le secteur du Bâtiment au Sénégal [en ligne]* Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 15p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

DIONE Ernest. *Présentation Typha, Projet de production de matériaux d'isolation thermique à base de typha [en ligne]* Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 8p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 1 : conception des nouveaux bâtiments [en ligne] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2002, 186 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF>> (consulté le 13/12/2014)

Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 2 : exploitation des installations existantes [en ligne] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2002, 150 p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/153_eeTOME2.PDF> (consulté le 13/12/2014)

Étude préliminaire d'adaptation aux changements climatiques en Afrique, Bâtiments, Contribution au projet négociation climat pour toute l'Afrique réussie (NECTAR) [en ligne] Groupe de Recherche et d'échanges technologiques (GRET), Institut de la francophonie pour le Développement Durable (IFDD), 2009, 76 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub-desc.php?id=325>> (Consulté le 11/12/2014)

FALL DIOP, Magatte. *Les consommations en combustibles domestiques dans la région de Fatick [en ligne]* PERACOD, Dakar, 2010, 87 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.peracod.sn/IMG/pdf/comb-dom-fatik-peracod.pdf>> (Consulté le 13/04/2015)

GRANIER Thomas., CHABAUD Cyril., HARDY Mathieu. *Manuel du maçon nubien, fiches techniques : gros-oeuvre, second-oeuvre et finitions, conseils entrepreneuriaux.* Association Voûte Nubienne, 2013, 84 p.

HARDY Mathieu. *Pathologies, désordres et sinistres VN, description et prévention.* Association Voûte Nubienne, 2013, 66 p.

HAZOUME Madiana. *Confort thermique des bâtiments en Voûte Nubienne [en ligne]* ICAM de Nantes, 2013, 38 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.lavoutenubienne.org/>>

JARNO Bruno. *Suivi, évaluation, mesures de l'impact du programme, tableau de bord 2012-2013 [en ligne]* Association Voûte Nubienne, 2014, 146p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.lavoutenubienne.org/>> (consulté le 08/04/2015)

KORANTENG Christian., MAHDAVI Ardesir. *A study into the thermal performance of low-rise office buildings in Ghana.* [en ligne] Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, Vienna University of Technology, Austria, 2010, 8p. Format PDF. Disponible sur : <http://info.tuwien.ac.at/bausim/conftool/koranteng-2010-a_study_into_the_thermal_performance-115.pdf> (Consulté le 09/01/2015)

LOI n° 2008-43 du 20 août 2008 portant Code de l'urbanisme [en ligne] République du Sénégal, 2008, 12p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.gouv.sn/>> (Consulté le 25/03/2015)

LOI n° 2009-23 du 8 juillet 2009 portant code de la construction (Partie législative) [en ligne] République du Sénégal, 2009, 59p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.gouv.sn/Code-de-la-Construction.html>> (Consulté le 25/03/2015)

Manifeste pour une réponse adaptée et durable à la problématique de l'Habitat de qualité en Afrique sahélienne [en ligne] Association Voûte Nubienne, 2015. Disponible sur : <<http://www.lavoutenubienne.org/>> (Consulté le 10/04/2015)

NDOUTOUM Jean-Pierre. *Les initiatives de l'IFDD sur la maîtrise de l'énergie dans les bâtiments.* [en ligne] IFDD, Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 11p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

NIANG Mbacké. *Exemples de réalisations utilisant des matériaux locaux* [en ligne] Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 10p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

NIANG Mbacké. *Le bâtiment au Sénégal : typologie de l'habitat, parc, consommation d'énergie, ...* [en ligne] Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale, Dakar, 2013, 10p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.pctidakar.org/>> (Consulté le 09/01/2015)

NIANG Mbacké. *Processus de mise en place de la première réglementation pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal de 1996 à 2013.* [en ligne] ECREEE, Atelier régional des initiatives de la CEDEAO, 2013, 51p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.ecreee.org/sites/default/files/event-att/mbacke_niang_ouaga_22_avril_2013-v2.pdf> (Consulté le 09/01/2015)

OLIVA Jean-Pierre., COURGEY Samuel. *L'isolation thermique écologique. Conception, matériaux, mise en œuvre – Neuf et réhabilitation.* France : Editions Terre Vivante, 2010, 255 p.

OUEDRAOGO Bachir Ismael. *Climate change, renewable energy and population impact on future energy demand for Burkina Faso built environment.* [en ligne] University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2012, 284 p. Format PDF. Disponible sur : <www.manchester.ac.uk/> (Consulté le 10/12/2014)

Plan Sénégal Émergent 2014 [en ligne] République du Sénégal, 2014, 184 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.gouv.sn/IMG/pdf/PSE.pdf>> (Consulté le 01/02/2015)

Rapport annuel 2010 [en ligne] SENELEC, 2010, 64 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.senelec.sn/>> (Consulté le 26/03/2015)

Rapport national sur la situation de l'éducation 2013 [en ligne] Ministère de l'Education Nationale, 2013, 113 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.education.gouv.sn/>> (Consulté le 25/03/2015)

Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage, Rapport définitif, RGPHAE, 2013. [en ligne] Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, ANSD, Sénégal : Dakar, septembre

2014, 418p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.ansd.sn/ressources/rapports/Rapport-definitif-RGPHAE2013.pdf>> (Consulté le 10/12/2014)

Résultats définitifs du troisième recensement général de la population et de l'habitat – (2002), Rapport nationale de présentation. **[en ligne]** Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, ANSD, Sénégal : Dakar, juin 2008, 163p. Format PDF. Disponible sur : <www.ansd.sn/ressources/rapports/RGPH3_RAP_NAT.pdf> (Consulté le 10/12/2014)

Suppressed Demand and the Carbon Markets, Does development have to become dirty before it qualifies to become clean ? **[en ligne]** GERES, 2011, 48p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.geres.eu/fr/ressources/publications/item/115-suppressed-demand-and-the-carbon-markets>> (Consulté le 10/02/2015)

Système d'Information Energétique du Sénégal, rapport 2010 **[en ligne]** Ministère de la coopération internationale, des transports aériens, des infrastructures et de l'énergie, Sénégal : Dakar, 2012, 61 p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.compagnie3e.com/images/stories/documentation/energie-conventionnelle/Rapport_SIE_Senegal.pdf> (Consulté le 08/04/2015)

TESSEMA Fissema., TAIPALE Kaarin., BERHGE Jan. *Sustainable Buildings and Construction in Africa.* **[en ligne]** Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU, Germany), 2010, 72p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.scp-centre.org/fileadmin/content/files/4_projects/24_Africa_Marrakech_Task_Force/SBC_BriefBook_Gesamt_reduced.pdf> (Consulté le 10/02/2015)

The next 4 billion, market size and business strategy at the base of the pyramid **[en ligne]** World Resources Institute, 2007, 164 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.wri.org/publication/next-4-billion>> (consulté le 12/02/2015)

WG II Assessment Report 5, Climate Change 2014, Impacts, Adaptation, and Vulnerability, chapter 22 Africa **[en ligne]** IPCC – Intergovernmental panel on climate change, working group II, 2014, 67 p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap22_FINAL.pdf> (Consulté le 08/04/2015)

WG III Assessment Report 5, Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, chapter 9 Buildings **[en ligne]** IPCC – Intergovernmental panel on climate change, working group III, 2014, 68 p. Format PDF. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf> (Consulté le 08/04/2015)

Word Urbanization Prospects, highlights, 2014 revision **[en ligne]** UN Habitat, 2014, 32 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://esa.un.org/unpd/wup/>> (Consulté le 12/02/2015)

World Population Prospects , The 2012 Revision, key findings and advance tables **[en ligne]** United Nations, New York, 2013, 54 p. Format PDF. Disponible sur <http://esa.un.org/wpp/documentation/pdf/wpp2012_%20key%20findings.pdf> (Consulté le 12/02/2015)

WYSS Urs. *Projet Dissémination des techniques de construction de toitures économiques et non consommatrices de bois au Burkina Faso* **[en ligne]** Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, 59 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.lavoutenubienne.org/fr/autres-rapports>> (consulté le 10/12/2014)

WYSS Urs., SAURET, Hugues. *Indicateurs de confort dans la technique de la Voûte Nubienne, rapport intermédiaire* **[en ligne]** Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007, 34 p. Format PDF. Disponible sur : <<http://www.lavoutenubienne.org/fr/autres-rapports>> (consulté le 10/12/2014)

GLOSSAIRE

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AVN	Association Voûte Nubienne
CCNUCC UNFCCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques United Nations Framework Convention on Climate Change
DEEC	Direction de l'Environnement et des Établissements Classés
Ef	Énergie finale
Ep	Énergie primaire
GDT	Gestion Durable des Terres
GES	Gaz à Effet de Serre
Gg	Giga-gramme
GIEC IPCC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat Intergovernmental Panel on Climate Change
kg C eq	Potentiel de réchauffement global, exprimé en quantité de C 1 kg C eq = 3,67 kg CO ₂ eq
kg CO ₂ eq	Potentiel de réchauffement global, exprimé en quantité de CO ₂
kWh	Kilowatt-heure 1 kWh = 3,6 MJ
MDP	Mécanismes pour un Développement Propre
MJ	Méga-Joules
PSE	Plan Sénégal Émergent
VN	Voûte Nubienne



ANNEXES

1. Photographies de l'habitat rural au Sénégal

>> PETITES HABITATIONS



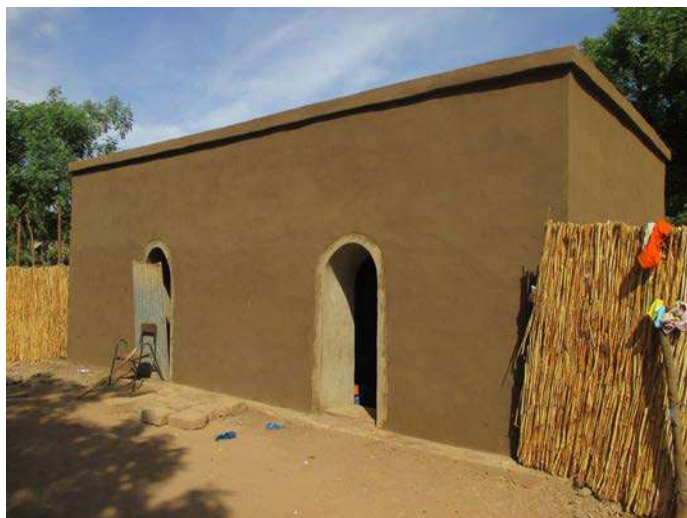
>> HABITATIONS MOYENNES



>> AUTRES USAGES



2. Photographies du parc bâti Voûte Nubienne au Sénégal



Habitation rurale dans le village de Ngueye Gueye, département de Bambey, Région de Diourbel



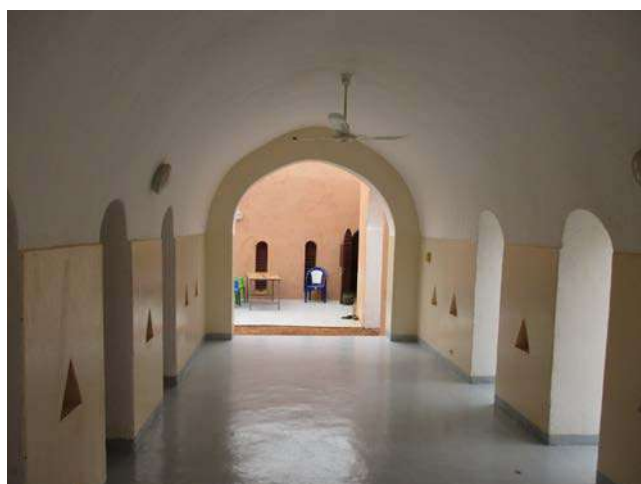
Salle de classe à Kodith, département de Podor, région de Saint-Louis



Maternité à Guendar, département de Podor, région de Saint-Louis



Bureaux de l'Association Voûte Nubienne et Villa de démonstration, à Thiès (quartier Grand Thialy)



Maison des Energies à Sinthiou Bamambé, département de Kanel, région de Matam



Mosquée à Guédé Woro, département de Podor, région de Saint-Louis

3. Listes des entretiens réalisés

REGION	STRUCTURES	PERSONNES
DAKAR	Agence de l'économie et de la Maîtrise de l'énergie (AEME)	Daouda GASSANA Équipe AEME (présentation projet)
	Association Nationale des Ecovillages (ANEV)	Colonel Demba Mamadou BA, <i>Directeur général</i>
	Comité National Sur les Changements Climatiques	Ousmane Fall SARR, <i>Président</i>
	Direction de l'Environnement et des Établissements Classés (DEEC)	Mariline DIARA, <i>Directrice</i> Madeleine Rose Diouf SARR, <i>ingénieur environnementaliste, chef de la division climat</i>
	Direction de la Planification et de la Veille Environnementale (DPVE)	M. Ibra Sounkarou NDIAYE, <i>Directeur Consultant GDT</i> Moustapha Bougouma DIARRA <i>Ingénieur Agro-economiste</i> <i>Assistant pour l'etude GDT</i>
	Projets TYPHA et PNEEB	Mbacke NIANG Ernest DIONE, coordonateur national El Hadj Mansour SOW
DIOURBEL	Agence Régionale de Développement (ARD) de Diourbel	Mamadou SENE <i>Directeur</i>
	Baol Environnement	Ibrahima FAYE <i>Coordinateur des Associations Locales Environnement</i>
	Direction Régionale de l'Environnement et des Établissements Classés (DREEC) de Diourbel	Daouda FALL
	Gouvernance de Diourbel	Mouhamadou Moustapha NDAO <i>Gouverneur</i>
	Les Jaambar de Ngueye Gueye	Michel Ngor DIOUF <i>Président</i>
MATAM	Association Le Partenariat	Abdoul Aziz FAYE <i>Chargé de Mission</i>
	Direction Régionale de l'Environnement et des Établissements Classés (DREEC) de Matam	Cheick KANTE <i>Chef de division</i>
	Agence Régionale de Développement (ARD) de Matam	Abasse NDOUR
SAINT LOUIS	Agence Régionale de Développement (ARD) de Saint-Louis	
	Association Le Partenariat	Nicolas DUPUY, <i>coordinateur</i> Bachir NIANG, <i>chargé du suivi technique des chantiers et des bâtiments</i>

REGION	STRUCTURES	PERSONNES
		Malick SY, <i>chargé de production régional</i>
	Direction Régionale de l'Environnement et des Établissements Classés (DREEC) de Saint-Louis	Elhadj Boubacar DIA <i>Chef de division</i>
	Groupement d'Intérêts Communautaire (GIC) de Dagana	Abdoulaye NDOYE, <i>secrétaire permanent</i>
	Village Pilote de NDick	Samba SECK
TAMBACOUNDA	Direction Régionale de l'Environnement et des Établissements Classés (DREEC) de Tambacounda	Salif BA <i>Chef de division</i>
	Organisation pour la Promotion du Développement Autonome de Dialacoto (OPDAD)	Malang CISSAO, <i>coordonnateur</i> Mamadou DANFAKHA, <i>animateur de vulgarisation</i>
	Village Pilote de Dialacoto	Madické SECK
THIES	Agence Régionale de Développement (ARD) de Thiès	M. Oumar FAYE <i>Technicien ARD</i>
	Association Développement Gembloux	Stéphane CONTINI, <i>coordinateur</i>
	Association Voûte Nubienne	Fanny DUPUIS, <i>coordinatrice nationale</i> Thomas GRANIER, <i>directeur général</i> Ndiame FALL, <i>assistant de coordination et animateur de vulgarisation</i> Khady LY, <i>animatrice de vulgarisation</i> Patrick WAUTERS, <i>assistant de coordination</i>
	Direction Régionale de l'Environnement et des Établissements Classés (DREEC) de Thiès	Moussa GUEYE <i>Chef de division</i>
	Gouvernance de Thiès	Mame Sane NDIAYE FAYE <i>Adjoint au Gouverneur, en charge du développement</i>



4. Étude environnementale du projet

**RESULTATS ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ATTENDUS
DANS LE CADRE DU PROJET**Accès à la saisie des bâtiments du
projet (ctrl + clic)

SAISIE



RECAPITULATIF

1. CHOIX DES PARAMETRES POUR L'AFFICHAGE DES RESULTATS

Choisir dans les menus déroulants ci-dessous les informations souhaitées pour calculer les résultats et impacts environnementaux attendus dans le cadre du projet, spécifiquement :

- Pour une région sélectionnée ;
- Pour une année sélectionnée ;
- Pour un modèle d'usage sélectionné (habitation ; autres usages).

Choix de la région :

TOUT

Choix de l'année :

TOUT

Choix des usages :

TOUT

Méthodologie d'évaluation utilisée :

La méthodologie et les hypothèses de calcul utilisées pour l'évaluation des impacts environnementaux attendus dans le cadre du projet sont décrites dans les documents suivants :

- Base de données des matériaux
- Base de données des modes de transport de matériaux
- Fiches quantitatives des matériaux de construction pour les différents systèmes constructifs et modèles d'usage
- Récapitulatif des impacts environnementaux des systèmes constructifs, modèles d'usage : habitation, autres usages
- Évaluation de la performance énergétique des systèmes constructifs pour le rafraîchissement et la ventilation
- Situation de référence : répartition des constructions neuves en fonction de la nature des murs et des toitures, modèles d'usage : petite habitation, habitation moyenne, autres usages

La saisie des bâtiments à construire dans le cadre du projet inclut les informations suivantes :

- Année du projet
- Région de construction
- Type d'usage des bâtiments (habitation ; autres usages)
- Taille des bâtiments (< 20 m² ; entre 20 et 50 m² ; > 50 m²)
- Nombre de bâtiments
- Surface utile totale (m²)
- Recours à la technique Voûte Nubienne – Béton armé (Oui ; Non)
- Rafraîchissement (Ventilation ; Climatisation ; Non)

Les résultats et impacts environnementaux attendus dans le cadre du projet sont calculés en fonction :

- De la méthodologie et des hypothèses de calcul définies précédemment ;
- De la saisie des bâtiments à construire dans le cadre du projet

2. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET IMPACTS ATTENDUS

2.1. Bâtiments construits

INDICATEURS	TOTAL	HABITATIONS	AUTRES USAGES	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4
Nombre de bâtiments	135	84	51	15	24	39	57
Surface construite (m²)	7 695	3 360	4 335	870	1 365	2 235	3 225
Nombre de Voûtes Nubiennes	276	123	153	33	48	81	114
Bénéficiaires utilisateurs ⁽¹⁾	3 375	336	3 039	393	597	990	1 395
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions FCFA) ⁽²⁾	308	134	173	35	55	89	129
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions \$ US) ⁽³⁾	0,506	0,221	0,285	0,057	0,090	0,147	0,212
Taux de Croissance Annuel Moyen du marché VN (%)	55%	-	-	-	57%	64%	44%

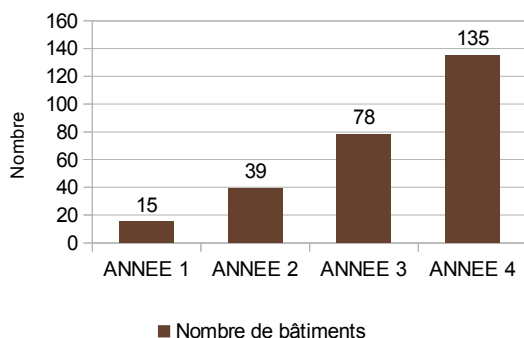
(1) Bénéficiaires utilisateurs utilisant régulièrement les bâtiments construits pour des usages d'habitation ou des usages autres, calculés d'après les ratios suivants, arrondis à l'unité supérieure :

- Petite habitation (< 20 m²) : 0,21 personne / m² utile
- Habitation moyenne (entre 20 et 50 m²) : 0,10 personne / m² utile
- Grande habitation (> 50 m²) : 0,04 personne / m² utile
- Autres usages : 0,70 personne / m² utile

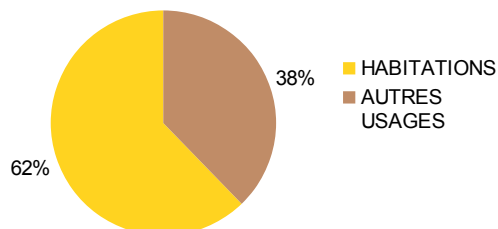
(2) Coût estimatif du gros œuvre Voûte Nubienne (hors enduits de finition, revêtements de sol, peintures, menuiseries, électricité, ventilation,...) calculé sur la base d'un ratio de 40 000 FCFA / m² utile

(3) 1 \$ = 608,6 FCFA, au 09/04/2015

Nombre cumulé de bâtiments



Répartition des bâtiments



2.2. Émissions de gaz à effet de serre évitées (tonnes CO2 eq sur 30 ans)

INDICATEURS	TOTAL	HABITATIONS	AUTRES USAGES	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4
Émissions évitées (tonnes CO2 eq sur 30 ans) ⁽¹⁾	822	420	402	92	146	238	346
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation) ⁽²⁾	2 088	936	1 152	236	370	606	876
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation) ⁽³⁾	10 101	4 130	5 971	1 145	1 791	2 936	4 228

(1) Emissions évitées pour les phases du cycle de vie : fabrication des matériaux, transport des matériaux jusqu'au chantier, entretien du bâti, rafraichissement du bâtiment (dans le cas où le bâtiment est climatisé ou ventilé)

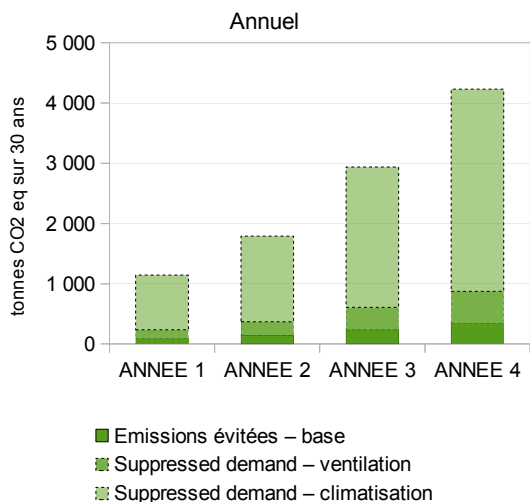
(2) Suppress Demand VENTILATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour ventiler les bâtiments lorsque la température intérieure se trouve en dehors de la plage de confort comprise entre 20°C et 32°C, par un système de ventilation type ventilateur sur pied ou ventilateur plafonnier (puissance max = 100 W pour 25 m², modulation de puissance (vitesse) en fonction de la température intérieure ; mix de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

(3) Suppress Demand CLIMATISATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour maintenir les bâtiments dans une plage de confort comprise entre 20°C et 32°C par un système de climatisation type SPLIT sur réseau électrique (COP = 2 ; mix de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

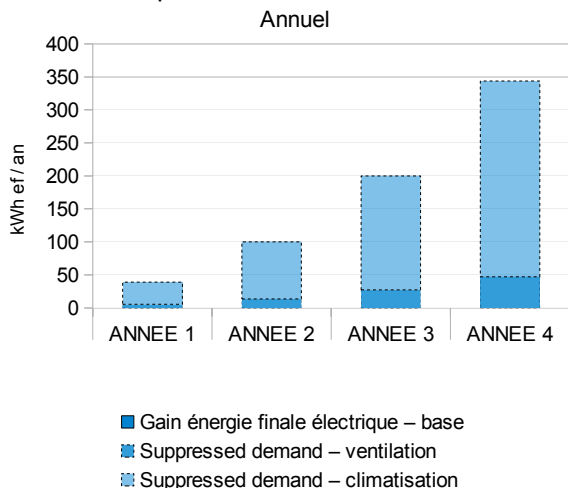
2.3. Énergie finale électrique non consommée pour les besoins de rafraichissement (MWh ef / an)

INDICATEURS	TOTAL	HABITATIONS	AUTRES USAGES	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4
Énergie finale électrique non consommée (MWh ef / an)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	46,9	19,1	27,8	5,3	13,6	27,2	46,9
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	343,6	137,4	206,2	39,0	99,9	199,8	343,6

Emissions de gaz à effet de serre évitées



Energie finale électrique non consommée pour le rafraichissement



3. PROJECTIONS A 25 ANS

INDICATEURS	RESULTATS ATTENDUS A 4 ANS	PROJECTIONS A 25 ANS (2040)		
		Croissance annuelle 20 %	Croissance annuelle 40 %	Croissance annuelle 60 %
Nombre de bâtiments	135	15 527	234 540	2 940 091
Surface construite (m²)	7 695	878 544	13 270 014	167 041 983
Nombre de Voûtes Nubiennes	276	31 060	469 080	5 904 740
Bénéficiaires utilisateurs ⁽¹⁾	3 375	134 002	1 990 502	25 056 297
Population totale du Sénégal ⁽²⁾	16,1 Millions	26,6 Millions		
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions FCFA)	308	35 142	530 801	6 681 679
Coût estimatif du gros œuvre VN (Millions \$ US) (*)	0,506	58	872	10 979
Émissions évitées (tonnes CO2 eq sur 30 ans)	822	94 135	1 421 901	17 898 788
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	2 088	238 502	3 602 479	45 347 748
Émissions évitées avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	10 101	1 151 924	17 399 131	219 019 017
Énergie finale électrique non consommée (MWh ef / an)	0,0	0	0	0
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base ventilation)	46,9	5 349	80 799	1 017 098
Énergie finale électrique non consommée avec prise en compte de la « suppressed Demand » (calcul sur base climatisation)	343,6	39 229	592 533	7 458 768

(1) World Population Prospects. Nations Unies. 2013 (Medium Variant) ; (2) ratio utilisé : 0,15 bénéficiaires moyen / m² de surface utile

4. DETAIL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

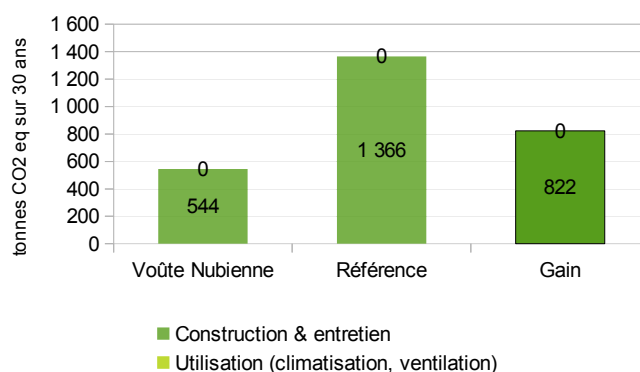
4.1. Synthèse

4.1.1. Emissions de gaz à effet de serre

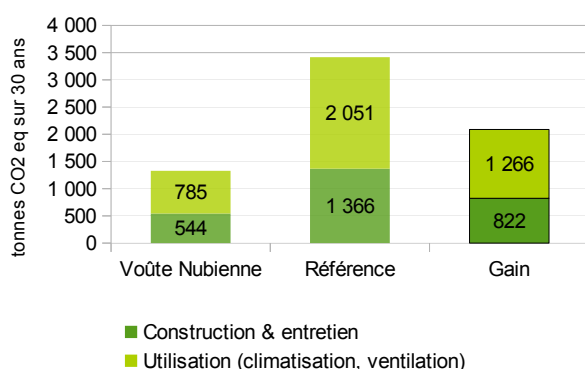
INDICATEURS	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base (tonnes CO2 eq)	544	1 366	822	-60%	100%
dont phase construction & entretien	544	1 366	822	-60%	100%
dont phase utilisation (climatisation, ventilation)	0	0	0	-	0%
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = ventilation	1 329	3 417	2 088	-61%	100%
Emissions de gaz à effet de serre sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = climatisation	3 091	13 191	10 101	-77%	100%

Emissions de gaz à effet de serre

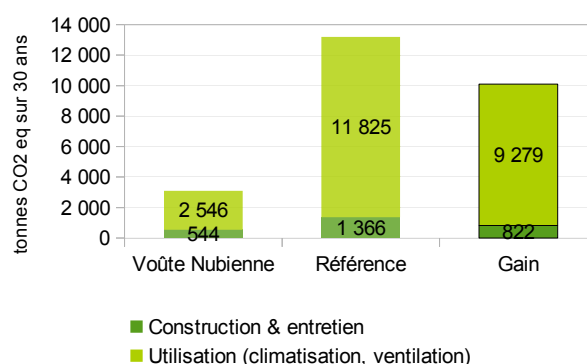
Calcul Base



Calcul Base + Suppress Demand - Ventilation



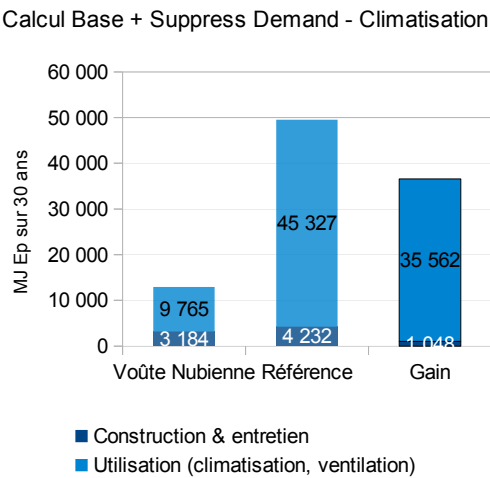
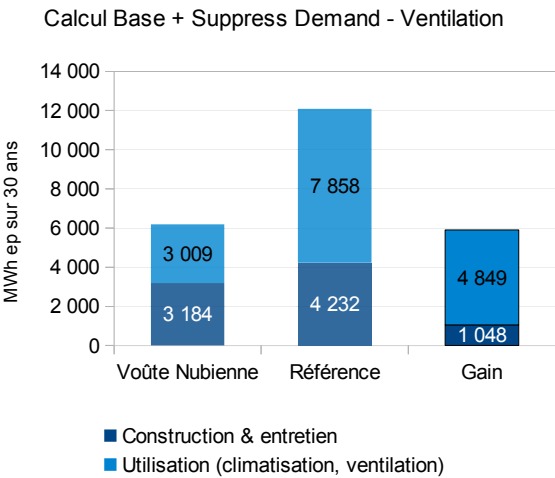
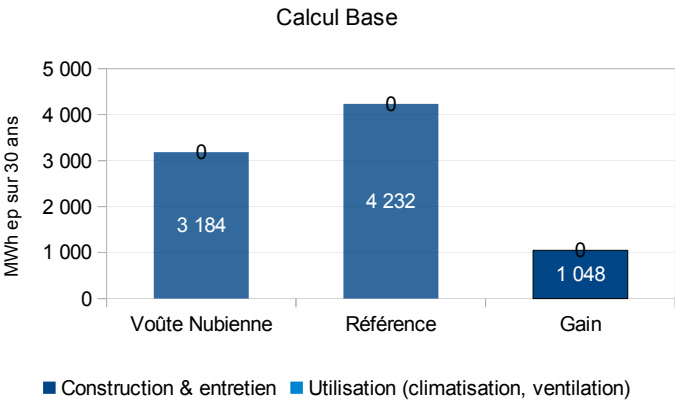
Calcul Base + Suppress Demand - Climatisation



4.1.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

INDICATEURS	VOÛTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Energie primaire non renouvelable sur 30 ans Calcul Base (MWh ep)	3 184	4 232	1 048	-25%	100%
dont phase construction & entretien	3 184	4 232	1 048	-25%	100%
dont phase utilisation (climatisation, ventilation)	0	0	0	-	0%
Energie primaire non renouvelable sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = ventilation	6 193	12 090	5 898	-49%	100%
Energie primaire non renouvelable sur 30 ans Calcul Base + Suppressed Demand Système de référence = climatisation	12 949	49 560	36 611	-74%	100%

Consommation d'énergie primaire non renouvelable



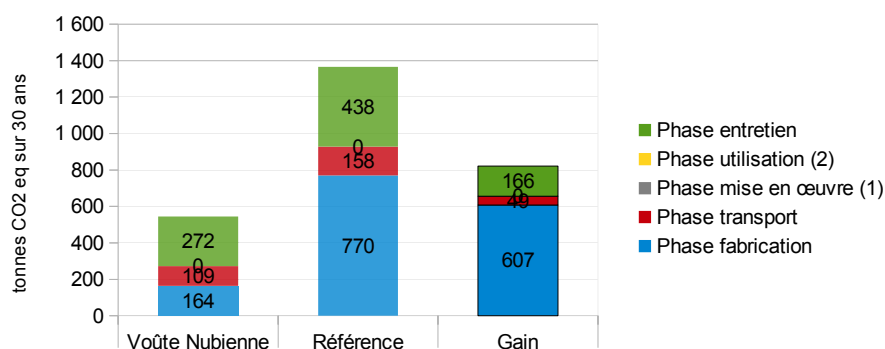
4.2. Emissions de gaz à effet de serre

4.2.1. Bilan par phase

PHASES Unité = tonnes CO2 eq sur 30 ans	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Phase fabrication	164	770	607	-79%	74%
Phase transport	109	158	49	-31%	6%
Phase mise en œuvre ⁽¹⁾	0	0	0	-	0%
Phase utilisation ⁽²⁾	0	0	0	-	0%
Phase entretien	272	438	166	-38%	20%
TOTAL	544	1 366	822	-60%	100%

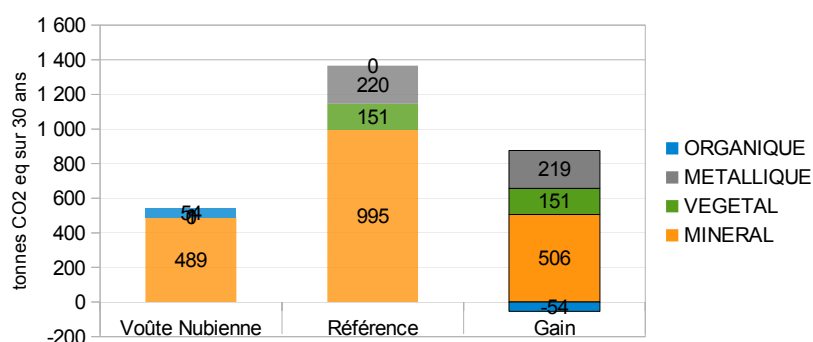
(1) Pour la phase de mise en œuvre, aucune machine utilisant une énergie thermique ou électrique n'a été considérée dans l'étude

(2) Phase utilisation : usages de rafraîchissement uniquement (climatisation, ventilation), hors usages « éclairage » et « électricité spécifique »



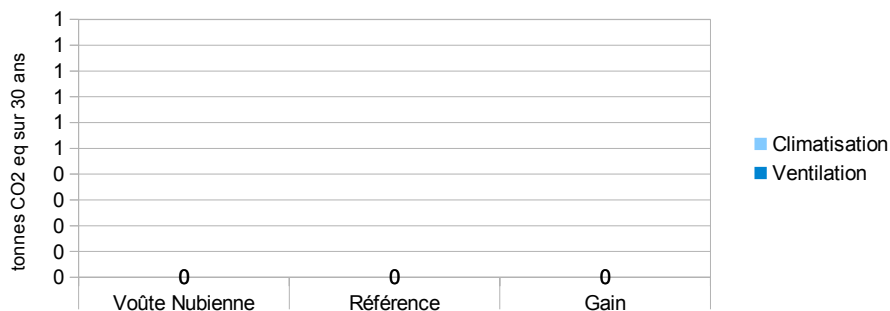
4.2.2. Bilan par matière (phases fabrication + transport + entretien)

MATIERE Unité = tonnes CO2 eq sur 30 ans	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
MINERAL	489	995	506	-51%	62%
VEGETAL	0	151	151	-100%	18%
METALLIQUE	1	220	219	-99%	27%
ORGANIQUE	54	0	-54	-	-7%
TOTAL	544	1 366	822	-60%	100%



4.2.3. Bilan phase utilisation (climatisation, ventilation)

RAFRAICHISSEMENT Unité = tonnes CO2 eq sur 30 ans	VOÛTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Ventilation	0	0	0	-	-
Climatisation	0	0	0	-	-
TOTAL	0	0	0	-	-



4.2.4. Bilan selon UNFCCC

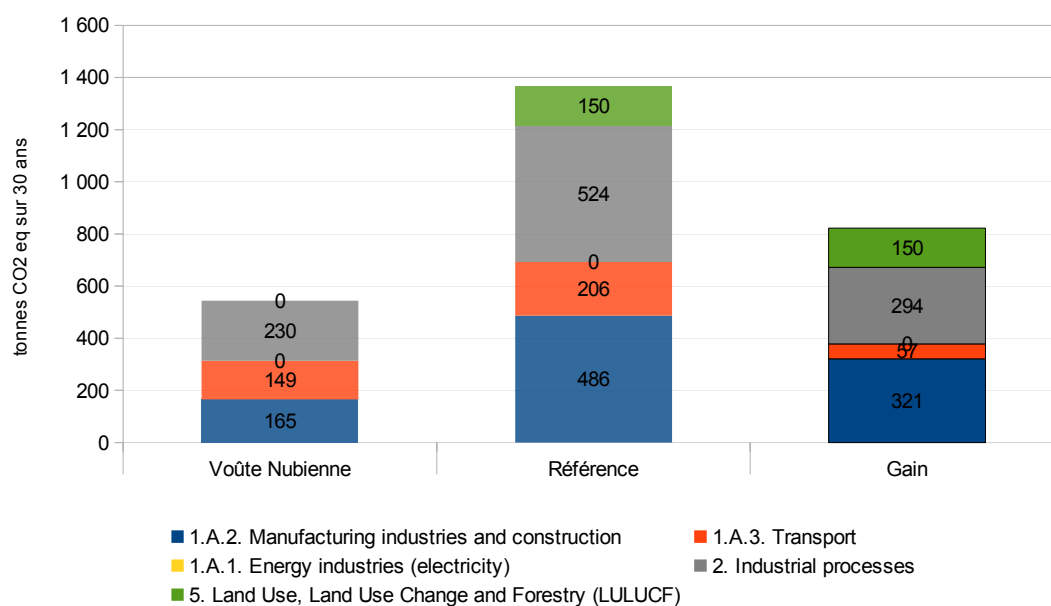
UNFCCC Unité = tonnes CO2 eq sur 30 ans	VOÛTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
1.A. Fuel combustion activities	314	692	378	-55%	46%
1.A.1. Energy industries (electricity) ⁽¹⁾	0	0	0	-	0%
1.A.2. Manufacturing industries and construction	165	486	321	-66%	39%
1.A.3. Transport	149	206	57	-28%	7%
1.A.4. Other sectors	-	-	-	-	-
1.A.5. Other	-	-	-	-	-
2. Industrial processes ⁽²⁾	230	524	294	-56%	36%
3. Solvent and other product use	-	-	-	-	-
4. Agriculture	-	-	-	-	-
5. Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)	0	150	150	-100%	18%
6. Waste	-	-	-	-	-
7. Other	-	-	-	-	-
TOTAL	544	1 366	822	-60%	100%

(1) Usages de rafraîchissement uniquement (climatisation, ventilation)

(2) Seules sont considérées ici les émissions non énergétiques de la production de ciment (émissions correspondant à la décarbonation du carbonate de calcium CaCO3) à hauteur de 75 % des émissions totales pour la production de ciment (source : Guide des Facteurs d'Emissions V.6.1, ADEME). Les éventuelles autres émissions non énergétiques liées à la production de matériaux de construction ont toutes été comptabilisées dans 1.A.2. Manufacturing industries and construction.

Emissions de gaz à effet de serre

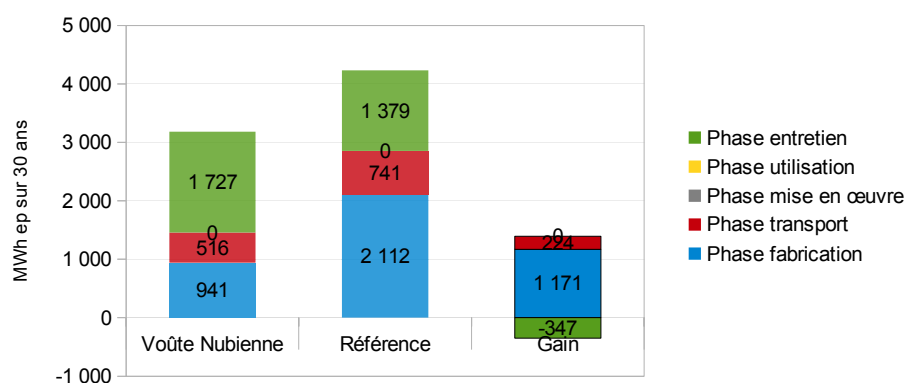
Classification selon UNFCCC



4.3. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

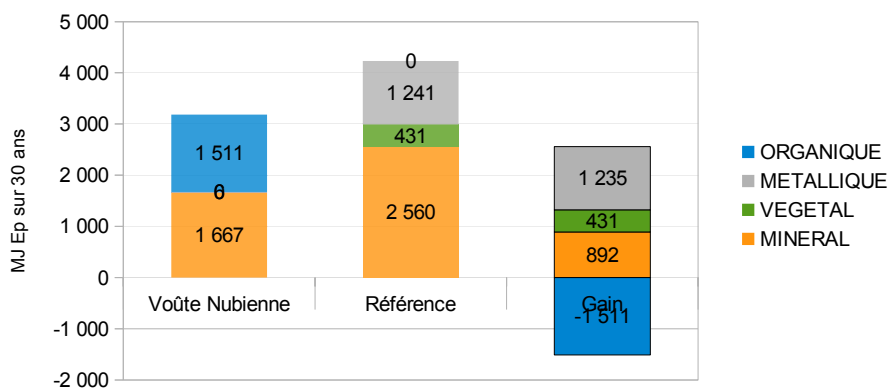
4.3.1. Bilan par phase

PHASES Unité = MWh Ep sur 30 ans	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Phase fabrication	941	2 112	1 171	-55%	142%
Phase transport	516	741	224	-30%	27%
Phase mise en œuvre	0	0	0	-	0%
Phase utilisation	0	0	0	-	0%
Phase entretien	1 727	1 379	-347	25%	-42%
TOTAL	3 184	4 232	1 048	-25%	128%



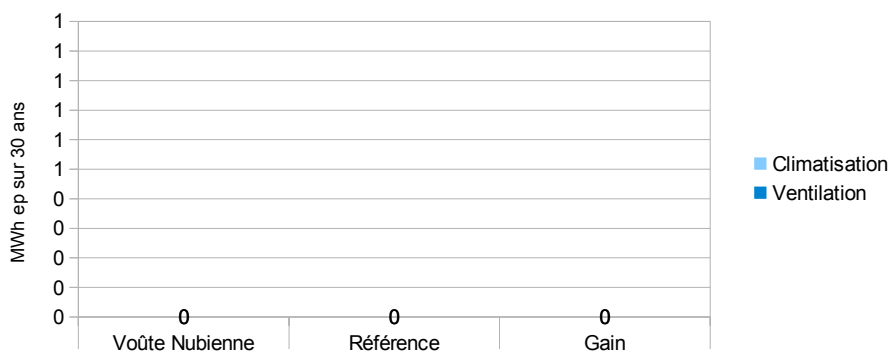
4.3.2. Bilan par matière (phases fabrication + transport + entretien)

MATIERE Unité = MWh Ep sur 30 ans	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
MINERAL	1 667	2 560	892	-35%	109%
VEGETAL	0	431	431	-100%	52%
METALLIQUE	6	1 241	1 235	-100%	150%
ORGANIQUE	1 511	0	-1 511	-	-184%
TOTAL	3 184	4 232	1 048	-25%	128%



4.3.3. Bilan phase utilisation (climatisation, ventilation)

RAFRAICHISSEMENT Unité = MWh Ep sur 30 ans	VOUTE NUBIENNE	REFERENCE	GAIN		Répartition
			(valeur)	(%)	(%)
Ventilation	0	0	0	-	-
Climatisation	0	0	0	-	-
TOTAL	0	0	0	-	-





GEF / MEDD Sénégal

ETUDE SUR LA TECHNOLOGIE VOÛTE NUBIENNE

SAISIE DES BÂTIMENTS A CONSTRUIRE DANS LE CADRE DU PROJET

SAISIE

RECAPITULATIF

#	ANNEE	REGION	USAGE	TAILLE	VN-BA ?	Nombre de bâtiments	Surface totale (m²)	Nombre de VN	Rafraîchissement ?	Détails / Remarques
01	ANNEE 1	SAINT LOUIS	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	2	170	6	NON	
02	ANNEE 2	SAINT LOUIS	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	3	255	9	NON	
03	ANNEE 3	SAINT LOUIS	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	5	425	15	NON	
04	ANNEE 4	SAINT LOUIS	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	7	595	21	NON	
05	ANNEE 1	TAMBACOUNDA	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	2	170	6	NON	
06	ANNEE 2	TAMBACOUNDA	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	3	255	9	NON	
07	ANNEE 3	TAMBACOUNDA	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	5	425	15	NON	
08	ANNEE 4	TAMBACOUNDA	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	7	595	21	NON	
09	ANNEE 1	KAFFRINE	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	2	170	6	NON	
10	ANNEE 2	KAFFRINE	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	3	255	9	NON	
11	ANNEE 3	KAFFRINE	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	5	425	15	NON	
12	ANNEE 4	KAFFRINE	AUTRES USAGES	> 50 m²	NON	7	595	21	NON	
13	ANNEE 1	SAINT LOUIS	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	3	120	5	NON	
14	ANNEE 2	SAINT LOUIS	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	5	200	7	NON	

#	ANNEE	REGION	USAGE	TAILLE	VN-BA ?	Nombre de bâtiments	Surface totale (m²)	Nombre de VN	Rafraîchissement ?	Détails / Remarques
15	ANNEE 3	SAINT LOUIS	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	8	320	12	NON	
16	ANNEE 4	SAINT LOUIS	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	12	480	17	NON	
17	ANNEE 1	TAMBACOUNDA	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	3	120	5	NON	
18	ANNEE 2	TAMBACOUNDA	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	5	200	7	NON	
19	ANNEE 3	TAMBACOUNDA	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	8	320	12	NON	
20	ANNEE 4	TAMBACOUNDA	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	12	480	17	NON	
21	ANNEE 1	KAFFRINE	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	3	120	5	NON	
22	ANNEE 2	KAFFRINE	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	5	200	7	NON	
23	ANNEE 3	KAFFRINE	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	8	320	12	NON	
24	ANNEE 4	KAFFRINE	HABITATION	Entre 20 et 50 m²	NON	12	480	17	NON	

SYNTHESE DES ECONOMIES D'EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

GEF / MEDD Sénégal

Le tableau suivant propose une synthèse des économies d'émissions de gaz à effet de serre permises par la technologie Voûte Nubienne, comparativement aux techniques constructives utilisées au Sénégal, pour la construction de bâtiments neufs, sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages (durée de vie des ouvrages = 30 ans) :

- Pour les phases "fabrication des matériaux", "transport des matériaux sur chantier", "entretien du bâti"
- Pour la phase "utilisation" : usages de rafraîchissement uniquement

Type d'usage	GAIN par rapport à l'habitat / le climat régional de référence ⁽¹⁾		CONSTRUCTION (fabrication, transport) + ENTRETIEN	Suppress Demand VENTILATION ⁽²⁾	Suppress Demand CLIMATISATION ⁽³⁾
Petite habitation < 20 m ² 1 pièce	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	100 à 170	50 à 260	270 à 2 000
		Moyenne	130	240	1 700
	Exemple : Pour 15 m ² , en tonnes CO2 eq Sur 30 ans	Min : Max	1,50 à 2,60	0,820 à 3,90	4,00 à 29,9
		Moyenne	1,9	3,8	26
Habitation moyenne Entre 20 et 50 m ² Plusieurs pièces	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	100 à 140	5 à 230	20 à 1 600
		Moyenne	120	200	1 200
	Exemple : Pour 30 m ² , en tonnes CO2 eq Sur 30 ans	Min : Max	3,10 à 4,25	0,150 à 6,86	0,570 à 47,7
		Moyenne	3,6	6,0	37
Autres usages ou Grande habitation > 50 m ² Plusieurs pièces	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	85 à 110	5 à 230	20 à 1 700
		Moyenne	96	210	1 300
	Exemple : Pour 70 m ² , en tonnes CO2 eq Sur 30 ans	Min : Max	6,00 à 7,80	0,350 à 16,2	1,33 à 117
		Moyenne	6,7	15	93
Technique Voûte Nubienne – Béton Armé (VN-BA)	En kg CO2 eq / m ² Sur 30 ans	Min : Max	50 à 80	5 à 230	20 à 1 700
		Moyenne	63	210	1 300
	Exemple : Pour 70 m ² , en tonnes CO2 eq Sur 30 ans	Min : Max	3,7 à 5,4	0,350 à 16,2	1,33 à 117
		Moyenne	4,4	15	93

(1) Habitat de référence = répartition régionale des constructions neuves par typologie des murs (ciment, banco, paille) et toitures (béton, zinc, paille), calculs du consultant d'après données ANSD 2002 et 2013

Climat de référence = données climatiques d'après ASHRAE pour Dakar, Diourbel, Kaolack, Linguere, Matam, Podor, Tambacounda, Ziguinchor

(2) Suppress Demand VENTILATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour ventiler les bâtiments lorsque la température intérieure se trouve en dehors de la plage de confort comprise entre 20°C et 32°C, par un système de ventilation type ventilateur sur pied ou ventilateur plafonnier (puissance max = 100 W pour 25 m², modulation de puissance (vitesse) en fonction de la température intérieure ; mis de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

(3) Suppress Demand CLIMATISATION = émissions de gaz à effet de serre requises pour maintenir les bâtiments dans une plage de confort comprise entre 20°C et 32°C par un système de climatisation type SPLIT sur réseau électrique (COP = 2 ; mix de production d'électricité sénégalais). Résultats issus de simulations thermiques dynamiques menées par le consultant (logiciel : Energy Plus). Non compris en compte : augmentation prévisible des températures due au changement climatique.

REPARTITION DES CONSTRUCTIONS NEUVES SELON LA NATURE DES MURS ET DES TOITURES Modèle d'usage : petite habitation

#	REGION	PETITE HABITATION					
		CIMENT-ZINC	BANCO-PAILLE	BANCO-ZINC	PAILLE-PAILLE	CIMENT-BETON	CIMENT-PAILLE
09	DAKAR	100%	0%	0%	0%	0%	0%
10	DIOURBEL	93%	0%	0%	7%	0%	0%
11	FATICK	88%	0%	6%	0%	0%	6%
12	KAFFRINE	58%	3%	14%	3%	0%	22%
13	KAOLACK	85%	1%	7%	0%	0%	7%
14	KEDOUGOU	49%	5%	7%	0%	0%	38%
15	KOLDA	72%	1%	4%	0%	0%	22%
16	LOUGA	92%	0%	0%	8%	0%	0%
17	MATAM	60%	0%	30%	5%	0%	5%
18	SAINT LOUIS	78%	0%	11%	6%	0%	6%
19	SEDHIOU	89%	0%	6%	0%	0%	6%
20	TAMBACOUNDA	52%	6%	9%	0%	0%	33%
21	THIES	88%	0%	0%	0%	0%	13%
22	ZIGUINCHOR	82%	1%	12%	0%	0%	5%
23	SENEGAL	73%	0%	9%	5%	0%	14%
24	SENEGAL HORS DAKAR	79%	0%	7%	3%	0%	10%

Source : calculs du consultant, sur la base des études suivantes :

- Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage, rapport définitif RGPHAE 2013. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2014

- Résultats définitifs du troisième recensement général de la population et de l'habitat, rapport national de présentation (2008). Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2008

REPARTITION DES CONSTRUCTIONS NEUVES SELON LA NATURE DES MURS ET DES TOITURES Modèle d'usage : habitation moyenne

#	REGION	HABITATION MOYENNE					
		CIMENT-ZINC	BANCO-PAILLE	BANCO-ZINC	PAILLE-PAILLE	CIMENT-BETON	CIMENT-PAILLE
09	DAKAR	5%	0%	0%	0%	95%	0%
10	DIOURBEL	65%	0%	0%	5%	30%	0%
11	FATICK	70%	0%	5%	0%	20%	5%
12	KAFFRINE	52%	2%	13%	3%	10%	20%
13	KAOLACK	55%	0%	5%	0%	35%	5%
14	KEDOUGOU	39%	4%	6%	0%	20%	31%
15	KOLDA	61%	1%	4%	0%	15%	19%
16	LOUGA	60%	0%	0%	5%	35%	0%
17	MATAM	30%	0%	15%	3%	50%	3%
18	SAINT LOUIS	35%	0%	5%	3%	55%	3%
19	SEDHIOU	75%	0%	5%	0%	15%	5%
20	TAMBACOUNDA	34%	4%	6%	0%	35%	21%
21	THIES	35%	0%	0%	0%	60%	5%
22	ZIGUINCHOR	66%	1%	9%	0%	20%	4%
23	SENEGAL	40%	0%	5%	3%	45%	8%
24	SENEGAL HORS DAKAR	57%	0%	5%	3%	28%	8%

Source : calculs du consultant, sur la base des études suivantes :

- Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage, rapport définitif RGPHAE 2013. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2014

- Résultats définitifs du troisième recensement général de la population et de l'habitat, rapport national de présentation (2008). Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2008

REPARTITION DES CONSTRUCTIONS NEUVES SELON LA NATURE DES MURS ET DES TOITURES

Modèle d'usage : autres usages

#	REGION	AUTRES USAGES	
		CIMENT-BAC ACIER	CIMENT-BETON
09	DAKAR	5%	95%
10	DIOURBEL	65%	35%
11	FATICK	80%	20%
12	KAFFRINE	80%	20%
13	KAOLACK	75%	25%
14	KEDOUGOU	70%	30%
15	KOLDA	80%	20%
16	LOUGA	65%	35%
17	MATAM	45%	55%
18	SAINT LOUIS	45%	55%
19	SEDHIOU	80%	20%
20	TAMBACOUNDA	55%	45%
21	THIES	40%	60%
22	ZIGUINCHOR	80%	20%
23	SENEGAL	50%	50%
24	SENEGAL HORS DAKAR	70%	30%

Source : calculs du consultant, sur la base des études suivantes :

- Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage, rapport définitif RGPHAE 2013. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2014

- Résultats définitifs du troisième recensement général de la population et de l'habitat, rapport national de présentation (2008). Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Sénégal, 2008



5. Étude environnementale des modèles d'usage de bâtiments

1. DEFINITION DU MODELE D'USAGE ET DE SES VARIANTES

1.1. Hypothèses de calcul

MODELE D'USAGE :	Bâtiment d'habitation	Durée de vie de l'ouvrage :	30 ans
BASE DE DONNEES :	Données physiques matériaux :	OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, <i>L'isolation Thermique Ecologique</i> , Editions Terre Vivante, 2010	
	Données environnementales matériaux et systèmes :	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, <i>IBO Richtwerte-Tabelle</i> , 2013, Disponible sur : www.ibo.at/	
PERIMETRE DE L'ETUDE :	Phases considérées : phase fabrication, transport, mise en œuvre, utilisation, entretien Phase non considérée : fin de vie		
	Eléments considérés : gros œuvre et enduits de finition, excepté les planchers bas Eléments non considérés : portes, fenêtres, second œuvre		

1.2. Définition des variantes

VARIANTES	SURFACE INTERIEURE	DESCRIPTIF
VOUTE NUBIENNE	13,0 m ² 1 pièce	- Fondations pierres + mortier de terre, mur de soubassement briques de banco - Murs et toiture en Voûte Nubienne - <u>cas 1</u> : Enduits goudron murs extérieurs et terrasse, enduits terre voûte intérieure, enduit ciment murs intérieurs (50 % des cas) - <u>cas 2</u> : Enduits ciments murs extérieurs, enduits goudron terrasse, enduits terre voûte intérieure, enduit ciment murs intérieurs (50 % des cas) - 2 gouttières métalliques
CIMENT – ZINC	16,0 m ² 1 pièce	- Fondations ciment + mur de soubassement plots de ciment - Murs en plots de ciment, chainages BA horizontal + vertical (4 angles), - toiture en tôles ondulées acier-zinc sur charpente en bois d'importation - Enduits ciments, intérieur et extérieur
BANCO – PAILLE	12,6 m ² 1 pièce	- Mur de soubassement banco - Murs en banco, - toiture en paille sur charpente en bois de brousse - Enduits ciment, intérieur et extérieur
BANCO – ZINC	15,5 m ² 1 pièce	- Mur de soubassement banco - Murs en banco, - toiture en tôles ondulées acier-zinc sur charpente en bois de brousse - Enduits ciment, intérieur et extérieur
PAILLE – PAILLE	12,6 m ² 1 pièce	- Murs en paille sur ossature en bois de brousse, - toiture en paille sur charpente en bois de brousse - Aucun enduit

Le calcul des quantitatifs de matériaux nécessaires pour la construction des différentes variantes est basée sur les bâtiments suivants, situés dans le village de Ngueye Gueye, commune de Bambey, département de Bambey, région de Diourbel. Afin de permettre une représentativité sur l'ensemble du Sénégal, certaines adaptations ont été apportées.



Voûte Nubienne



Ciment – Zinc



Banco – paille



Banco – zinc



Banco – paille

1.3. Durée de vie des composants et besoins de remplacements

COMPOSANTS	DUREE DE VIE ESTIMEE	NOMBRE DE REMPLACEMENTS SUR LA DUREE DE VIE
Enduits extérieurs (goudron, ciment)	15 ans	2
Enduits intérieurs (ciment, terre)	20 ans	1
Couverture en tôle ondulée acier-zinc	15 ans	2
Charpente en bois pour couverture acier-zinc	15 ans	2
Couverture en paille et murs en paille	5 ans	6
Charpente en bois pour couverture en paille	10 ans	3
Ossature bois pour murs en paille	10 ans	3

1.4. Transport des matériaux du site de production vers le chantier de construction

MATERIAUX	LIEU DE PRODUCTION / EXTRACTION	DISTANCE RETENUE	MODE DE TRANSPORT
Terre crue	site d'extraction à proximité directe du chantier de construction	10 km	Camion
Goudron, pétrole, huile	Achat à proximité du chantier	30 km	Camion
Sable, granulats	carrière à proximité du chantier	30 km	Camion
Ciment	Sites de production au Sénégal	500 km	Camion
Ferraillage à béton Tôle ondulée acier-zinc IPN acier	Importation de la matière première depuis l'étranger (Chine), transformation à Dakar, transport intérieur jusqu'au lieu de revente à proximité du chantier, transport du lieu de revente vers le lieu du chantier	500 km	Camion
		13 000 km	Cargo
Bois d'importation	Sites forestiers au Sud du Sénégal ou dans la sous région	500 km	Camion
Bois de brousse	prélèvements à proximité directe du chantier	10 km	Charette à traction animale

2. BILAN PAR PHASE

2.1. Emissions de gaz à effet de serre

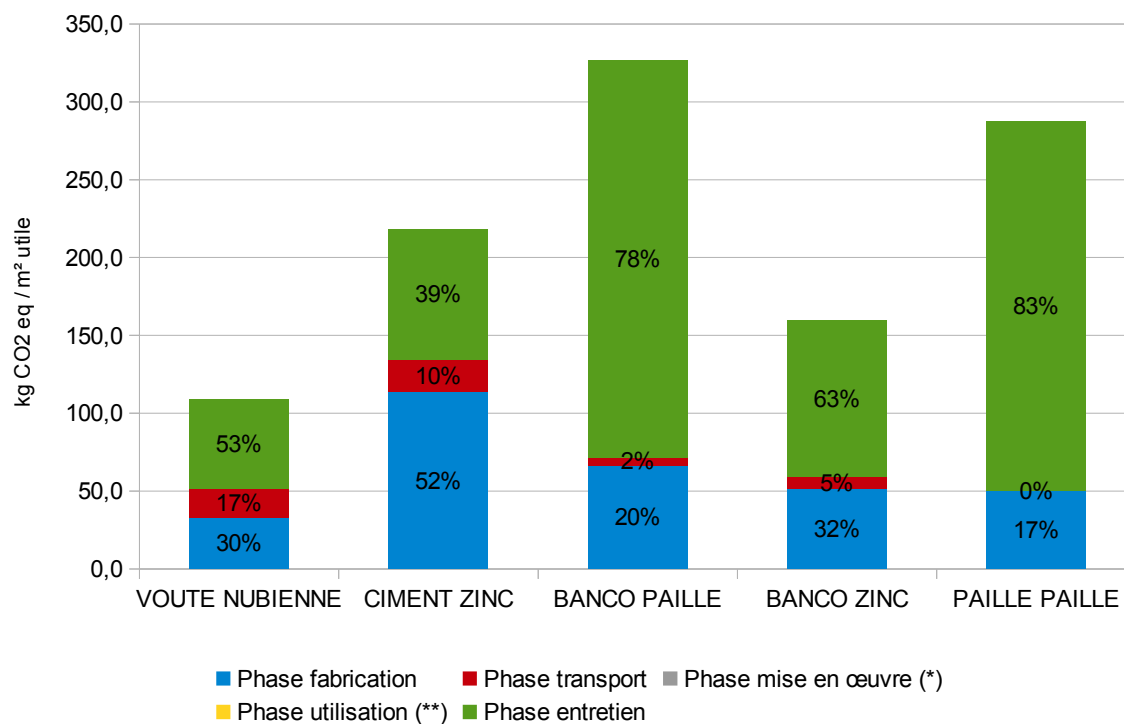
Unité : kg CO2 eq	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	1 413	3 498	4 118	2 473	3 629
TOTAL / m², dont :	109	219	327	160	288
Phase fabrication	33,1	113,5	66,4	51,3	50,0
Phase transport	18,2	20,9	5,2	7,7	0,3
Phase mise en œuvre (*)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase utilisation (**)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase entretien	57,4	84,2	255,1	100,7	237,7
Différence / VN	0 0%	110 101%	218 201%	51 47%	179 165%

(*) Aucune machine utilisant une énergie thermique ou électrique n'a été considéré dans l'étude

(**) Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



2.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

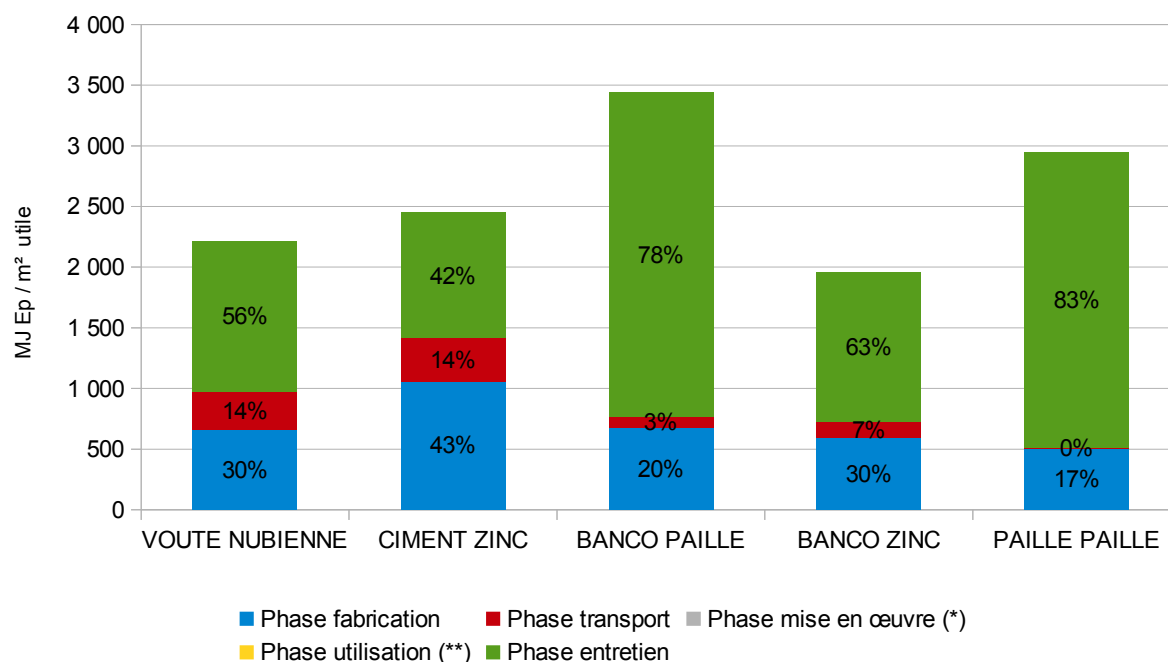
Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	28 822	39 169	43 307	30 297	37 152
TOTAL / m²	2 217	2 448	3 436	1 957	2 948
Phase fabrication	662	1 061	677	593	505
Phase transport	310	354	89	130	5
Phase mise en œuvre (*)	0	0	0	0	0
Phase utilisation (**)	0	0	0	0	0
Phase entretien	1 245	1 033	2 670	1 234	2 437
Différence / VN	0 0%	231 10%	1219 55%	-260 -12%	731 33%
TOTAL en kWh / m²	616	680	955	544	819

(*) Aucune machine utilisant une énergie thermique ou électrique n'a été considéré dans l'étude

(**) Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



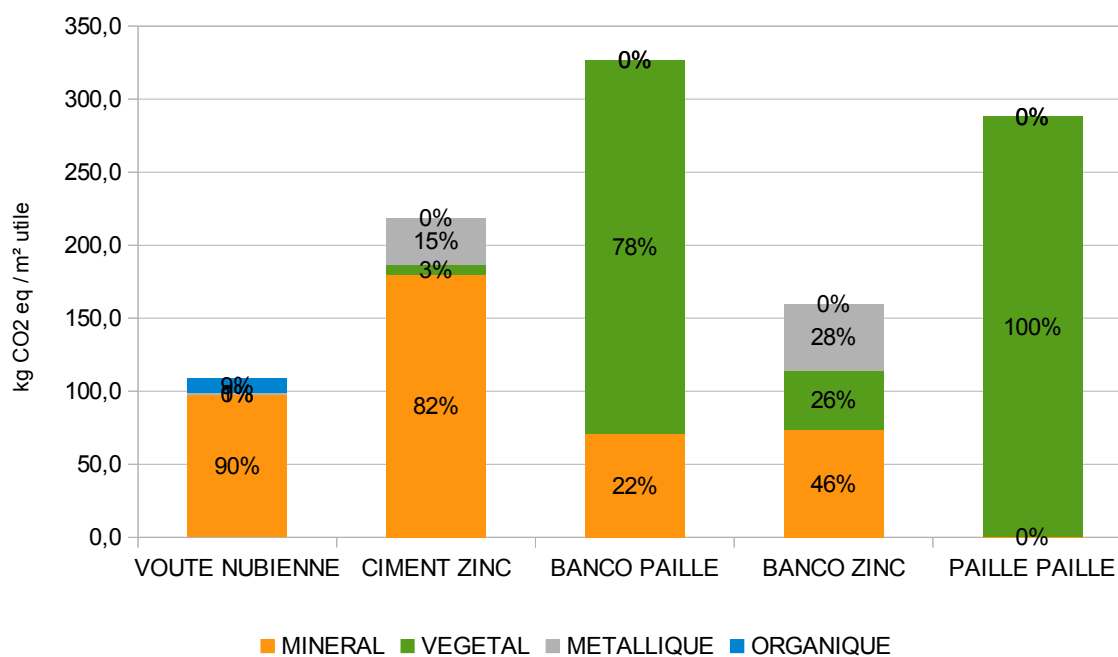
3. BILAN PAR MATIERE

3.1. Emissions de gaz à effet de serre

Unité : kg CO2eq	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	1 413	3 498	4 118	2 473	3 629
TOTAL / m², dont :	109	219	327	160	288
MINERAL	97,9	179,4	71,0	73,5	0,2
VEGETAL	0,0	7,3	255,8	40,8	287,7
METALLIQUE	1,0	31,9	0,0	45,3	0,0
ORGANIQUE	9,9	0,0	0,0	0,0	0,0

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans

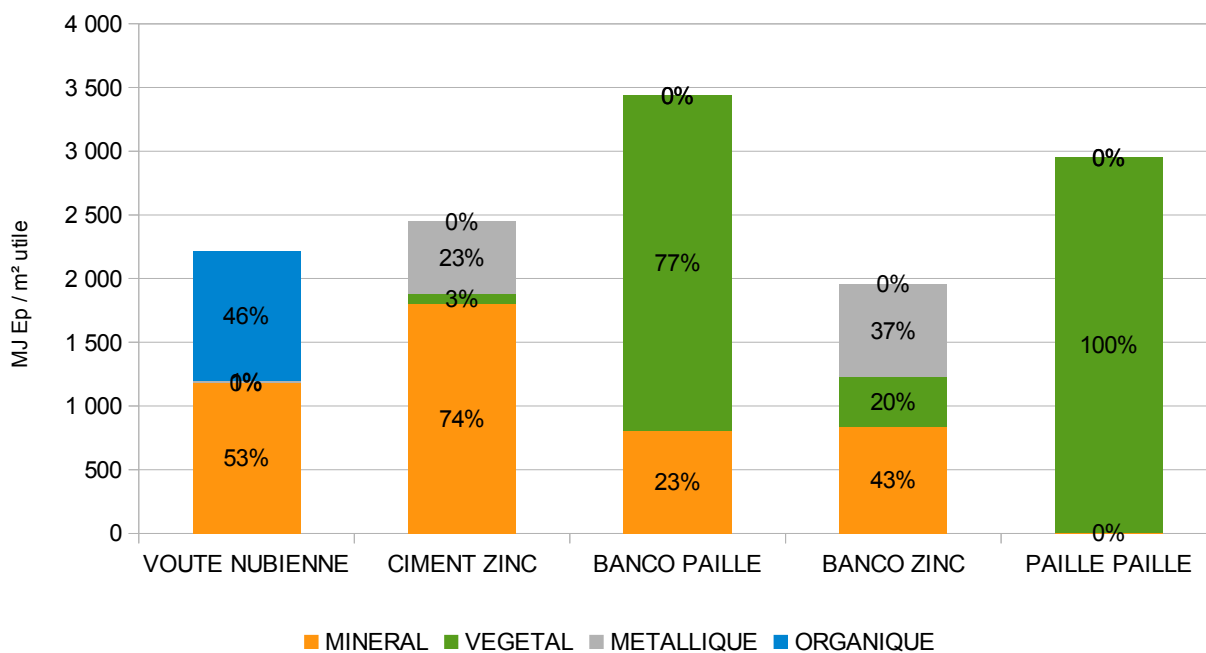


3.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	28 822	39 169	43 307	30 297	37 152
TOTAL / m², dont :	2217	2448	3436	1957	2948
MINERAL	1 181	1 802	805	837	4
VEGETAL	0	77	2 632	394	2 944
METALLIQUE	15	570	0	726	0
ORGANIQUE	1 021	0	0	0	0

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



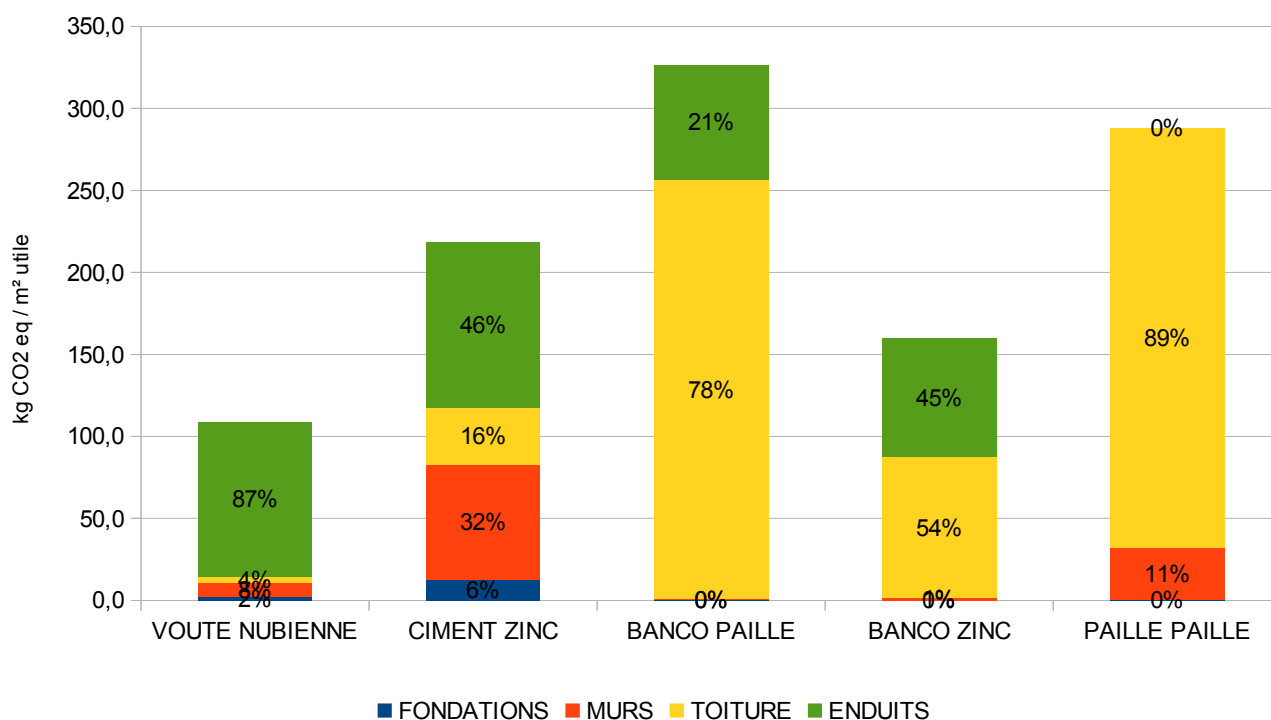
4. BILAN PAR PAROI

4.1. Emissions de gaz à effet de serre

Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	1 413	3 498	4 118	2 473	3 629
TOTAL / m², dont :	109	219	327	160	288
FONDATIONS	2,1	12,7	0,2	0,2	0,2
MURS	8,5	70,2	0,6	1,3	31,9
TOITURE	4,0	34,8	255,8	86,2	255,8
ENDUITS	94,2	100,9	70,2	72,1	0,0

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans

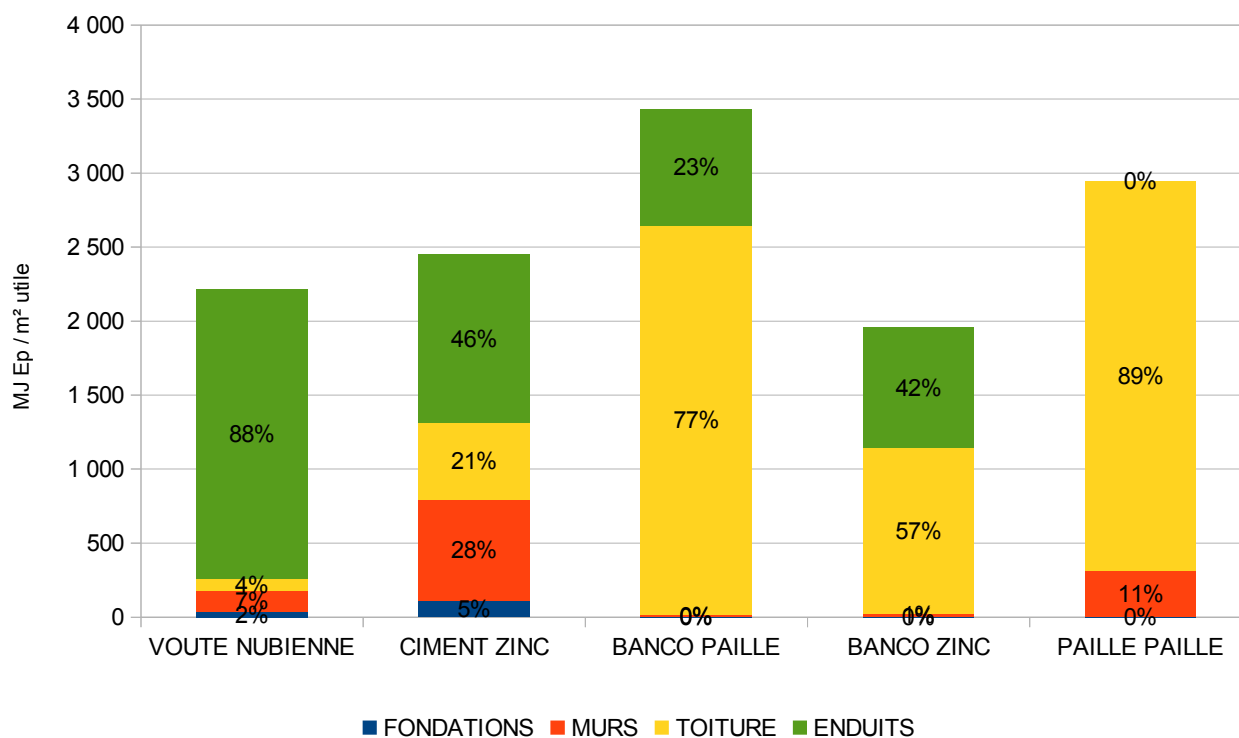


4.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	28 822	39 169	43 307	30 297	37 152
TOTAL / m², dont :	2217	2448	3436	1957	2948
FONDATIONS	35	112	4	3	4
MURS	144	681	10	21	313
TOITURE	78	517	2 632	1 120	2 632
ENDUITS	1 959	1 137	791	813	0

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



5. BILAN DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE SELON UNFCCC

La répartition des émissions selon UNFCCC données dans l'inventaire ci-dessous sont des estimations permettant d'aboutir à des tendances.

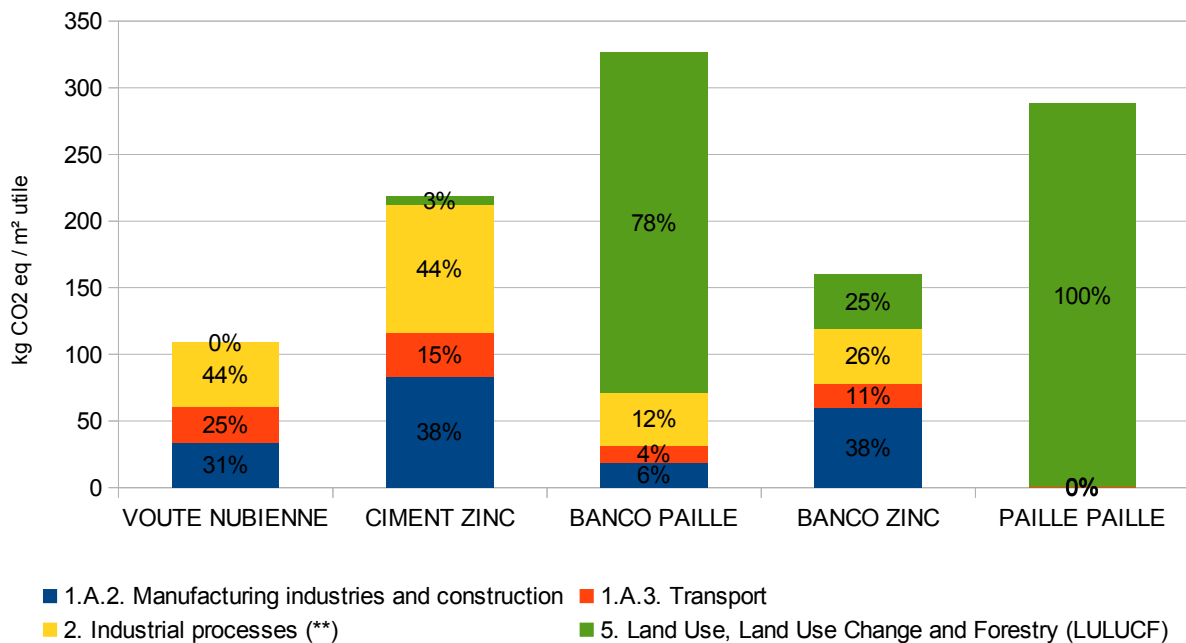
Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
TOTAL / bâtiment	1 413	3 498	4 118	2 473	3 629
TOTAL / m², dont :	109	219	327	160	288
1.A. Fuel combustion activities (*)	61	116	31	78	1
1.A.2. Manufacturing industries and construction	34	84	19	60	0
1.A.3. Transport	27	33	12	18	1
2. Industrial processes (**)	48	96	40	41	0
5. Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)	0	7	256	41	287

(*) Hors phase utilisation pour le rafraîchissement : Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

(**) Seules sont considérées ici les émissions non énergétiques de la production de ciment (émissions correspondant à la décarbonation du carbonate de calcium CaCO₃) à hauteur de 75 % des émissions totales pour la production de ciment (source : Guide des Facteurs d'Emissions V.6.1, ADEME). Les éventuelles autres émissions non énergétiques liées à la production de matériaux de construction ont toutes été comptabilisées dans 1.A.2. Manufacturing industries and construction.

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



6. PRISE EN COMPTE DE LA COMPACITE DU BATIMENT

La prise en compte de la compacité des bâtiments dans le calcul des quantitatifs de matériaux aboutit aux valeurs tabulées suivantes, exprimées par m² de surface utile :

Unité : kg CO2 eq / m ²	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
Petite habitation < 20 m ² 1 pièce	109	219	327	160	288
Habitation moyenne Entre 20 et 50 m ² Plusieurs pièces	75	166	265	128	238

Unité : MJ Ep / m ²	VOUTE NUBIENNE	CIMENT ZINC	BANCO PAILLE	BANCO ZINC	PAILLE PAILLE
Petite habitation < 20 m ² 1 pièce	2 217	2 448	3 436	1 957	2 948
Habitation moyenne Entre 20 et 50 m ² Plusieurs pièces	1 609	1 887	2 793	1 591	2 447

1. DEFINITION DU MODELE D'USAGE ET DE SES VARIANTES

1.1. Hypothèses de calcul

MODELE D'USAGE :	Autres usages (éducation, santé, hébergement, tertiaire, agricole,...)	Durée de vie de l'ouvrage :	30 ans
BASE DE DONNEES :	Données physiques matériaux :	OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, <i>L'isolation Thermique Ecologique</i> , Editions Terre Vivante, 2010	
	Données environnementales matériaux et systèmes :	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, <i>IBO Richtwerte-Tabelle</i> , 2013, Disponible sur : www.ibo.at/	
PERIMETRE DE L'ETUDE :	Phases considérées : phase fabrication, transport, mise en œuvre, utilisation, entretien Phase non considérée : fin de vie		
	Eléments considérés : gros œuvre et enduits de finition, excepté les planchers bas Eléments non considérés : portes, fenêtres, second œuvre		

1.2. Définition des variantes

VARIANTES	SURFACE INTERIEURE	DESCRIPTIF
VOUTE NUBIENNE	68,3 m ²	- Fondations pierres + mortier de terre, mur de soubassement briques de banco - Murs et toiture en Voûte Nubienne (3 VN accolées) - Enduits goudron ou ciment murs extérieurs, enduits goudron terrasse, enduits terre voûte intérieure, enduits ciment murs intérieurs - 4 gouttières métalliques
VOUTE NUBIENNE + BETON ARME	68,3 m ²	- Murs et toiture en Voûte Nubienne (3 VN accolées) - 2 systèmes poteaux-poutres béton armé pour reprise des VN intérieures - Enduits goudron ou ciment murs extérieurs, enduits goudron terrasse, enduits terre voûte intérieure, enduits ciment murs intérieurs - 4 gouttières métalliques
CIMENT + BAC ACIER	63 m ²	- Fondations ciment + chaînage BA bas - Murs en plots de ciment, chaînages BA horizontal + chaînage verticaux - toiture bac acier sur IPN - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment
CIMENT + DALLE BETON	63 m ²	- Fondations ciment + chaînage BA bas - Murs en plots de ciment, chaînages BA horizontal + chaînage verticaux - Toiture hourdis béton : poutres BA, poutrelles BA, entrevous plots de ciment, dalle de compression - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment

Le calcul des quantitatifs de matériaux nécessaires pour la construction des différentes variantes est basée sur les salles de classes suivantes, situées dans le village de Kodith, commune de Guede Village, département de Podor, région de Saint Louis. Afin de permettre une représentativité sur l'ensemble du Sénégal, certaines adaptations ont été apportées.



1.3. Durée de vie des composants et besoins de remplacements

COMPOSANTS	DUREE DE VIE ESTIMEE	NOMBRE DE REMPLACEMENTS SUR LA DUREE DE VIE
Enduits extérieurs (goudron, ciment)	15 ans	2
Enduits intérieurs (ciment, terre)	20 ans	1
Couverture en tôle ondulée bac acier	30 ans	0

1.4. Transport des matériaux du site de production vers le chantier de construction

MATERIAUX	LIEU DE PRODUCTION / EXTRACTION	DISTANCE RETENUE	MODE DE TRANSPORT
Terre crue	site d'extraction à proximité directe du chantier de construction	10 km	Camion
Goudron, pétrole, huile pétrole	Achat à proximité du chantier	30 km	Camion
Sable, granulats	carrière à proximité du chantier	30 km	Camion
Ciment	Sites de production au Sénégal	500 km	Camion
Ferraillage à béton Tôle ondulée acier-zinc IPN acier	Importation de la matière première depuis l'étranger (Chine), transformation à Dakar, transport intérieur jusqu'au lieu de revente à proximité du chantier, transport du lieu de revente vers le lieu du chantier	500 km	Camion
		13 000 km	Cargo
Bois d'importation	Sites forestiers au Sud du Sénégal ou dans la sous région	500 km	Camion
Bois de brousse	prélèvements à proximité directe du chantier	10 km	Charette à traction animale

2. BILAN PAR PHASE

2.1. Emissions de gaz à effet de serre

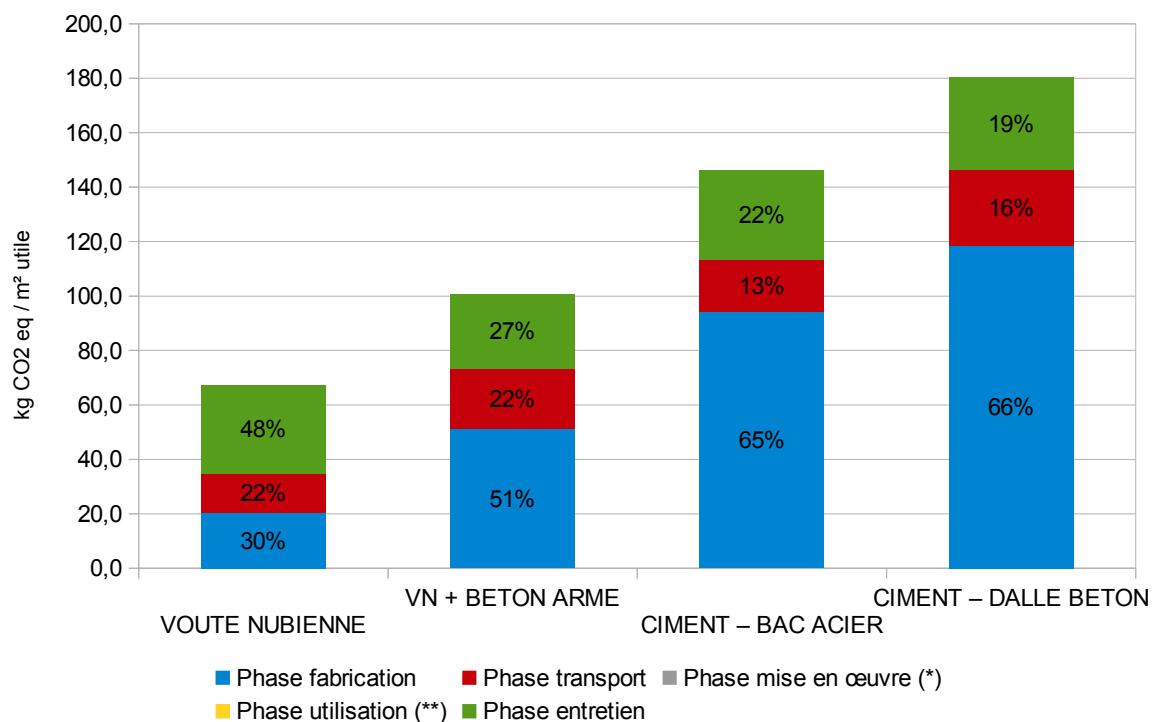
Unité : kg CO2 eq	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	4 585	6 874	9 207	11 362
TOTAL / m², dont :	67	101	146	180
Phase fabrication	20,3	51,3	94,3	118,4
Phase transport	14,6	22,0	19,0	28,1
Phase mise en œuvre (*)	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase utilisation (**)	0,0	0,0	0,0	0,0
Phase entretien	32,2	27,3	32,9	33,9
Différence / VN	0 0%	34 50%	79 118%	113 168%

(*) Aucune machine utilisant une énergie thermique ou électrique n'a été considéré dans l'étude

(**) Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



2.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

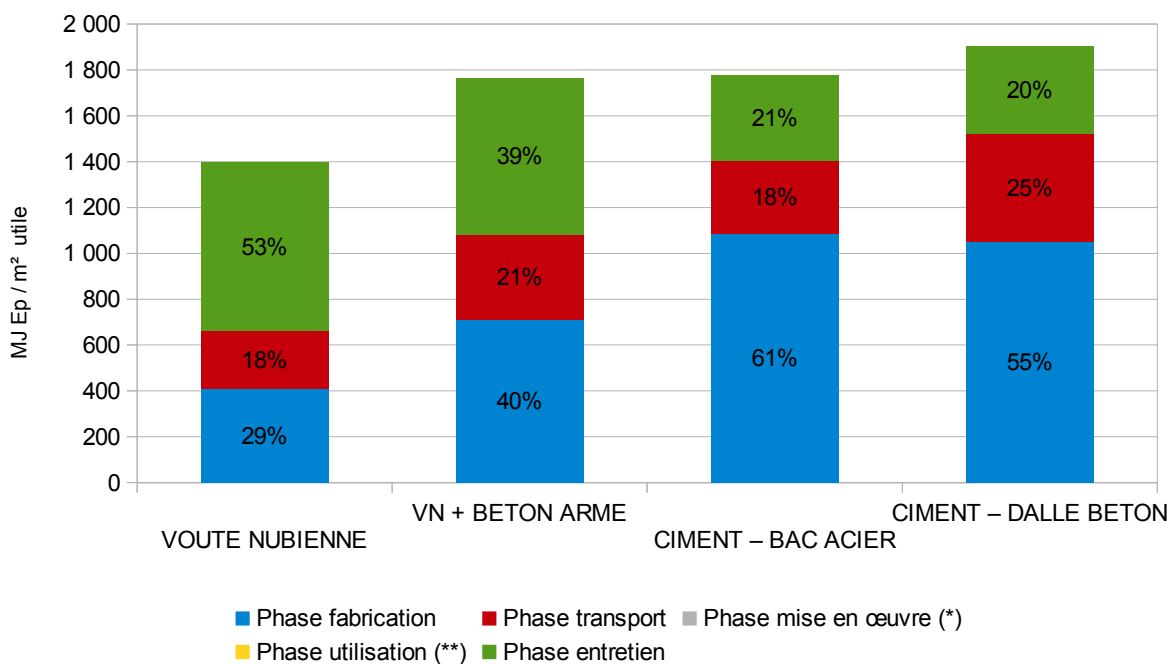
Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	95 335	120 447	111 822	119 993
TOTAL / m²	1 397	1 765	1 775	1 905
Phase fabrication	411	710	1 087	1 048
Phase transport	250	373	317	475
Phase mise en œuvre (*)	0	0	0	0
Phase utilisation (**)	0	0	0	0
Phase entretien	736	681	371	382
Différence / VN	0 0%	368 26%	378 27%	508 36%
TOTAL en kWh / m²	388	490	493	529

(*) Aucune machine utilisant une énergie thermique ou électrique n'a été considéré dans l'étude

(**) Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



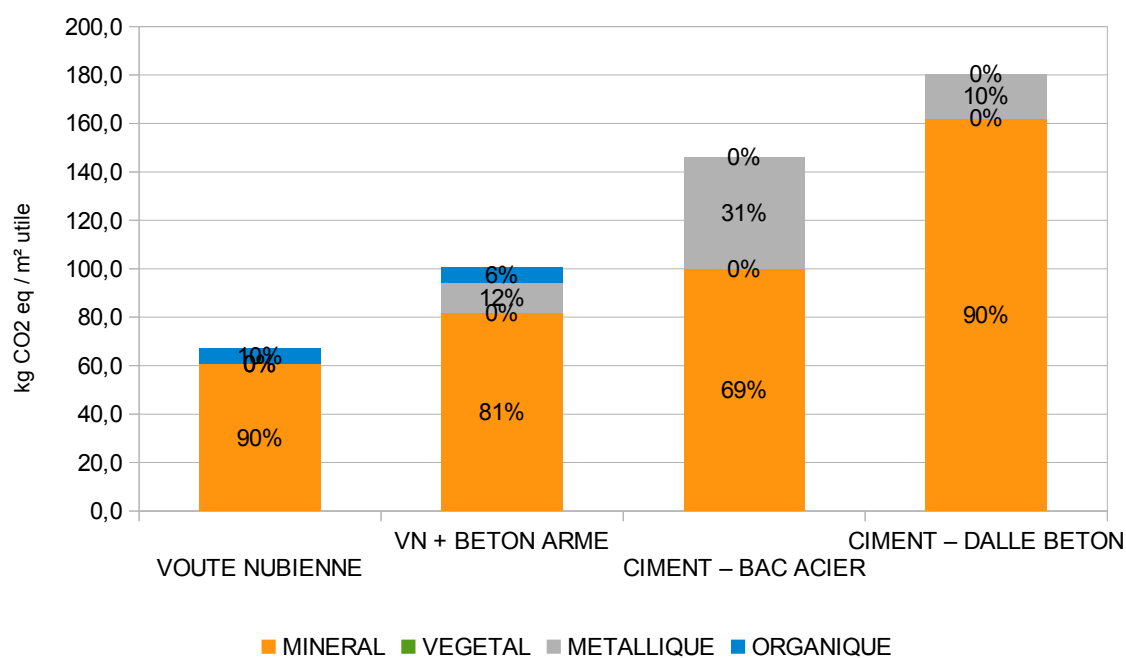
3. BILAN PAR MATIERE

3.1. Emissions de gaz à effet de serre

Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	4 585	6 874	9 207	11 362
TOTAL / m², dont :	67	101	146	180
MINERAL	60,7	81,8	100,1	162,1
VEGETAL	0,0	0,0	0,0	0,0
METALLIQUE	0,0	12,4	46,0	18,3
ORGANIQUE	6,5	6,5	0,0	0,0

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans

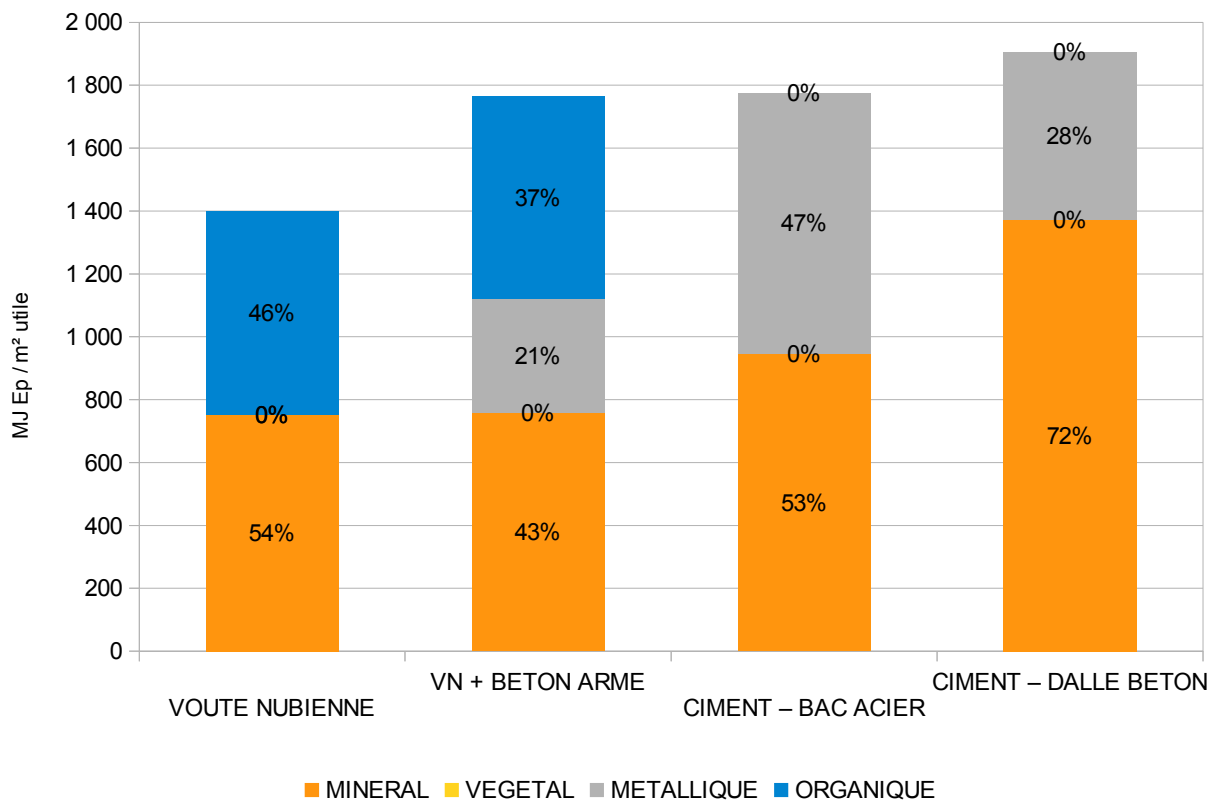


3.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	95 335	120 447	111 822	119 993
TOTAL / m², dont :	1 397	1 765	1 775	1 905
MINERAL	751	757	947	1 371
VEGETAL	0	0	0	0
METALLIQUE	0	362	828	533
ORGANIQUE	646	646	0	0

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



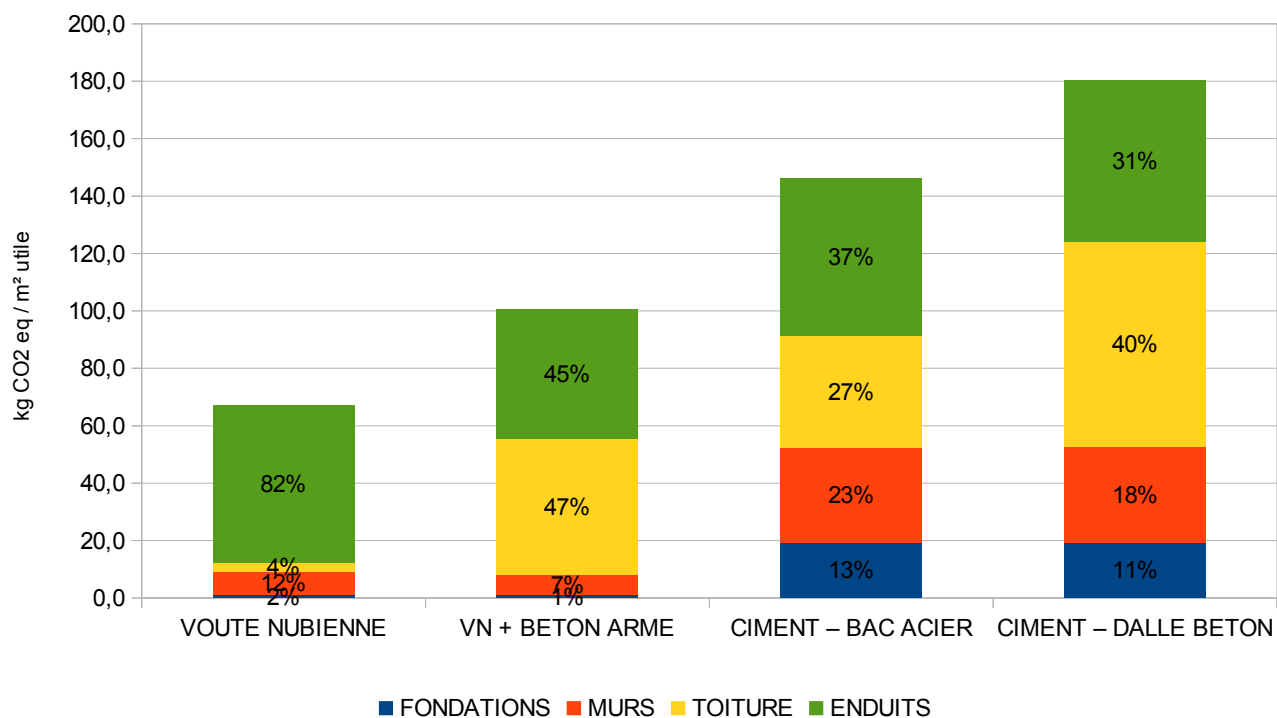
4. BILAN PAR PAROI

4.1. Emissions de gaz à effet de serre

Unité : kg CO2eq	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	4 585	6 874	9 207	11 362
TOTAL / m², dont :	67	101	146	180
FONDATIONS	1,1	1,1	19,2	19,2
MURS	8,1	7,0	33,1	33,3
TOITURE	3,0	47,4	39,0	71,6
ENDUITS	55,0	45,2	54,8	56,2

Emissions de gaz à effet de serre

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans

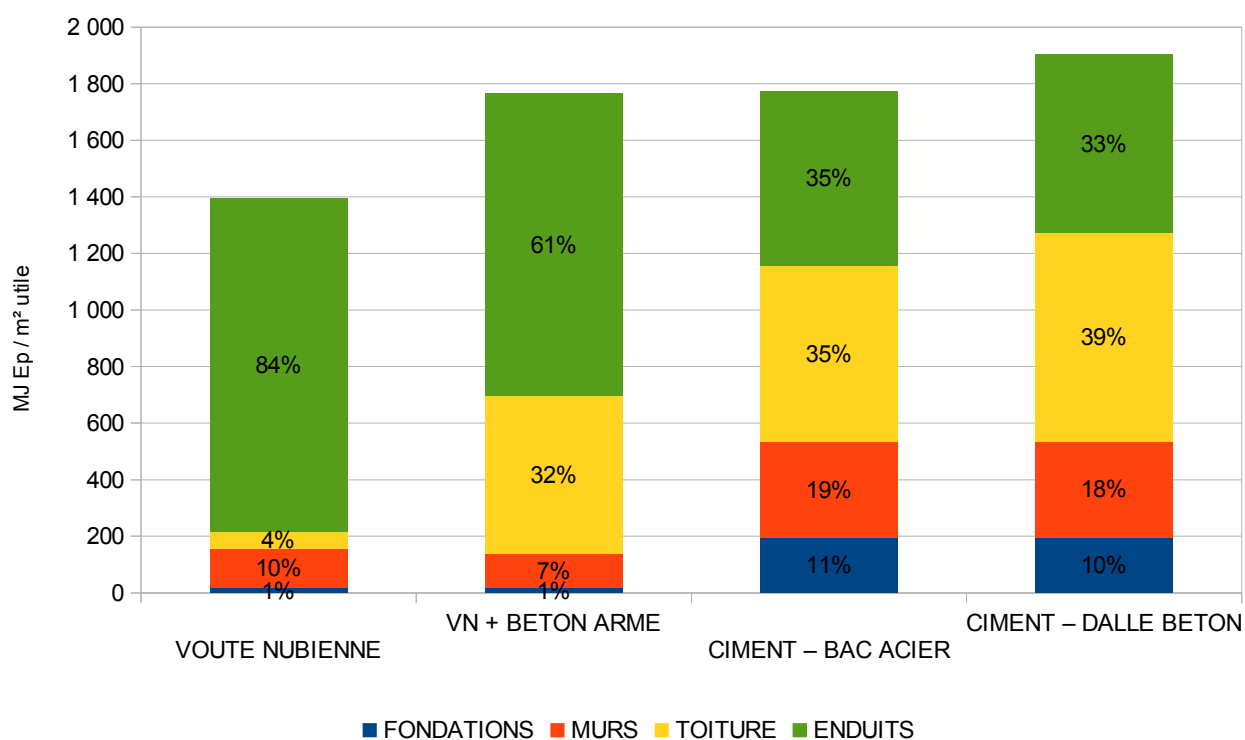


4.2. Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Unité : MJ Ep	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	95 335	120 447	111 822	119 993
TOTAL / m², dont :	1397	1765	1775	1905
FONDATIONS	18	18	196	196
MURS	137	119	338	340
TOITURE	61	558	623	735
ENDUITS	1 180	1 070	618	633

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



5. BILAN DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE SELON UNFCCC

La répartition des émissions selon UNFCCC données dans l'inventaire ci-dessous sont des estimations permettant d'aboutir à des tendances.

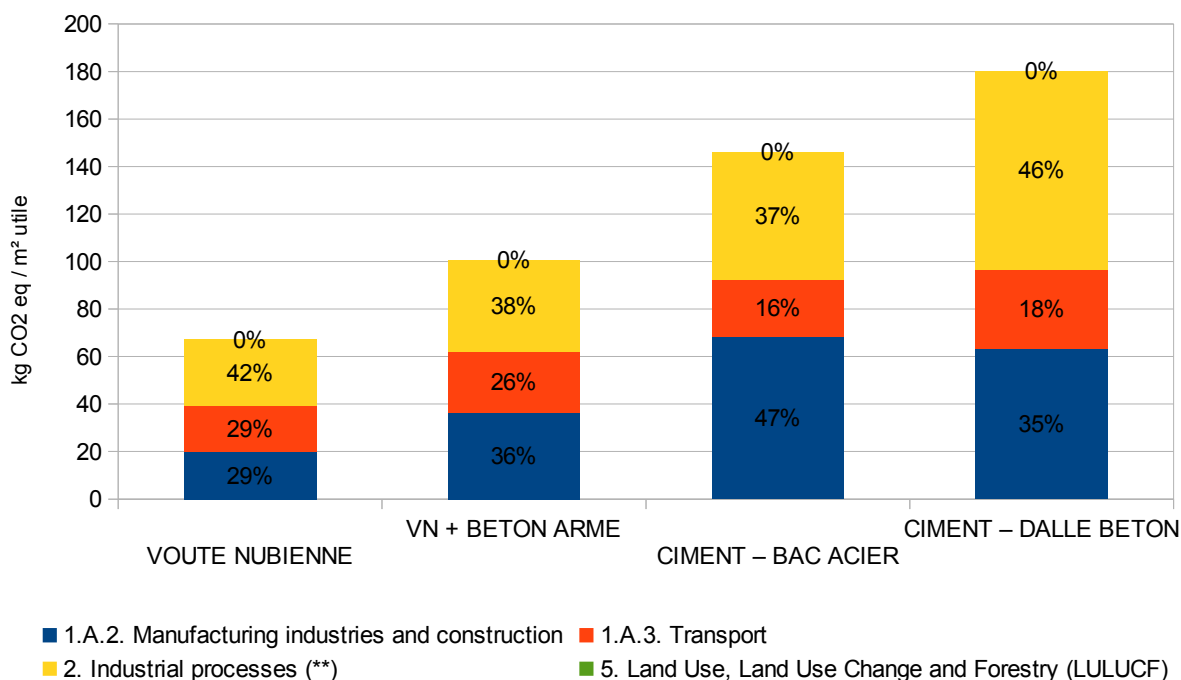
Unité : kg CO ₂ eq	VOUTE NUBIENNE	VN + BETON ARME	CIMENT – BAC ACIER	CIMENT – DALLE BETON
TOTAL / bâtiment	4 585	6 874	9 207	11 362
TOTAL / m², dont :	67	101	146	180
1.A. Fuel combustion activities (*)	39	62	92	97
1.A.2. Manufacturing industries and construction	20	36	68	63
1.A.3. Transport	19	26	24	33
2. Industrial processes (**)	28	38	54	84
5. Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)	0	0	0	0

(*) Hors phase utilisation pour le rafraîchissement. Les bâtiments sont considérés ici non ventilés mécaniquement et non climatisés, la performance énergétique des bâtiments ayant été étudiée séparément dans une autre partie de l'étude. Les consommations d'électricité spécifique et d'éclairage ont été négligées dans l'étude.

(**) Seules sont considérées ici les émissions non énergétiques de la production de ciment (émissions correspondant à la décarbonation du carbonate de calcium CaCO₃) à hauteur de 75 % des émissions totales pour la production de ciment (source : Guide des Facteurs d'Emissions V.6.1, ADEME). Les éventuelles autres émissions non énergétiques liées à la production de matériaux de construction ont toutes été comptabilisées dans 1.A.2. Manufacturing industries and construction.

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Modèle d'usage : habitation, durée de vie de l'ouvrage : 30 ans



Matériaux / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m ³)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq / kg)	Energie primaire non renouvelable (MJ Ep / kg)	Source / Détails
MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	1,51	14,5	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Bois import – déforestation	VEGETAL	500	1,62	16,2	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Goudron	ORGANIQUE	1050	0,43	49,0	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	1,47	15,4	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
MAT_Pierre sauvage	MINERAL	2000	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
MAT_Terre crue	MINERAL	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Bâche Plastique	ORGANIQUE	900	2,11	57,5	IBO + énergie matière incluse dans l'énergie primaire non renouvelable
SYS_Béton	MINERAL	2300	0,10	0,7	IBO
SYS_Béton armé	COMPOSITE	2400	0,14	1,4	IBO
SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Enduit ciment	MINERAL	1500	0,19	1,9	IBO
SYS_Enduit terre	MINERAL	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_IPN	METALLIQUE	7800	1,37	21,7	IBO
SYS_Mortier ciment	MINERAL	1500	0,19	1,9	IBO
SYS_Mortier de terre	MINERAL	1500	0,00	0,0	prélèvement considéré sans impact CO ₂ / Conso. Énergie primaire dans le contexte du Sénégal
SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1000	0,10	0,7	IBO
SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7800	2,14	34,1	IBO

Sources :

- Données environnementales : sauf mention contraire : Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, IBO Richtwerte-Tabelle, 2013, Disponible sur : www.ibo.at/
 Les consommations d'énergie primaire « renouvelable » - dans le contexte européen - ont été considérées « non renouvelable » dans le contexte ouest-africain
 - Données physiques : OLIVA Jean-Pierre, COURGEY Samuel, L'isolation Thermique Ecologique, Editions Terre Vivante, 2010



Matériaux / Système	Type transport	Référence	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO2 eq)	Energie primaire non renouvelable (MJ Ep)	Source / Détails
CAMION	7,5 à 20 tonnes	tonne.km	4,38	0,26	IBO
CAMION	> 28 tonnes	tonne.km	3,01	0,19	IBO
CAMIONNETTE	< 3,5 tonnes	tonne.km	32,18	1,91	IBO
CARGO	Container	tonne.km	0,17	0,01	IBO
CHARETTE	Traction animale	tonne.km	0,00	0,00	IBO

Sources :

- Données environnementales : sauf mention contraire : Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, IBO Richtwerte-Tabelle, 2013, Disponible sur : www.ibo.at/
Les consommations d'énergie primaire « renouvelable » - dans le contexte européen - ont été considérées « non renouvelable » dans le contexte ouest-africain
- Données physiques : OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, L'isolation Thermique Ecologique, Editions Terre Vivante, 2010

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Habitation rurale	
SURFACE HABITABLE :	12,60	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	BANCO – PAILLE	
A : Longueur intérieur :	3,55	m
B : Largeur intérieur :	3,55	m
C : Hauteur mur intérieur :	1,80	m
D : Hauteur point haut :	3,70	m
E : Longueur arrête toit :	2,60	m



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	0,68	90,0%	0,61	911	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 90 % briques de banco
02	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	0,68	10,0%	0,07	101	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 10 % mortier de terre
03	MURS	MURS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	2,00	90,0%	1,80	2 697	murs périphériques, 90 % briques de banco
04	MURS	MURS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	2,00	10,0%	0,20	300	murs périphériques, 10 % mortier de terre crue
05	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,53	100,0%	0,53	799	enduit ciment intérieur 2 cm
06	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,53	100,0%	0,53	799	enduit ciment extérieur 2 cm
07	TOITURE	CHEVRONS	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,18	100,0%	0,18	90	12 chevrons, diamètre 8 cm, débord extérieur 40 cm
08	TOITURE	CHARPENTE	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,06	100,0%	0,06	30	10 pannes espacées de 30 cm par côté, 4 côté, diamètre 3 cm
09	TOITURE	COUVERTURE	MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	1,35	100,0%	1,35	162	surface toiture x paille roseaux de mil 10cm
10	TOITURE	COUVERTURE	MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	0,67	100,0%	0,67	81	surface toiture x paille de foin 5 cm

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Habitation rurale	
SURFACE HABITABLE :	15,48	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	BANCO – ZINC	
A : Longueur intérieur :	4,30	m
B : Largeur intérieur :	3,60	m
C : Hauteur mur intérieur :	2,05	m
D : Hauteur point haut :	3,30	m



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m³)	Volume total (m³)	%	Volume matériau (m³)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Brique de terre cru	MINERAL	1 500	0,75	90,0%	0,67	1 008	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 90 % briques de banco
02	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	0,75	10,0%	0,07	112	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 10 % mortier de terre
03	MURS	FACADES	SYS_Brique de terre cru	MINERAL	1 500	2,83	90,0%	2,55	3 819	2 murs des façades, 90 % briques de banco
04	MURS	FACADES	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	2,83	10,0%	0,28	424	2 murs des façades, 10 % mortier de terre
05	MURS	PIGNONS	SYS_Brique de terre cru	MINERAL	1 500	2,21	90,0%	1,99	2 989	2 murs des pignons, 90 % briques de banco
06	MURS	PIGNONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	2,21	10,0%	0,22	332	2 murs des pignons, 10 % mortier de terre
07	ENDUITS	ENDUITS INT FACADES	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,38	100,0%	0,38	566	Enduit intérieur, ciment 2 cm
08	ENDUITS	ENDUITS INT PIGNONS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,30	100,0%	0,30	443	Enduit intérieur, ciment 2 cm
09	ENDUITS	ENDUITS EXT FACADES	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,38	100,0%	0,38	566	Enduit extérieur, ciment 2 cm
10	ENDUITS	ENDUITS EXT PIGNONS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,30	100,0%	0,30	443	Enduit extérieur, ciment 2 cm
11	TOITURE	TOLE ONDULEE 2 PANS	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,01	100,0%	0,01	77	Surface des 2 pans de toiture, débord toiture 60 cm, recouvrement 10 % épaisseur tôle = 0,4mm

N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	TOITURE	TOLE ONDULEE PIGNONS	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,00	100,0%	0,00	21	Surface des 2 pignons de toiture, débord toiture en façade 60 cm, recouvrement 10 %, épaisseur tôle = 0,4mm
13	TOITURE	TOLE ONDULEE 2 PANS	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,01	100,0%	0,01	77	calcul transport maritime tôle
14	TOITURE	TOLE ONDULEE PIGNONS	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,00	100,0%	0,00	21	calcul transport maritime tôle
15	TOITURE	CHEVRONS	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,20	100,0%	0,20	98	7 chevrons x 2 pans = 14 (dont 4 arbalétriers), diamètre 8 cm pour longueur bât = 4,30 m
16	TOITURE	PANNES	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,05	100,0%	0,05	23	4 pannes x 2 pans, 3x4 cm pour largeur bât = 3,60
17	TOITURE	PANNE FAITIERE	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,02	100,0%	0,02	12	1 panne faitière, diamètre 8
18	TOITURE	POINCON	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,01	100,0%	0,01	6	2 poinçons, diamètre 8

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Habitation rurale	
SURFACE HABITABLE :	16,00	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	CIMENT – ZINC	
A : Longueur intérieur :	4,00	m
B : Largeur intérieur :	4,00	m
C : Hauteur mur bas intérieur :	2,55	m
D : Hauteur mur haut intérieur :	3,10	m
E : Hauteur chainage horizontal	2,2	m



N° ligne	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	1,20	100,0%	1,20	1 200	murs de soubassement périphériques
02	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Béton	MINERAL	2 300	0,25	100,0%	0,25	573	semelle béton, épaisseur 5cm
03	MURS	MURS	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	5,28	90,0%	4,75	4 752	4 murs latéraux jusqu'à chainage horizontal, 90 % parpaing
04	MURS	MURS	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	5,28	10,0%	0,53	792	4 murs latéraux jusqu'à chainage horizontal, 10 % mortier de ciment
05	MURS	CHAINAGE VERTICAL	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	0,24	100,0%	0,24	583	chainage vertical sur 4 coins du bas fondations jusqu'à chainage horizontal
06	MURS	CHAINAGE HORIZONTAL	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	0,36	100,0%	0,36	864	chainage horizontal sur 4 murs
07	MURS	CHAINAGE VERTICAL	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	0,01	100,0%	0,01	23	pour saisie transport fer par cargo
08	MURS	CHAINAGE HORIZONTAL	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	0,01	100,0%	0,01	35	pour saisie transport fer par cargo
09	MURS	MUR HAUT – ACROTERE	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	0,58	90,0%	0,52	522	mur haut côté haut toiture
10	MURS	MUR HAUT – ACROTERE	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	0,58	10,0%	0,06	87	mur haut côté haut toiture
11	MURS	MUR BAS – ACROTERE	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	0,13	90,0%	0,12	116	mur haut côté bas toiture

N° ligne	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	MURS	MUR BAS – ACROTERE	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	0,13	10,0%	0,01	19	<i>mur haut côté bas toiture</i>
13	MURS	MUR PIGNON – ACROTERE	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	0,54	90,0%	0,49	486	<i>2 murs haut pignons</i>
14	MURS	MUR PIGNON – ACROTERE	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	0,54	10,0%	0,05	81	<i>2 murs haut pignons</i>
15	TOITURE	TOLE	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,01	100,0%	0,01	61	<i>surface extérieure + recouvrement 10 % + avancée de toiture 10 cm. Epaisseur tôle ondulée = 0,4 mm (40/100)</i>
16	TOITURE	TOLE	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,01	100,0%	0,01	61	<i>pour saisie cargo</i>
17	TOITURE	CHEVRON	MAT_Bois import – déforestation	VEGETAL	500	0,02	100,0%	0,02	10	<i>1 chevron central 6x8 pour longueur = 4m</i>
18	TOITURE	PANNES	MAT_Bois import – déforestation	VEGETAL	500	0,02	100,0%	0,02	12	<i>6 pannes 4,5x3,5 pour largeur = 4 m</i>
19	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,90	100,0%	0,90	1 356	<i>Enduit ciment</i>
20	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	1,02	100,0%	1,02	1 528	<i>Enduit ciment</i>

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Habitation rurale	
SURFACE HABITABLE :	12,60	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	PAILLE – PAILLE	
A : Longueur intérieur :	3,55	m
B : Largeur intérieur :	3,55	m
C : Hauteur mur intérieur :	1,80	m
D : Hauteur point haut :	3,70	m
E : Longueur arrête toit :	2,60	m



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	0,68	90,0%	0,61	911	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 90 % briques de banco
02	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	0,68	10,0%	0,07	101	murs de soubassement périphériques hauteur 30 cm, 1 brique de largeur, 10 % mortier de terre
03	MURS	PAILLE	MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	0,64	10,0%	0,06	8	
04	MURS	POTEAUX BOIS	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,08	100,0%	0,08	41	9 poteaux bois diamètre 8 cm
05	MURS	LITEAUX LATÉRAUX	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,03	100,0%	0,03	13	litesaux latéraux, 5 par côté
06	TOITURE	CHEVRONS	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,18	100,0%	0,18	90	12 chevrons, diamètre 8 cm, débord extérieur 40 cm
07	TOITURE	CHARPENTE	MAT_Bois brousse – déforestation	VEGETAL	500	0,06	100,0%	0,06	30	10 pannes espacées de 30 cm par côté, 4 côté, diamètre 3 cm
08	TOITURE	COUVERTURE	MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	1,35	100,0%	1,35	162	surface toiture x paille roseaux de mil 10cm
09	TOITURE	COUVERTURE	MAT_Paille – déforestation	VEGETAL	120	0,67	100,0%	0,67	81	surface toiture x paille de foin 5 cm

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Habitation rurale	
SURFACE HABITABLE :	13,00	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	VOUTE NUBIENNE	
A : Longueur intérieur :	4,00	m
B : Largeur intérieur :	3,25	m
C : Hauteur naissance de voûte :	1,60	m
D : Hauteur sous Plafond sommet voûte :	3,23	m



N° ligne	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m³)	Volume total (m³)	%	Volume matériau (m³)	Masse matériau (kg)	Détails
01	MURS	MURS LATéraux	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	10,37	90,0%	9,33	13 997	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue / hauteur de naissance sous Voûte
02	MURS	MURS LATéraux	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	10,37	10,0%	1,04	1 555	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
03	MURS	MURS PIGNON	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	4,68	90,0%	4,21	6 318	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue
04	MURS	MURS PIGNON	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	4,68	10,0%	0,47	702	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
05	MURS	MURS CONTREFORTS LATéraux	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	8,04	90,0%	7,24	10 860	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
06	MURS	MURS CONTREFORTS LATéraux	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	8,04	10,0%	0,80	1 207	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
07	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	5,47	90,0%	4,93	7 389	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
08	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	5,47	10,0%	0,55	821	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
09	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	1,43	90,0%	1,29	1 930	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 90 % petites briques
10	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	1,43	10,0%	0,14	214	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 10 % mortier de terre crue
11	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	3,35	90,0%	3,01	4 519	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 90 % briques de terre crue
12	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	3,35	10,0%	0,33	502	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 10 % mortier de terre

N° ligne	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
13	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	1,95	100,0%	1,95	2 925	Remplissage terre au dessus VN, épaisseur 15 cm
14	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Bâche Plastique	ORGANIQUE	900	0,01	100,0%	0,01	6	Surface bâche = largeur x longueur extérieures + recouvrement 10 %, épaisseur bâche = 300 micromètres
15	FONDATIONS	FONDATIONS	MAT_Pierre sauvage	MINERAL	2 000	5,64	70,0%	3,94	7 889	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 70 % pierres sauvages
16	FONDATIONS	FONDATIONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	5,64	30,0%	1,69	2 536	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 30 % mortier de terre
17	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,10	100,0%	0,10	108	Enduits extérieurs goudron toutes façades, ep = 0,0015 m
18	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	0,63	100,0%	0,63	945	Enduits intérieurs ciment toutes façades, ep = 2 cm, jusqu'à naissance de VN
19	ENDUITS	ENDUITS TERRASSES	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,03	100,0%	0,03	34	Enduits terrasse goudron, ep = 0,0015 m
20	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	1,37	100,0%	1,37	2 051	Enduits extérieurs terre toutes façades, ep = 2 cm
21	TOITURE	GOUTTIERES	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,00	100,0%	0,00	5	2 gouttières, largeur = 0,2m, longueur = 0,5m, longueur languette = 0,5m, hauteur = 0,15 m
22	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	0,41	100,0%	0,41	613	Enduits intérieurs terre, ep = 2 cm, partie Voûte

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Autres usages	
SURFACE HABITABLE :	63,00	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	CIMENT – BAC ACIER	
A : Longueur intérieur :	9,00	m
B : Largeur intérieur :	7,00	m
C : Hauteur mur bas intérieur :	3,00	m
D : Hauteur mur haut intérieur :	3,50	m



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Béton	MINERAL	2 300	2,40	100,0%	2,40	5 520	semelle
02	FONDATIONS	CHAINAGE BAS	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	100,0%	1,28	3 072	Chainage bas, 20cm x 20 cm
03	MURS	MURS	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	7,12	90,0%	6,41	6 408	murs latéraux parpaing de ciment, 20 cm épaisseur moins les chainages
04	MURS	MURS	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	7,12	10,0%	0,71	1 068	murs latéraux parpaing de ciment, 20 cm épaisseur moins les chainages
05	MURS	CHAINAGE POTEAUX	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,20	100,0%	1,20	2 880	4 poteaux façades longues x 2 + 2 poteaux pignons
06	MURS	CHAINAGE HORIZONTAL HAUT	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	100,0%	1,28	3 072	
07	MURS	MURS TRIANGLE HAUT PIGNONS	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	0,70	90,0%	0,63	630	
08	MURS	MURS TRIANGLE HAUT PIGNONS	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	0,70	10,0%	0,07	105	
09	TOITURE	BAC ACIER	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,06	100,0%	0,06	454	épaisseur 0,8 mm
10	TOITURE	BAC ACIER	SYS_Tôle acier zinc	METALLIQUE	7 800	0,06	100,0%	0,06	454	pour transport cargo
11	TOITURE	IPN 140, chevron	SYS_IPN	METALLIQUE	7 800	30,00	100,0%		387	IPE 140, 12,9 kg/m, 4 chevrons soit 30 ml

N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	TOITURE	IPN 140, chevron	SYS_IPN	METALLIQUE	7 800	30,00	100,0%	30,00	387	IPE 140, pour transport cargo, 4 chevrons
13	TOITURE	IPN 100	SYS_IPN	METALLIQUE	7 800	55,20	100,0%		447	IPE 100, 8,1 kg/m, 6 IPN, soit
14	TOITURE	IPN 100	SYS_IPN	METALLIQUE	7 800	55,20	100,0%	55,20	447	IPE 100, pour transport cargo
15	ENDUITS	ENDUITS EXT	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	2,08	100,0%	2,08	3 120	
16	ENDUITS	ENDUITS INT	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	2,08	100,0%	2,08	3 120	
17	FONDATIONS	ARMATURE FER	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	4,0%	0,05	123	pour transport cargo
18	MURS	ARMATURE FER	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	2,48	4,0%	0,10	238	pour transport cargo

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE

30 ans

MODELE D'USAGE :

Autres usages

SURFACE HABITABLE :

63,00 m²

SYSTEME CONSTRUCTIF :

CIMENT – BETON

A : Longueur intérieur :

9,00 m

B : Largeur intérieur :

7,00 m

C : Hauteur mur bas intérieur :

3,00 m



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	FONDATIONS	SOUBASSEMENT	SYS_Béton	MINERAL	2 300	2,40	100,0%	2,40	5 520	semelle
02	FONDATIONS	CHAINAGE BAS	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	100,0%	1,28	3 072	Chainage bas, 20cm x 20 cm
03	MURS	MURS	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	7,92	90,0%	7,13	7 128	murs latéraux parpaing de ciment, 20 cm épaisseur moins les chainages, acrotères 0,25 m
04	MURS	MURS	SYS_Mortier ciment	MINERAL	1 500	7,92	10,0%	0,79	1 188	murs latéraux parpaing de ciment, 20 cm épaisseur moins les chainages, acrotères 0,25 m
05	MURS	CHAINAGE POTEAUX	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,20	100,0%	1,20	2 880	4 poteaux façades longues x 2 + 2 poteaux pignons
06	MURS	CHAINAGE HORIZONTAL HAUT	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	100,0%	1,28	3 072	
07	ENDUITS	ENDUITS EXT	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	2,21	100,0%	2,21	3 312	
08	ENDUITS	ENDUITS INT	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	1,92	100,0%	1,92	2 880	
09	FONDATIONS	ARMATURE FER	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,28	4,0%	0,05	123	pour transport cargo
10	MURS	ARMATURE FER	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	2,48	4,0%	0,10	238	pour transport cargo
11	TOITURE	POUTRES	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	2,24	100,0%	2,24	5 376	4 poutres 40x20

N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	TOITURE	POUTRES	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	2,24	4,0%	0,09	215	<i>pour transport cargo</i>
13	TOITURE	POUTRELLES	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	3,78	100,0%	3,78	9 072	<i>14 poutrelles * 3 travées 20x15</i>
14	TOITURE	POUTRELLES	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	3,78	4,0%	0,15	363	<i>pour transport cargo</i>
15	TOITURE	HOURDIS	SYS_Parpaing de ciment	MINERAL	1 000	9,45	100,0%	9,45	9 450	
16	TOITURE	DALLE	SYS_Béton	MINERAL	2 300	3,15	100,0%	3,15	7 245	
17	TOITURE	DALLE	SYS_Béton	MINERAL	2 300	3,15	4,0%	0,05	118	<i>pour transport cargo</i>
18	ENDUITS	ENDUITS INT TOITURE	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	1,26	100,0%	0,10	149	

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Autres usages	
SURFACE HABITABLE / VN :	22,75	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	VOUTE NUBIENNE	
A : Longueur intérieur :	7,00	m
B : Largeur intérieur :	3,25	m
C : Hauteur naissance de voûte :	1,80	m
D : Hauteur sous Plafond sommet voûte :	3,43	m
E : Nombre VN	3	



N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
01	MURS	MURS LATéraux	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	37,44	90,0%	33,70	50 544	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue / hauteur de naissance sous Voûte
02	MURS	MURS LATéraux	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	37,44	10,0%	3,74	5 616	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
03	MURS	MURS PIGNON	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	15,60	90,0%	14,04	21 060	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue
04	MURS	MURS PIGNON	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	15,60	10,0%	1,56	2 340	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
05	MURS	MURS CONTREFORTS LATéraux	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	78,44	90,0%	70,59	105 890	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
06	MURS	MURS CONTREFORTS LATéraux	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	26,15	10,0%	2,61	3 922	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
07	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	16,42	90,0%	14,78	22 166	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
08	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	16,42	10,0%	1,64	2 463	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
09	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	7,50	90,0%	6,75	10 131	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 90 % petites briques
10	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	7,50	10,0%	0,75	1 126	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 10 % mortier de terre crue
11	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	17,58	90,0%	15,82	23 726	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 90 % briques de terre crue

N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	17,58	10,0%	1,76	2 636	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 10 % mortier de terre
13	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	10,24	100,0%	10,24	15 356	Remplissage terre au dessus VN, épaisseur 15 cm
14	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Bâche Plastique	ORGANIQUE	900	0,03	100,0%	0,03	31	Surface bâche = largeur x longueur extérieures + recouvrement 10 %, épaisseur bâche = 300 micromètres
15	FONDATIONS	FONDATIONS	MAT_Pierre sauvage	MINERAL	2 000	15,47	70,0%	10,83	21 658	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 70 % pierres sauvages
16	FONDATIONS	FONDATIONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	15,47	30,0%	4,64	6 962	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 30 % mortier de terre
17	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,23	100,0%	0,23	245	Enduits extérieurs goudron toutes façades, ep = 0,0015 m
18	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	2,14	100,0%	2,14	3 216	Enduits intérieurs terre , ep = 2 cm, voûte intérieure
19	ENDUITS	ENDUITS TERRASSES	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,16	100,0%	0,16	164	Enduits terrasse goudron, ep = 0,0015 m
20	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	3,11	100,0%	3,11	4 662	Enduits extérieurs terre toutes façades, ep = 2 cm
21	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	2,71	100,0%	2,71	4 068	Enduits intérieurs ciment, ep = 2 cm, murs latéraux jusqu'à naissance de VN, murs pignons toute hauteur

FICHE QUANTITATIF MATERIAUX

DUREE DE VIE DE L'OUVRAGE	30	ans
MODELE D'USAGE :	Autres usages	
SURFACE HABITABLE :	22,75	m²
SYSTEME CONSTRUCTIF :	VN + BETON ARME	
A : Longueur intérieur :	7,00	m
B : Largeur intérieur :	3,25	m
C : Hauteur naissance de voûte :	1,80	m
D : Hauteur sous Plafond sommet voûte :	3,43	m
E : Nombre VN	3	

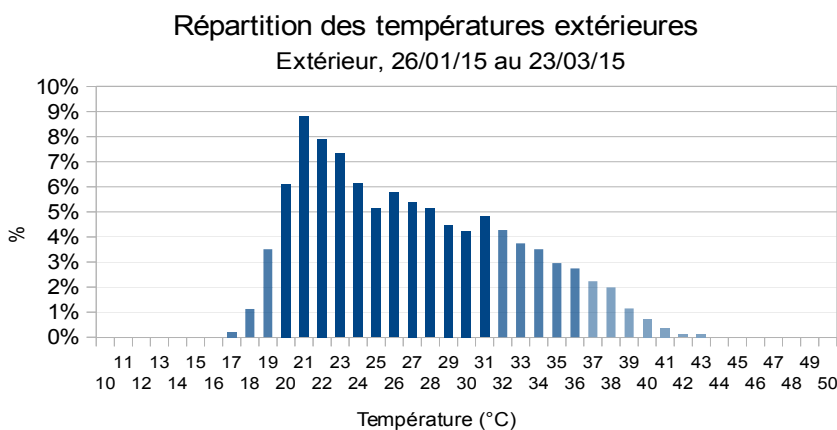
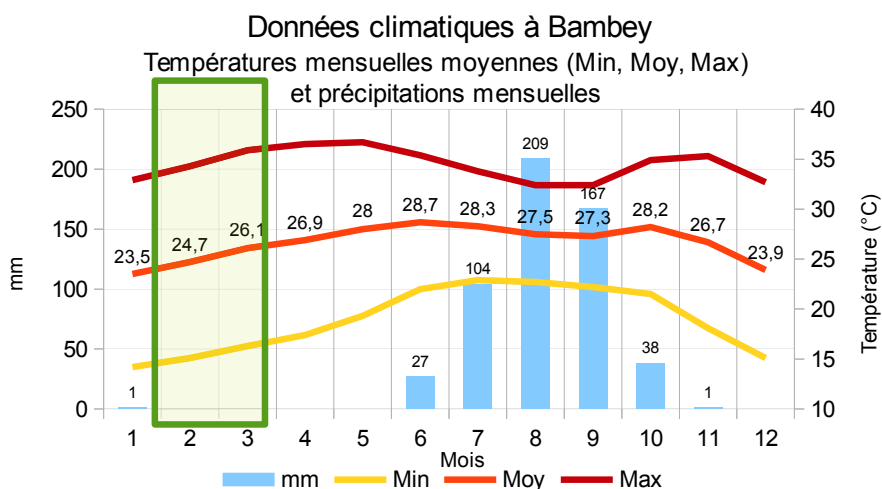


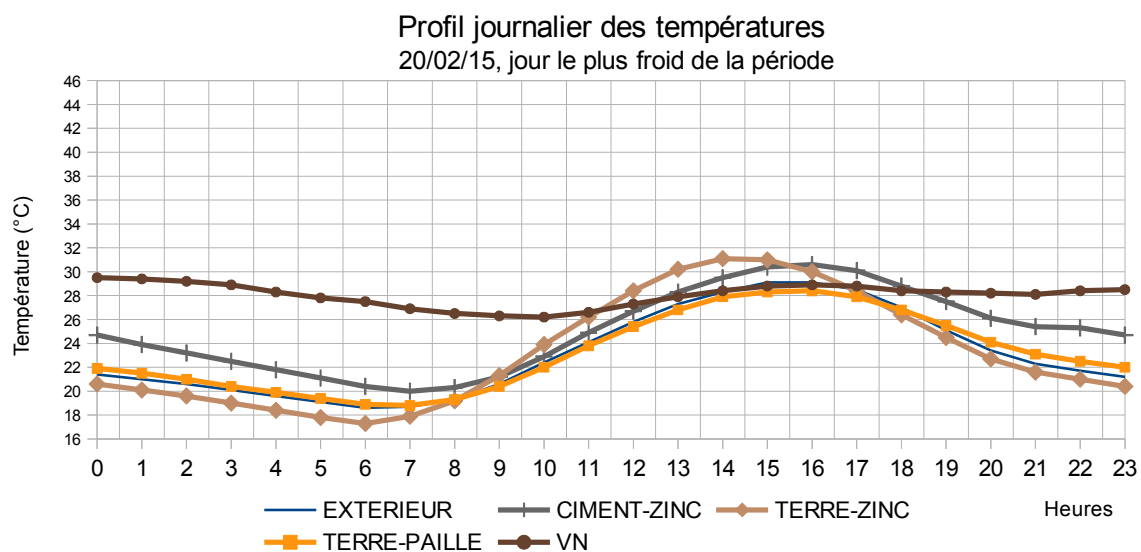
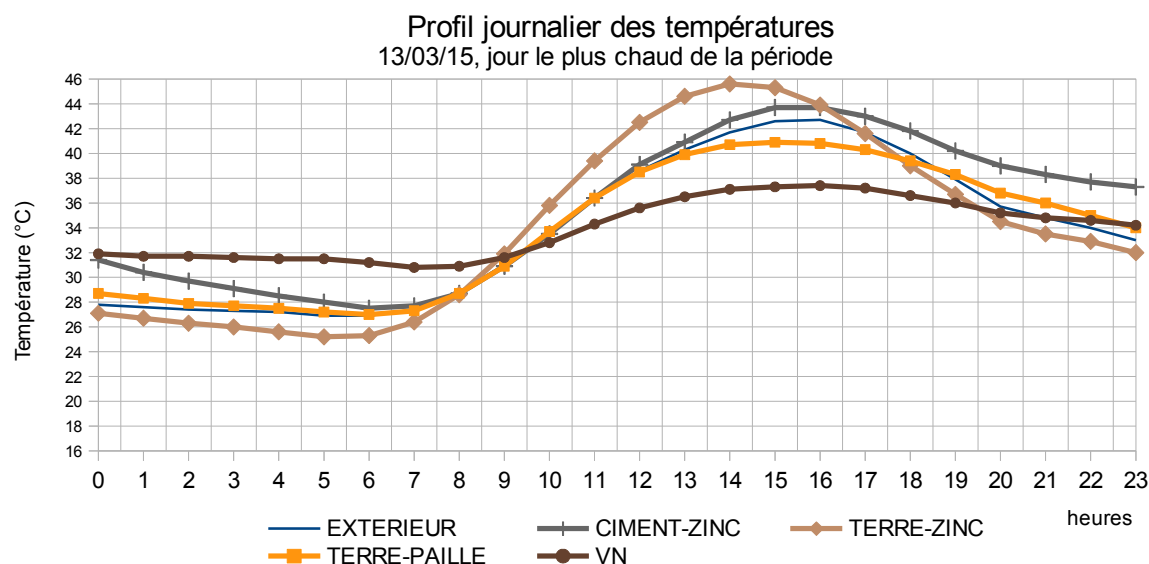
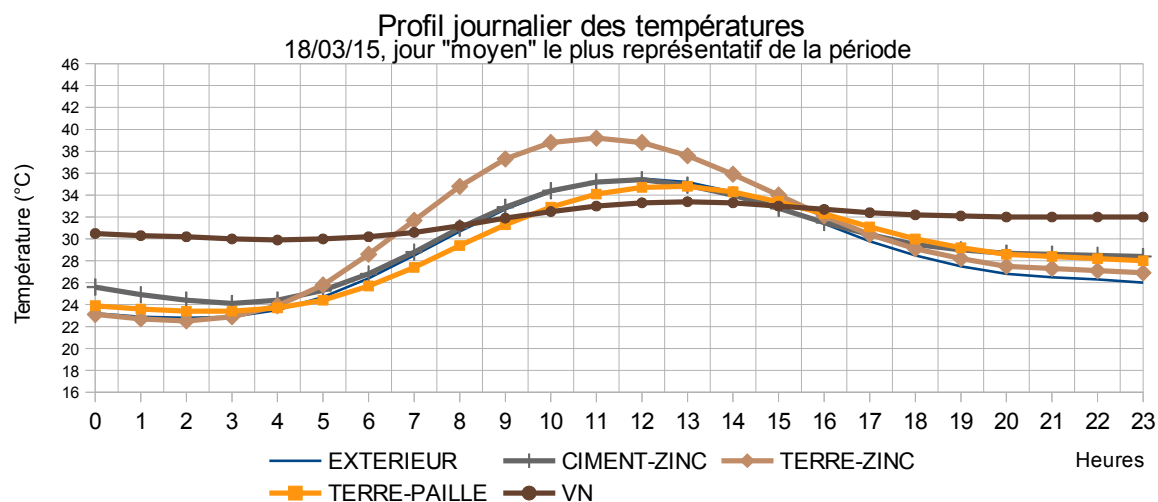
N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m³)	Volume total (m³)	%	Volume matériau (m³)	Masse matériau (kg)	Détails
01	MURS	MURS LATERAUX	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	18,72	90,0%	16,85	25 272	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue / hauteur de naissance sous Voûte
02	MURS	MURS LATERAUX	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	18,72	10,0%	1,87	2 808	2 murs latéraux VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
03	MURS	MURS PIGNON	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	15,60	90,0%	14,04	21 060	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 90 % briques de terre crue
04	MURS	MURS PIGNON	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	15,60	10,0%	1,56	2 340	2 murs pignons VN jusqu'à naissance de VN + 10 cm soubassement, 10 % mortier de terre crue
05	MURS	MURS CONTREFORTS LATERAUX	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	78,44	90,0%	70,59	105 890	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
06	MURS	MURS CONTREFORTS LATERAUX	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	26,15	10,0%	2,61	3 922	2 contreforts latéraux sur épaisseur de mur 40, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
07	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	16,42	90,0%	14,78	22 166	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 90 % briques de terre crue
08	MURS	MURS HAUTS PIGNONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	16,42	10,0%	1,64	2 463	2 murs haut pignon sur épaisseur de mur, hauteur naissance VN jusqu'à haut acrotère, 10 % briques de terre crue
09	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	7,50	90,0%	6,75	10 131	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 90 % petites briques
10	TOITURE	VOUTE NUBIENNE	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	7,50	10,0%	0,75	1 126	Voûte Nubienne, volume des petites briques + mortier, 10 % mortier de terre crue
11	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Brique de terre crue	MINERAL	1 500	17,58	90,0%	15,82	23 726	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 90 % briques de terre crue

N° LIGNE	Paroi	Sous-élément paroi	Matériau / Système	Type matière	Masse volumique (kg/m3)	Volume total (m3)	%	Volume matériau (m3)	Masse matériau (kg)	Détails
12	TOITURE	REPLISSAGE CONTREFORTS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	17,58	10,0%	1,76	2 636	Volume du remplissage entre contreforts et VN (Aire Carré – aire cercle)*longueur intérieure, 10 % mortier de terre
13	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	10,24	100,0%	10,24	15 356	Remplissage terre au dessus VN, épaisseur 15 cm
14	TOITURE	TOITURE AU DESSUS VN	SYS_Bâche Plastique	ORGANIQUE	900	0,03	100,0%	0,03	31	Surface bâche = largeur x longueur extérieures + recouvrement 10 %, épaisseur bâche = 300 micromètres
15	FONDATIONS	FONDATIONS	MAT_Pierre sauvage	MINERAL	2 000	15,47	70,0%	10,83	21 658	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 70 % pierres sauvages
16	FONDATIONS	FONDATIONS	SYS_Mortier de terre	MINERAL	1 500	15,47	30,0%	4,64	6 962	largeur fondations = 70 cm, hauteur = 50 cm, 30 % mortier de terre
17	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,23	100,0%	0,23	245	Enduits extérieurs goudron toutes façades, ep = 0,0015 m
18	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	2,14	100,0%	2,14	3 216	Enduits intérieurs terre, ep = 2 cm, voûte intérieure
19	ENDUITS	ENDUITS TERRASSES	MAT_Goudron	ORGANIQUE	1 050	0,16	100,0%	0,16	164	Enduits terrasse goudron, ep = 0,0015 m
20	ENDUITS	ENDUITS EXTERIEURS	SYS_Enduit terre	MINERAL	1 500	3,11	100,0%	3,11	4 662	Enduits extérieurs terre toutes façades, ep = 2 cm
21	TOITURE	POTEAUX BA	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,80	100,0%	1,80	4 320	poteaux BA
22	TOITURE	POTEAUX BA	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	1,80	4,0%	0,07	173	pour transport cargo
23	TOITURE	POUTRES BA	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	5,40	100,0%	5,40	12 960	poutres BA
24	TOITURE	POUTRES BA	SYS_Béton armé	COMPOSITE	2 400	5,40	4,0%	0,22	518	pour transport cargo
25	ENDUITS	ENDUITS INTERIEURS	SYS_Enduit ciment	MINERAL	1 500	1,70	100,0%	1,70	2 556	Enduits intérieurs ciment, ep = 2 cm, murs latéraux jusqu'à naissance de VN, murs pignons toute hauteur

>> PROTOCOLE DE MESURES

Période d'instrumentation :	26 janvier au 23 mars 2015, 57 jours, 1368 heures analysées
Localisation :	Village de Ngueye Gueye, commune et département de Bambey, région de Diourbel
Pas de mesures :	toutes les 15 minutes
Grandeurs mesurées :	Température extérieure et humidité extérieure Température intérieure et humidité intérieure
Bâtiments instrumentés :	idem bâtiments ayant servi au relevé des quantitatifs de matériaux (surface utile intérieure de l'ordre de 12,6 à 16 m²)
Position des instruments :	Suspendus à environ 50 à 80 cm du plafond
Masques solaires :	Faibles pour tous les bâtiments
Usage des bâtiments :	Bâtiments d'utilisation, occupés lors de la période d'instrumentation

>> DONNEES CLIMATIQUES A BAMBEY


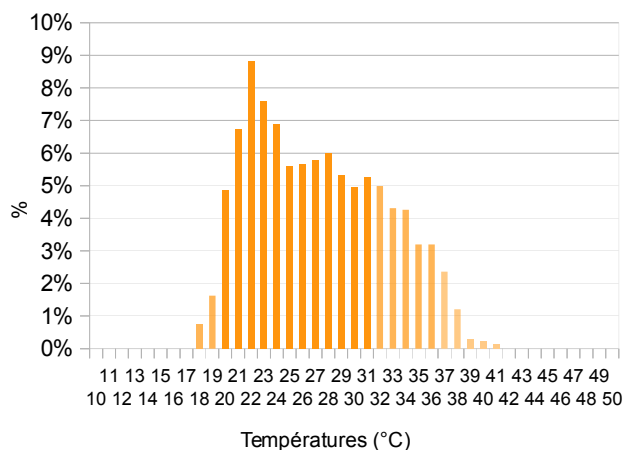


>> REPARTITION DES TEMPERATURES SUR LA PERIODE

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
Nombre d'heures analysées	1 368				
Température minimale sur la période	17,6	18,6	15,8	18,1	24,8
Température moyenne sur la période	27,4	29,3	28,1	27,7	30,7
Température maximale sur la période	43,4	45	46,9	41,3	37,6
Amplitude moyenne journalière des températures (Tmax – Tmin)	15,1	15,5	19,9	13,2	5,3

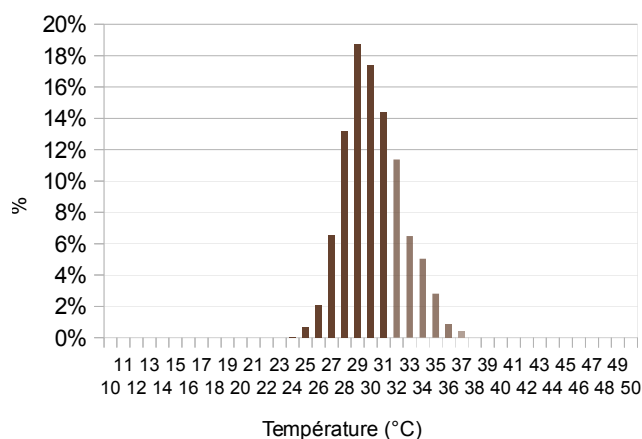
Répartition des températures intérieures

Murs banco, toiture paille, 26/01/15 au 23/03/15



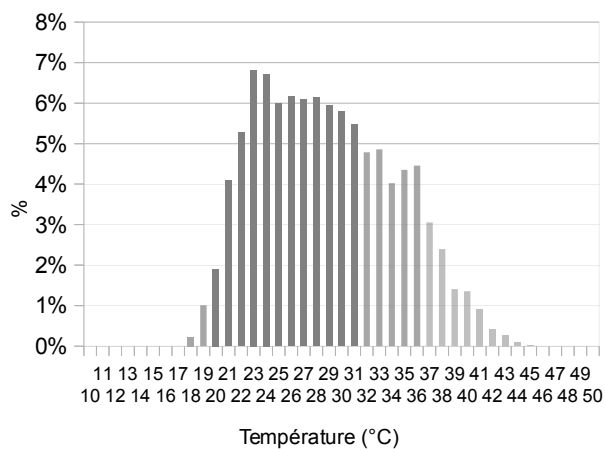
Répartition des températures intérieures

Voûte Nubienne, 26/01/15 au 23/03/15



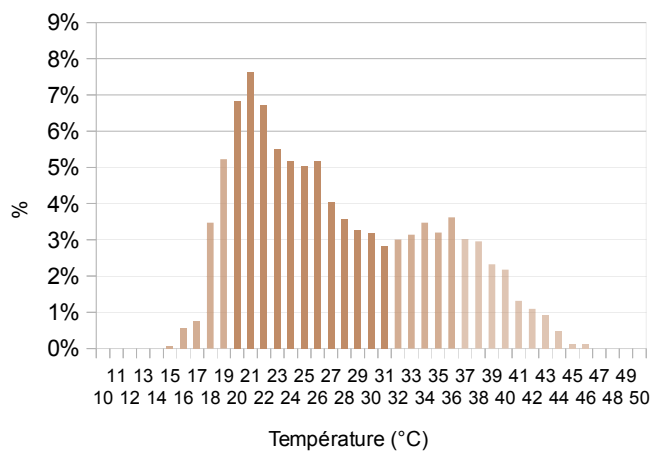
Répartition des températures intérieures

Murs ciments, toiture zinc, 26/01/15 au 23/03/15



Répartition des températures intérieures

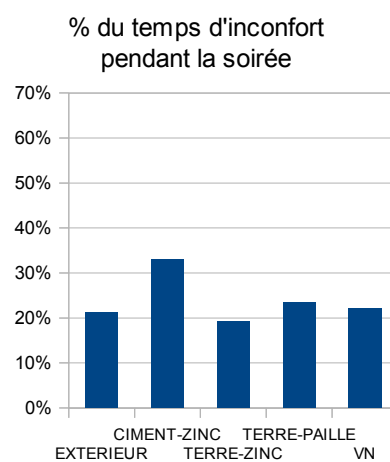
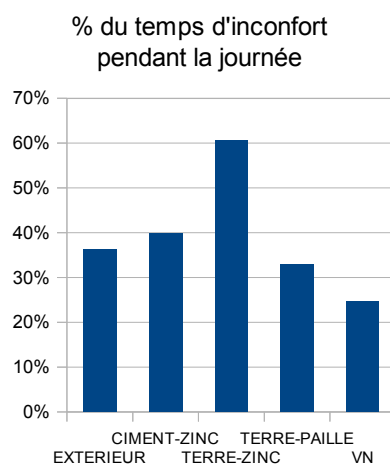
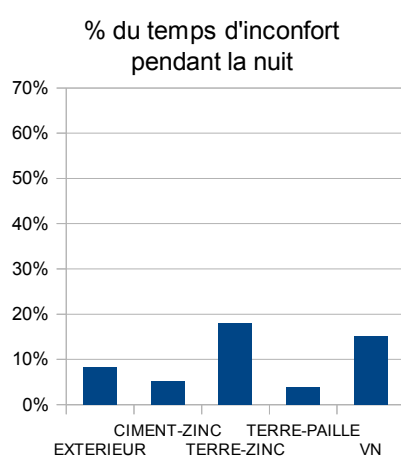
Murs banco, toiture zinc, du 26/01/15 au 23/03/15



>> EVALUATION DE L'INCONFORT

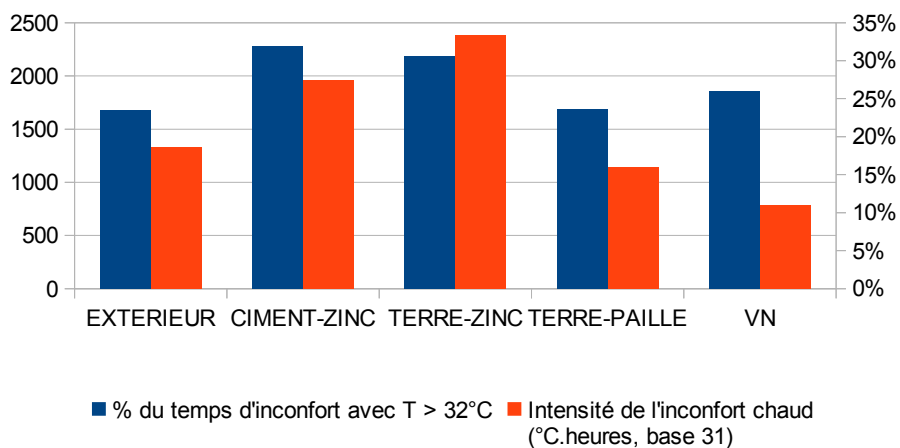
INCONFORT SELON LA PERIODE DE LA JOURNEE Nuit / Journée / Soirée

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
% du temps d'inconfort pendant la nuit [23h-8h]	8%	5%	18%	4%	15%
% du temps d'inconfort pendant la journée [8h-18h]	36%	40%	60%	33%	25%
% du temps d'inconfort pendant la soirée [18h-23h]	21%	33%	19%	23%	22%



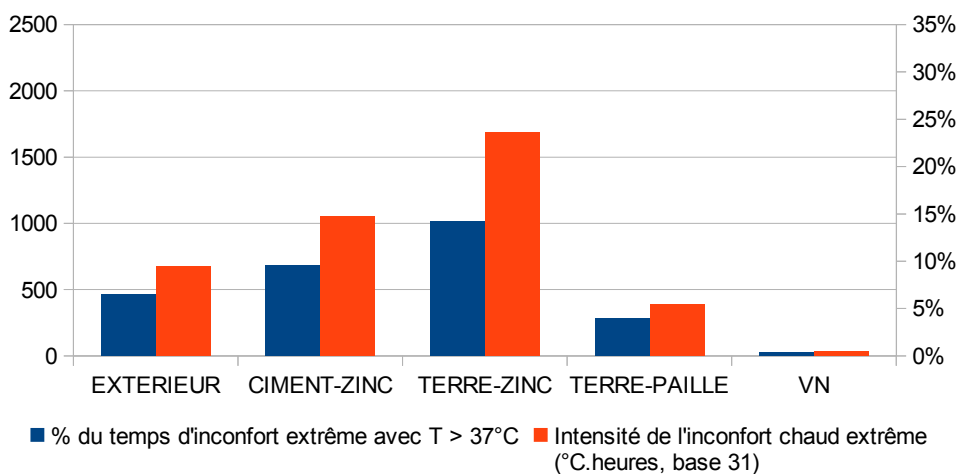
INCONFORT CHAUD > 32°C

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
% du temps d'inconfort avec T > 32°C	24%	32%	31%	24%	26%
Intensité de l'inconfort chaud (°C.heures, base 31)	1332	1957	2378	1141	785



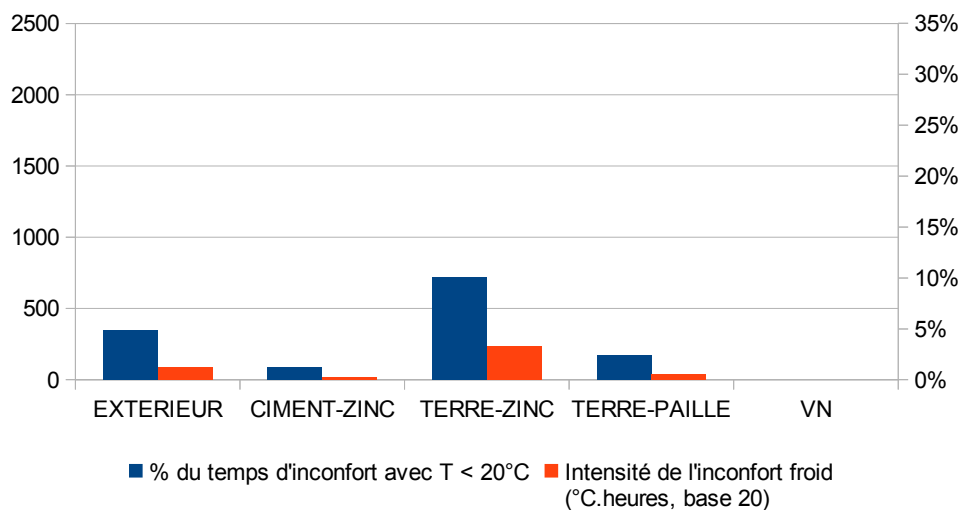
INCONFORT CHAUD EXTREME > 37°C

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
% du temps d'inconfort extrême avec T > 37°C	7%	10%	14%	4%	0%
Intensité de l'inconfort chaud extrême (°C.heures, base 31)	677	1051	1686	386	33



INCONFORT FROID < 20°C

INDICATEURS	EXTERIEUR	CIMENT-ZINC	TERRE-ZINC	TERRE-PAILLE	VN
% du temps d'inconfort avec T < 20°C	5%	1%	10%	2%	0%
Intensité de l'inconfort froid (°C.heures, base 20)	88	20	232	43	0



1. METHODOLOGIE UTILISEE

1.1. Hypothèses de calcul

Moteur de calcul thermique :	Energy Plus 8.2
Logiciels de simulation :	Sketch Up 8 (modélisation du bâti) Open Studio 1.6 (modélisation des systèmes) Energy Plus 8.2 (calculs)
Données physiques matériaux :	OLIVA Jean-Pierre. COURGEY Samuel, <i>L'isolation Thermique Ecologique</i> , Editions Terre Vivante, 2010
Données climatiques :	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), IWE2 weather data (2011) Sites : Dakar, Diourbel, Kaolack, Linguere, Matam, Podor, Tambacounda, Ziguinchor Température, pluviométrie, ensoleillement, vitesse du vent : données au pas horaire Température du sol : température extérieure moyenne mensuelle déphasée d'un mois
Pas de simulation :	Calculs au pas horaire
Simulations réalisées :	Pour chacun des 8 sites climatiques et des 4 variantes de systèmes constructifs : - Simulation sans thermostat (libre) pour évaluer les évolutions de températures intérieures - Simulation avec thermostat (20 – 32 °C) pour évaluer les besoins énergétiques de chauffage et de rafraîchissement
Renouvellement d'air :	Calcul du renouvellement d'air selon Sherman and Grimsrud (1980), fonction de la vitesse du vent, de la température et de la surface d'ouvertures. Renouvellement d'air moyen effectif compris entre 1,7 et 3,6 vol/heure, selon les régions.

1.2. Définition des variantes de bâtiments

VARIANTES	ORIENTATION	MENUISERIES	SURFACE INT.	Dimensions intérieures	DESCRIPTIF
VOUTE NUBIENNE	Façades Longues orientées Nord-Sud	Huisseries métalliques 1 porte en façade Sud (0,9 m x 2,05m) 2 fenêtres en façade Nord (0,9 m x 1,2 m)	24 m²	L x l = 7,40m x 3,25m Hauteur Sous Plafond : min = 1,60 m / max = 3,20 m	- Murs et toiture en Voûte Nubienne, enduits extérieurs ciment, enduits intérieur terre
CIMENT + BAC ACIER				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : min = 2,50 m / max = 3,00 m	- Murs en plots de ciment - toiture bac acier - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment
CIMENT + DALLE BETON				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : 2,80 m	- Murs en plots de ciment - Toiture dalle béton 20 cm - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment
CIMENT + TOITURE PAILLE				L x l = 6m x 4 m Hauteur Sous Plafond : 2,80 m	- Murs en plots de ciment - Toiture paille, épaisseur 10 cm - Enduits extérieurs et intérieurs en ciment

1.3. Traitement des résultats obtenus

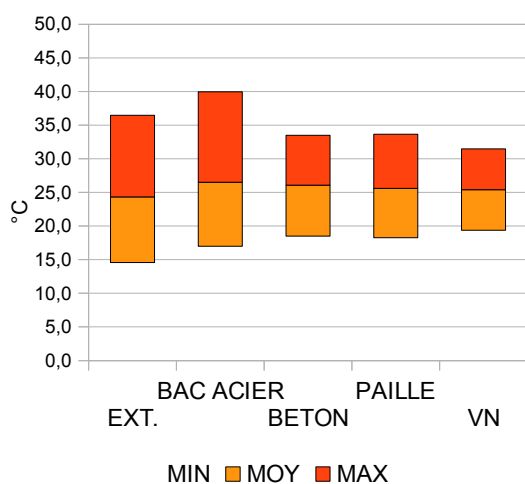
Système de ventilation :	Ventilateur mécanique type : ventilateur sur pied ou ventilateur plafonnier, puissance installée : 100 W / m ² sur réseau électrique
Calcul des besoins de ventilation :	Fonctionnement du ventilateur lorsque la température intérieure simulée est supérieure ou égale à 32°C. Modulation de la vitesse du ventilateur en fonction de la température intérieure : 32°C : 20 % ; 33°C : 30 % ; 34°C : 50 % ; 35°C : 70 % ; 36°C : 90 % ; 37°C et plus : 100 % Application des facteurs d'émissions du mix de production d'électricité sénégalais
Système de climatisation :	Climatiseur type SPLIT (COP moyen annuel = 2) sur réseau électrique Rendement de régulation : 80 %
Calcul des besoins de climatisation :	Modélisation des besoins utiles de froid d'après simulation thermique dynamique, charges idéales, thermostat entre 20°C et 32°C. Application du rendement de régulation, du COP du système et des facteurs d'émissions du mix de production d'électricité sénégalais
Mix de production d'électricité :	Mix de production d'électricité sénégalais : 88,9 % thermique, 8,4 % hydro, 1,8 % bagasse, coques d'arachide, 0,1 % solaire Source : SIE – Système d'Information Energétique du Sénégal, rapport 2010
Facteurs d'émissions de source d'énergie :	3,45 MJ d'énergie primaire non renouvelable / MJ Énergie finale 0,25 kg CO ₂ / MJ Énergie finale Source : Calcul d'après « Données Ecobilans dans la construction, KBOB/Eco-bau/IPB, état de juillet 2012 »

2. RESULTATS OBTENUS

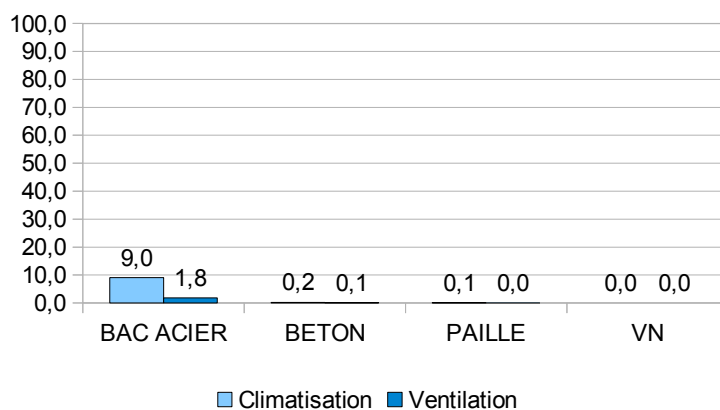
2.1. DAKAR

	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	14,6	17,0	18,5	18,2	19,3
Température moyenne (°C)	24,3	26,5	26,1	25,6	25,4
Température maximale (°C)	36,5	39,9	33,5	33,7	31,5
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	1%	14%	1%	1%	0%
Besoins froid max. (kW)	-	2,22	0,34	0,39	0,00
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	34,6	0,7	0,3	0,0
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	9,03	0,19	0,08	0,00
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	7,0	0,3	0,2	0,0
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	1,83	0,08	0,04	0,00
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	1320	675	179	289	98
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	15%	8%	2%	3%	1%

Températures
minimale, moyenne, maximale

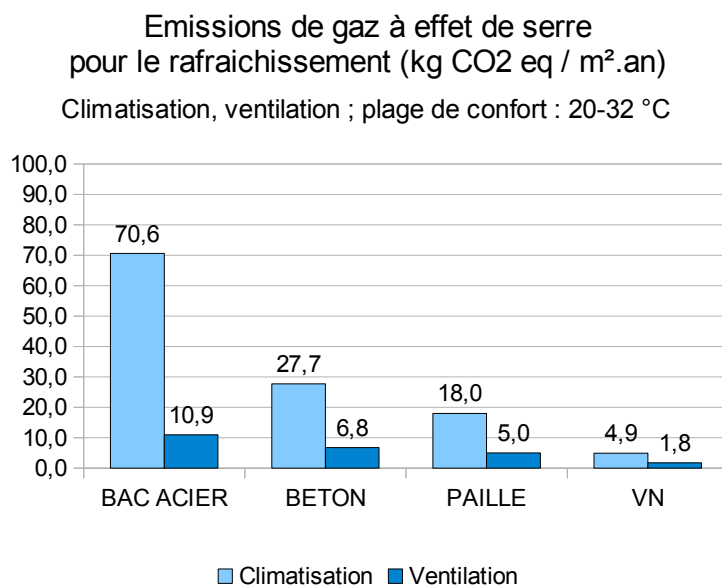
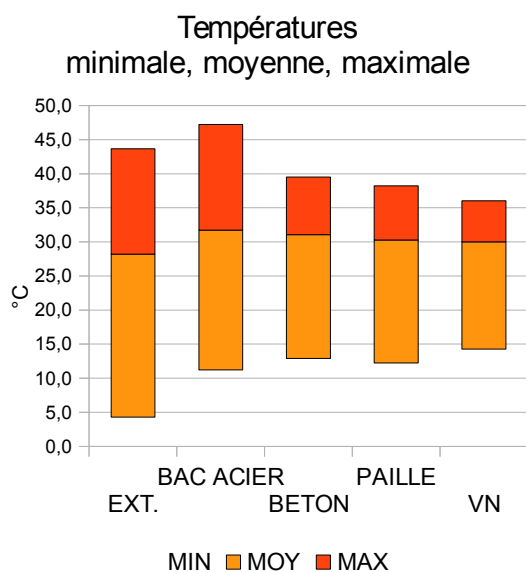


Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraichissement (kg CO2 eq / m².an)
Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C



2.2. DIOURBEL

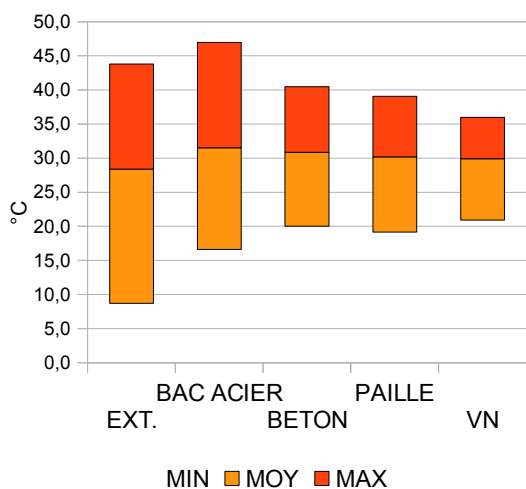
	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	4,3	11,2	12,9	12,2	14,3
Température moyenne (°C)	28,2	31,7	31,1	30,3	30,0
Température maximale (°C)	43,7	47,2	39,5	38,2	36,0
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	28%	47%	42%	36%	21%
Besoins froid max. (kW)	-	3,91	2,22	1,95	1,48
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	270,6	106,3	68,9	18,8
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	70,58	27,73	17,97	4,91
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	41,9	26,0	19,1	6,8
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	10,93	6,78	4,97	1,77
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	725	87	12	21	8
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	8%	1%	0%	0%	0%



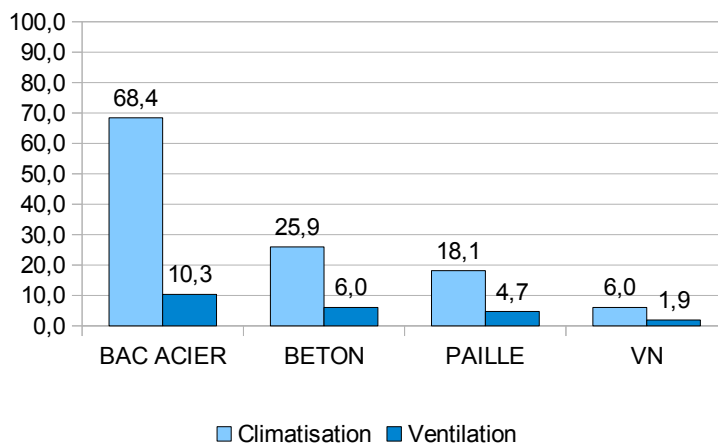
2.3. KAOLACK

	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	8,7	16,6	20,0	19,2	20,9
Température moyenne (°C)	28,4	31,5	30,9	30,2	29,9
Température maximale (°C)	43,8	47,0	40,5	39,0	36,0
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	27%	45%	39%	34%	21%
Besoins froid max. (kW)	-	4,03	2,06	1,64	1,52
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	262,1	99,3	69,5	23,2
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	68,37	25,91	18,12	6,04
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	39,6	22,9	17,9	7,1
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	10,34	5,98	4,67	1,86
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	554	89	1	13	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	6%	1%	0%	0%	0%

Températures
minimale, moyenne, maximale

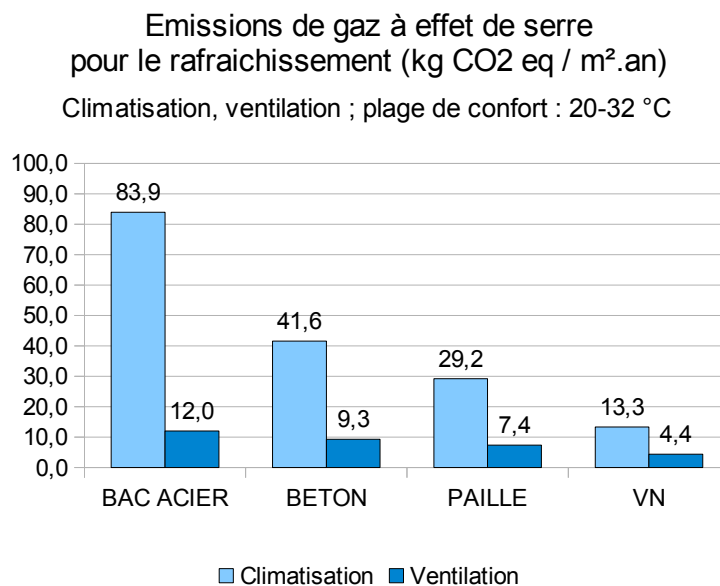
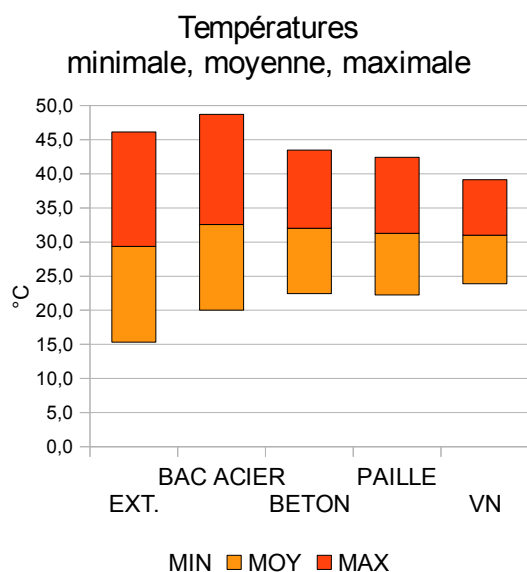


Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraîchissement (kg CO2 eq / m².an)
Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C



2.4. LINGUERE

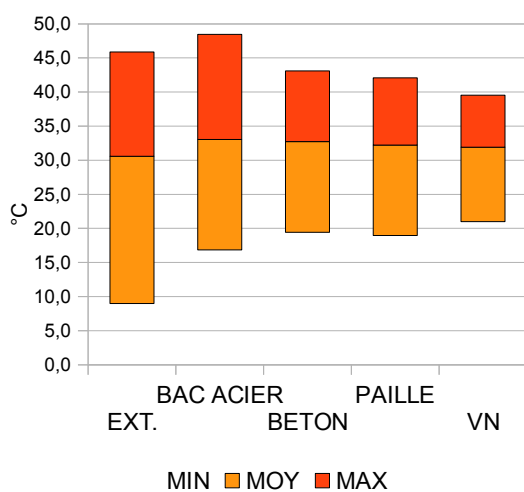
	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	15,3	20,0	22,4	22,2	23,9
Température moyenne (°C)	29,4	32,6	32,0	31,3	31,0
Température maximale (°C)	46,2	48,7	43,5	42,4	39,1
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	32%	50%	50%	44%	35%
Besoins froid max. (kW)	-	4,66	3,02	2,52	1,53
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	321,7	159,4	111,9	51,0
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	83,92	41,58	29,18	13,31
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	46,1	35,6	28,3	16,8
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	12,02	9,29	7,38	4,38
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	322	3	0	0	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	4%	0%	0%	0%	0%



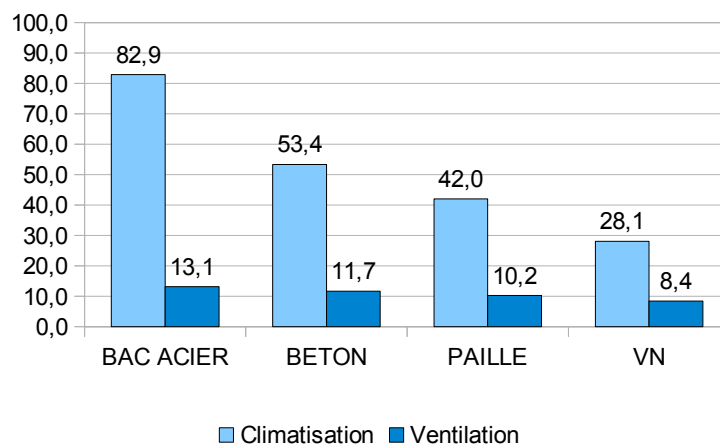
2.5. MATAM

	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	9,0	16,8	19,4	18,9	21,0
Température moyenne (°C)	30,6	33,0	32,7	32,2	31,9
Température maximale (°C)	45,9	48,4	43,1	42,1	39,5
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	41%	56%	59%	54%	50%
Besoins froid max. (kW)	-	4,21	2,70	2,32	1,60
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	317,8	204,7	161,0	107,7
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	82,90	53,39	41,99	28,08
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	50,3	44,9	39,2	32,3
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	13,12	11,72	10,23	8,43
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	373	68	4	6	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	4%	1%	0%	0%	0%

Températures
minimale, moyenne, maximale



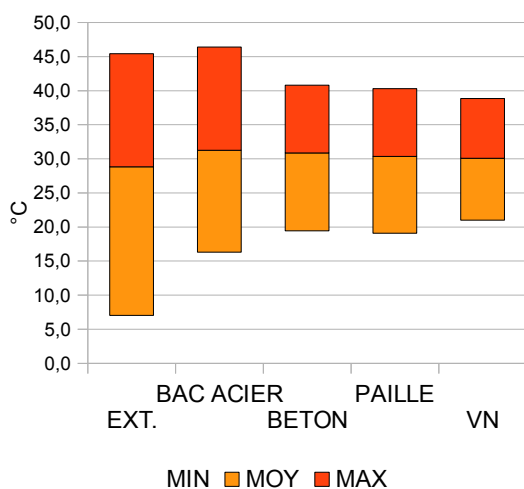
Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraîchissement (kg CO2 eq / m².an)
Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C



2.6. PODOR

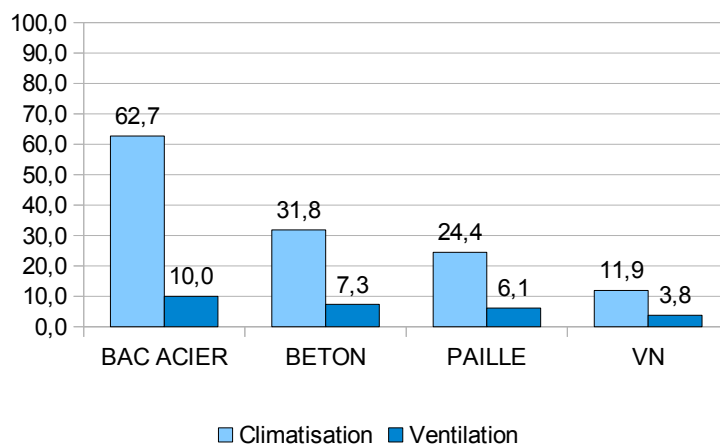
	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	7,0	16,3	19,4	19,1	21,0
Température moyenne (°C)	28,8	31,3	30,9	30,4	30,1
Température maximale (°C)	45,4	46,4	40,8	40,3	38,9
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	31%	44%	41%	37%	30%
Besoins froid max. (kW)	-	3,90	2,34	2,14	1,82
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	240,5	122,0	93,6	45,6
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	62,73	31,84	24,41	11,89
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	38,2	27,9	23,5	14,4
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	9,95	7,28	6,13	3,76
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	373	68	4	6	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	4%	1%	0%	0%	0%

Températures
minimale, moyenne, maximale



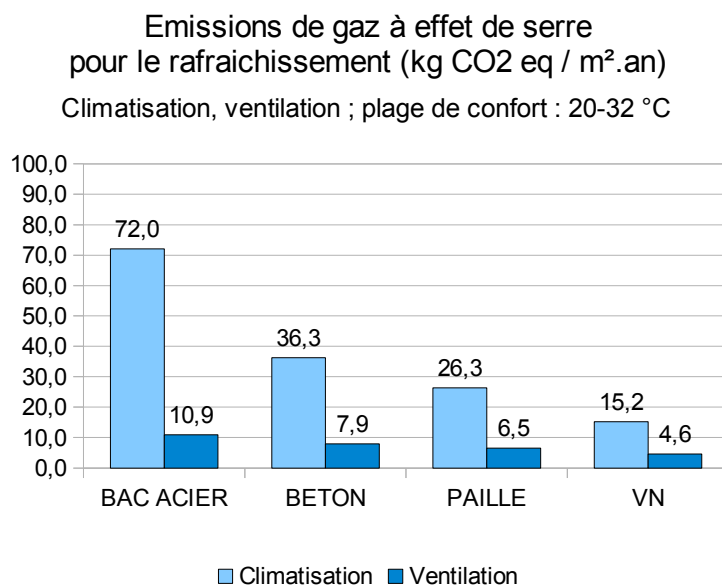
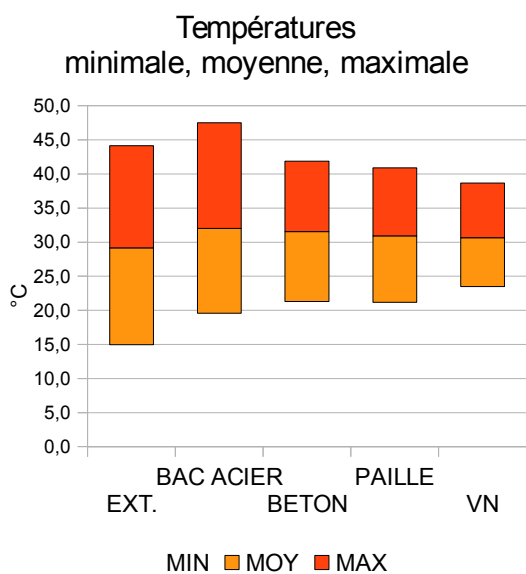
Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraichissement (kg CO2 eq / m².an)

Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C



2.7. TAMBACOUNDA

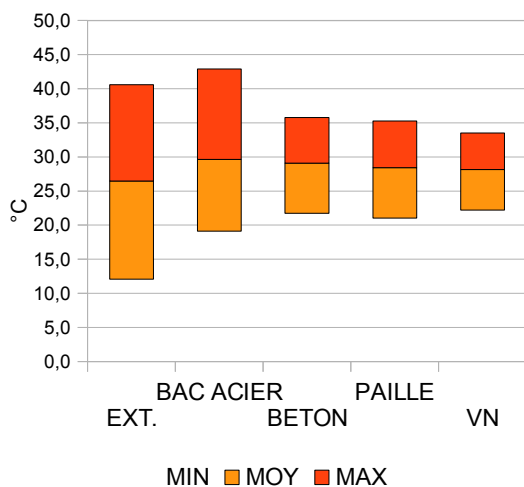
	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	15,0	19,6	21,3	21,2	23,5
Température moyenne (°C)	29,2	32,0	31,5	30,9	30,6
Température maximale (°C)	44,1	47,5	41,9	40,9	38,7
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	29%	48%	45%	39%	33%
Besoins froid max. (kW)	-	4,50	2,61	2,16	1,69
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	276,1	139,1	100,9	58,1
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	72,03	36,29	26,33	15,16
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	41,7	30,4	25,0	17,6
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	10,89	7,94	6,52	4,58
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	214	11	0	0	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	2%	0%	0%	0%	0%



2.8. ZIGUINCHOR

	EXTERIEUR	CIMENT + BAC ACIER	CIMENT + DALLE BETON	CIMENT + TOITURE PAILLE	VOÛTE NUBIENNE
TEMPERATURES					
Température minimale (°C)	12,1	19,1	21,7	21,0	22,2
Température moyenne (°C)	26,5	29,7	29,1	28,4	28,2
Température maximale (°C)	40,6	42,9	35,8	35,3	33,5
CLIMATISATION					
% du temps d'inconfort (température > 32°C)	14%	33%	20%	14%	1%
Besoins froid max. (kW)	-	2,82	0,92	0,81	0,49
Energie primaire climatisation (kWh ep / m².an)	-	149,1	22,8	11,8	0,4
Emissions CO2 eq Climatisation (kgCO2 eq / m².an)	-	38,90	5,94	3,08	0,12
VENTILATION					
Energie primaire ventilation (kWh ep / m².an)	-	26,6	6,4	4,0	0,2
Emissions CO2 eq ventilation (kgCO2 eq / m².an)	-	6,95	1,68	1,05	0,05
CHAUFFAGE					
Nb d'heure d'inconfort (température < 20°C)	514	20	0	0	0
% du temps d'inconfort (température < 20°C)	6%	0%	0%	0%	0%

Températures
minimale, moyenne, maximale



Emissions de gaz à effet de serre
pour le rafraîchissement (kg CO2 eq / m².an)

Climatisation, ventilation ; plage de confort : 20-32 °C

