



HAL
open science

Estimation de l'émission de CO₂ d'habitat typique à Madagascar par l'Analyse de Cycle de Vie

Mino Patricia Randrianarison

► **To cite this version:**

Mino Patricia Randrianarison. Estimation de l'émission de CO₂ d'habitat typique à Madagascar par l'Analyse de Cycle de Vie. Sciences de l'environnement. Université d'Antananarivo; Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE), 2011. Français. NNT: . tel-03090559

HAL Id: tel-03090559

<https://hal.science/tel-03090559>

Submitted on 29 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

Département Science des Matériaux et Métallurgie



THESE EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME
DE DOCTORAT NOUVEAU REGIME

Présentée et soutenue par :

RANDRIANARISON Mino Patricia

le 30 mars 2011

**ESTIMATION DE L'EMISSION DE CO₂
D'HABITAT TYPIQUE A MADAGASCAR
PAR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE**

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

Département Science des Matériaux et Métallurgie



Thèse en vue de l'obtention de diplôme de Doctorat Nouveau
Régime

Présentée et soutenue par :

RANDRIANARISON Mino Patricia

le 30 mars 2011

**ESTIMATION DE L'EMISSION DE CO₂
D'HABITAT TYPIQUE A MADAGASCAR
PAR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE**

Président : ANDRIANARY Philippe, Professeur, Directeur de l'ESPA.

Directeur de thèse : RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO Bienvenue,
Professeur titulaire, ESPA.

Rapporteur interne : RAKOTOMARIA Etienne, Professeur Emérite.

Rapporteur externe : ADELARD Laetitia, Maître de Conférences, Université de La Réunion.

Examineurs :

- GATINA Jean Claude, Professeur, Université de La Réunion.
- RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur, ESPA.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Département Sciences des Matériaux et Métallurgie de l'Ecole Supérieure d'Antananarivo (ESPA), en collaboration avec l'Université de La Réunion.

Je remercie profondément, le Professeur Philippe ANDRIANARY, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de le présider.

J'exprime ma reconnaissance à :

- Bienvenue RANAIVO-RABEHAJA, Professeur titulaire de l'ESPA pour avoir dirigé ce travail et pour les conseils et les remarques constants pour les années de recherches.
- Laetitia ADELARD, Maître de Conférences à l'Université de La Réunion en voulant de codiriger cette thèse.

Je suis reconnaissante au Professeur Jean Claude GATINA, de l'Université de La Réunion, pour sa disponibilité, ses orientations, la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant au sein de son laboratoire pendant mes séjours à La Réunion et en acceptant d'être jury actuellement.

Je tiens également à remercier :

- le Professeur Emérite RAKOTOMARIA Etienne,
 - le Professeur Gabriely Velomanantsoa RANAIVONIARIVO, Responsable de la Formation Doctorale au sein de notre Département,
- en acceptant d'être jury pour cette soutenance de thèse.

Je tiens également à adresser mes vives reconnaissances :

- à Monsieur RAKOTOMALALA Mamy Alain, Enseignant à l'ESPA pour son aide et ses conseils,
- au Corps Enseignants de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et plus particulièrement le Département Sciences des Matériaux et Métallurgie.

Enfin, je remercie tous ceux et celles que nous ne pouvons tous citer ici et qui n'ont cessé de nous apporter un quelconque soutien pour ce travail.

Merci à tous et que Dieu vous bénisse.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	17
INDEX DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	8
LISTE DES TABLEAUX	10
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES ANNEXES	16
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	17
PARTIE I : ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES.....	20
CHAPITRE 1 : ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES : HABITAT HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE (HQE) ET ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)	21
I. HABITAT HQE	21
I.1. L'ASSOCIATION HQE	21
I.2. LA DEMARCHE HQE	21
I.2.1. Définition.....	21
I.2.2. Les quatorze " cibles " de la HQE	22
I.2.3. Techniques et procédés pour une démarche HQE.....	24
II. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)	24
II.1. INTRODUCTION	24
II.2. DEFINITION	25
II.3. OBJET DE L'ACV	26
II.4. DEFINITION DE L'OBJECTIF ET DU CHAMP D'ETUDE	27
II.4.1. Unité Fonctionnelle	27
II.4.2. Frontières des systèmes.....	27
II.5. INVENTAIRE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	28
II.5.1. Définition du flux.....	28
II.5.2. Modes opératoires de collecte.....	29
II.6. L'EVALUATION DES IMPACTS	29
II.6.1. Notion d'impact	29
II.6.2. Classes d'impact.....	29
II.6.3. Effet de serre.....	30
II.6.4. Interprétation des résultats.....	35
I. LES METHODOLOGIES ADOPTEES EN JAPON ET EN INDE	36
I.1. EN JAPON.....	36
I.1.1. Les différents types d'habitation.....	36
I.1.2. Produits considérés	37
I.1.3. METHODES DE CALCUL.....	37
I.1.4. Résultats.....	38
I.2. EN INDE	38
I.2.1. Modèle d'habitation.....	38
I.2.2. Méthode de calcul.....	39
I.2.3. Résultats.....	39
II. LES OUTILS.....	40
II.1. BEES	40
II.1.1. Modélisation BEES	40
II.1.2. Résultats proposés.....	41
II.1.3. Conclusion	41

II.2. EQUER.....	41
II.2.1. Méthode de calcul.....	41
II.2.2. Résultats proposés.....	42
II.2.3. Analyse.....	42
PARTIE II : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE L'HABITAT	44
CHAPITRE 1 : METHODOLOGIE ADOPTEE POUR NOTRE ETUDE.....	45
I. ACV DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	46
I.1. ACQUISITION DES MATIERES PREMIERES	46
I.2. TRANSPORT DES MATIERES PREMIERES	46
I.3. PRODUCTION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	47
II. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT	47
II.1. TRANSPORT DES MATERIAUX	49
II.2. MISE EN ŒUVRE.....	50
II.3. ENTRETIEN ET MAINTENANCE	50
II.4. FIN DE VIE.....	50
III. FONCTIONNEMENT DE L'HABITAT	50
III.1. EMISSIONS DE CO ₂ ENGENDREES PAR LE FONCTIONNEMENT DE L'HABITAT	51
III.2. METHODE DE CALCUL	53
CHAPITRE 2 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES MATERIAUX.....	54
I. PRESENTATION DES MATERIAUX ET PROCEDES DE FABRICATION	54
I.1. MATERIAUX DE TERRE CUITE.....	55
I.1.1. Fabrication artisanale de briques	55
I.1.2. Fabrication semi-industrielle de briques.....	59
I.2. BRIQUES STABILISEES	64
I.3. LE BOIS	64
I.4. CHAUX	65
I.5. CIMENT ET PRODUITS A BASE DE CIMENT	66
I.6. ACIER.....	67
I.7. VERRE.....	68
II. LES FACTEURS D'EMISSION.....	68
II.1. LES PARAMETRES	68
II.2. LES VALEURS DES FACTEURS D'EMISSION.....	69
II.2.1. Ciment.....	69
II.2.2. Granulats.....	70
II.2.3. Produits à base de ciment : parpaings	70
II.2.4. Matériaux de terre cuite.....	70
II.2.5. Briques stabilisées.....	72
II.2.6. Acier	72
II.2.7. Emission en gaz carbonique de la chaux	73
II.2.8. Emission en gaz carbonique du verre	74
II.2.9. Emission de gaz carbonique causée par le travail du bois.....	74
II.2.10. Les valeurs des facteurs d'émission des matériaux retenues dans cette étude	75
CHAPITRE 3 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT	79
I. MODE DE CALCUL	81
I.1. PHASE DE PRODUCTION DES MATERIAUX	82
I.2. TRANSPORT DES ELEMENTS I, DES USINES DE PRODUCTION VERS LE CHANTIER OU LE TYPE D'OUVRAGE FONCTIONNEL J SERA MIS EN ŒUVRE	83
I.2.1. Transport maritime	83
➤ Hypothèses et sources de données concernant le transport maritime.....	83

1.2.2. Transport terrestre.....	85
➤ Hypothèses et sources de données concernant le transport terrestre	85
I.3. PHASE DE MISE EN ŒUVRE DU TYPE D'OUVRAGE FONCTIONNEL J	87
I.4. PHASE DE MAINTENANCE OU D'ENTRETIEN	88
➤ Hypothèses et sources de données concernant la distance entre le chantier et le lieu de traitement ou valorisation des déchets	88
I.5. PHASE DE DEPOSE OU DEMOLITION	90
1.6. EMISSION TOTALE EN CO ₂ RELATIVE A CHAQUE TYPE D'OUVRAGE FONCTIONNEL PENDANT SON CYCLE DE VIE	91
II. LES OUVRAGES FONCTIONNELS.....	91
II.1. LA TOITURE	91
II.1.1. FONCTION ET ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA TOITURE	91
II.1.2. Les différents types de toiture.....	91
II.1.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF toiture.....	98
II.2. LE MUR.....	99
II.2.1. Fonction et éléments constitutifs du mur	99
II.2.3. Revêtements muraux	102
II.2.4. Quantités des matériaux	103
II.2.6. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF mur.....	106
II.3. LA FONDATION	107
II.3.1. Fonction.....	107
II.3.2. Les différents types de fondation.....	107
II.3.3. Quantités de matériaux.....	111
II.3.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF fondation	114
II.4. PLANCHERS HAUTS ET PLANCHERS BAS	115
II.4.1. Fonction et éléments constitutifs du plancher.....	115
II.4.2. Les différents types de plancher.....	117
II.4.3. Quantités des matériaux	118
II.4.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF plancher.....	120
II.4.5. Revêtement supérieur du plancher	121
II.4.7. Revêtement inférieur ou faux-plafond.....	124
II.5. OUVRAGES D'OUVERTURE ET DE FERMETURE	126
II.5.1. Fonction et éléments constitutifs.....	126
CHAPITRE 4 : FONCTIONNEMENT.....	131
I. LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE.....	131
I.1. L'ELECTRICITE	132
I.2. BOIS DE CHAUFFE ET CHARBON DE BOIS	133
I.3. COMBUSTIBLES FOSSILES	134
II. LES DIFFERENTES ACTIVITES RESIDENTIELLES NECESSITANT DE L'ENERGIE	135
II.1. CUISSON	135
II.2. ECLAIRAGE	135
II.3. TRANSPORT	135
II.4. ALIMENTATION DES APPAREILS ELECTROMENAGERS ET INFORMATIQUES.	137
III. CONSOMMATION EN EAU	137
IV. LES DECHETS.....	138
IV.1. PRODUCTION DE DECHETS A MADAGASCAR	138
IV.2. LES FILIERES D'ELIMINATION ET DE TRAITEMENTS POSSIBLES DES DECHETS MENAGERS	138
V. METHODE DE CALCUL.....	140
V.1. CONSOMMATION EN EAU DOMESTIQUE	140
V.2. PRODUCTION DE DECHETS MENAGERS	140
V.3. EMISSION EN GAZ CARBONIQUE LIEE A LA CUISSON	141
V.4. EMISSION DE GAZ CARBONIQUE LIEE A L'ECLAIRAGE.....	142

V.5. EMISSION DE GAZ CARBONIQUE LIEE AU TRANSPORT	143
V.6. EMISSION LIEE A L'ALIMENTATION DES APPAREILS ELECTROMENAGERS ET INFORMATIQUES	144
PARTIE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET OUTIL	145
CHAPITRE 1 : RESULTATS RELATIFS A L'ENVELOPPE DU BATIMENT ET AU FONCTIONNEMENT	146
I. ENVELOPPE DU BATIMENT	147
I.1. TOITURE	147
<i>I.1.1. Résultats</i>	147
I.2. MUR.....	148
<i>I.2.1. Résultats</i>	149
<i>I.2.2. Interprétation</i>	149
I.3. FONDATION	150
<i>I.3.1. Résultats</i>	150
I.4. PLANCHER	151
<i>I.4.1. Résultats</i>	152
<i>I.4.2. Interprétation</i>	152
I.5. REVETEMENT SUPERIEUR DU PLANCHER.....	153
<i>I.5.1. Résultats</i>	153
I.6. REVETEMENT DU FAUX PLAFOND	154
<i>I.6.1. Résultats</i>	154
<i>I.6.2. Interprétation</i>	155
I.7. LES OUVERTURES	155
<i>I.7.1. Résultats</i>	156
<i>I.7.2. Interprétation</i>	158
II. FONCTIONNEMENT	160
II.1. CUISSON	160
<i>II.1.1. Résultats</i>	160
<i>II.1.2. Interprétation</i>	160
II.2. ECLAIRAGE.....	161
<i>II.2.1. Résultats</i>	161
<i>II.2.2. Interprétation</i>	161
II.3. TRANSPORT	162
<i>II.3.1. Résultats</i>	162
<i>II.3.2. Interprétation</i>	162
II.4. CONSOMMATION EN EAU ET PRODUCTION DE DECHET	162
<i>II.4.1. Résultats</i>	163
CHAPITRE 3 : ECO2H	165
I. PRESENTATION DE ECO2H	165
II. REALISATION D'ECO2H	166
II.1. DEMARCHE	166
II.2. MODELISATION DE ECO2H	167
III. RESULTATS OBTENUS	171
III.1. POINTS FAIBLES	172
III.2. POINTS FORTS.....	173
ANNEXE 1: LES AUTRES IMPACTS (AUTRES QUE LE CO ₂) DE L'ACV	177
ANNEXE 2 : LES DIFFERENTS TYPES DE MAISONS D'HABITATION A MADAGASCAR	181
ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES DES MENAGES MALGACHES.....	191
ANNEXE 4 : PROCESSUS DE FABRICATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	197
ANNEXE 5 : PROTOCOLE D'ENQUETE	227

ANNEXE 6 : LES CARACTERISTIQUES DES CENTRALES ET RESEAUX DU RIA (MIX ELECTRIQUE)..... 235
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 237

INDEX DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ACV : Analyse de Cycle de Vie.

ADEME : Agence de Développement pour la Maîtrise de l'Energie.

ANAE : Association Nationale pour l'Action Environnementale.

BC : Base Case.

BEES : Building for Environmental and Economic Sustainability.

CP : Common practice.

BRFL : Buildings and Fire Research Laboratory.

CEREN : Centre d'Essai et de Recherche de l'Entente Interdépartementale en vue de la protection de la forêt et de l'Environnement contre l'incendie ;

CHAUMAD : Chaux de Madagascar.

ECO2H : Emission en CO2 d'un Habitat.

ENA : Energies Nouvelles et Alternatives.

EICV : Evaluation des Impacts du Cycle de Vie.

GEMIS : Global Emission Model for Integrated System.

GEM : Groupes d'Eléments Majeurs.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GHG : Green House Gaz.

HQE : Habitat Haute Qualité Environnementale.

INERIS : Institut d'Evaluation des Risques Industriels.

ISO : International Standardisation Organisation.

NIST : National Institute of Standards and Technology.

OF : Ouvrages Fonctionnels.

OPU : Oxydé Pendant Utilisation.

PE1: Programme Environnemental 1.

PE2 : Programme Environnemental 2.

PE3 : Programme Environnemental 3.

PED : Pays en Développement.

REPA : Resource and Environment Profile Analysis .

SAF FJKM :Sahan'Asa Fampanandrosoana Fiangonan'i Jeso Kristy eto Madagasikara.

SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

SRC : Steel Reinforced Concrete.

UF : Unité Fonctionnelle.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Equivalence des GES et leurs durées de séjour approximatives dans l'atmosphère

Tableau 2 : Types et postes de consommation énergétique de la production artisanale locale de briques de terre cuite

Tableau 3 : Types et postes de consommation énergétique de la production semi-industrielle locale de briques en terre cuite

Tableau 4 : Types et postes de consommation énergétique de la production locale de produits dérivés du bois

Tableau 5 : Valeurs des facteurs d'émission en gaz carbonique retenues pour l'étude

Tableau 6: Unité Fonctionnelle pour chaque ouvrage fonctionnel.

Tableau 7 : Distances entre Le port de Toamasina et les ports de quelques pays fournisseurs de matériaux de construction

Tableau 8 : Ratio d'entretien des principaux corps d'état (pour 50 ans).

Tableau 9: Les différents types de toiture et leurs éléments constitutifs

Tableau 10 : Les trois types de mur et leurs éléments constitutifs

Tableau 11 : Les différents types revêtements muraux

Tableau 12: Les types de fondation et leurs éléments constitutifs

Tableau 13: Les dimensions courantes des solives

Tableau 14 : Les types de plancher et leurs éléments constitutifs

Tableau 15: Type de revêtement supérieur du plancher.

Tableau 16 : Type de faux-plafond.

Tableau 17 : Quantités des matériaux pour chaque type de porte et fenêtre.

Tableau 18 : Facteurs d'émission de quelques sources d'énergie.

Tableau 19 : Emission en gaz carbonique relative au transport par des véhicules particuliers.

Tableau 20: Emissions en gaz carbonique liées à l'éclairage.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la démarche HQE et ses 14 cibles

Figure 2 : Cycle de vie d'un produit

Figure 3 : Cadre méthodologique de l'ACV : les quatre étapes d'une ACV.

Figure 4 : Représentation de l'inventaire environnemental du système de produits.

Figure 5: Etape de classification des données d'inventaire par catégorie d'impact dans la phase d'évaluation d'impact.

Figure 6 : Pourcentage des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Figure 7 : Les frontières de l'Analyse de Cycle de Vie de l'habitat.

Figure 8 : ACV des matériaux de construction.

Figure 9 : Le bâtiment et ses ouvrages fonctionnels (OF).

Figure 10 : Les étapes de l'ACV de l'enveloppe du bâtiment.

Figure 11 Chaîne de processus de production d'énergie et postes de consommation énergétique de l'habitat type malgache.

Figure 12: Processus de fabrication artisanale de produits de terre cuite.

Figure 13: Moulage et des briques de terre avant cuisson.

Figure 14 : Four de cuisson pour les briques de terre.

Figure 15 : Processus élémentaires de la fabrication semi- industrielle de briques en terre cuite.

Figure 16: Four semi-industriel (briqueterie d'Ambohimena).

Figure 17 : Bois de feu utilisés pour source d'énergie pour la cuisson et le séchage (briqueterie d'Ambohimena).

Figure 18 : Les différents traitements de bois et les produits obtenus.

Figure 19 : Utilisation de la chaux dans la construction de bâtiment.

Figure 21 : Les différents traitements de bois et les produits obtenus.

Figure 20 : Produits à base de ciment et leurs utilisations dans le bâtiment.

Figure 21 : Utilisation de l'acier dans la construction de bâtiment.

Figure 22 : Les ouvrages fonctionnels avec les différents types de matériaux de construction.

- Figure 23: Comparaison des émissions entre les différents modes de transport.
- Figure 24 : Toiture avec couvertures en tuiles plates
- Figure 25 : Pose des tuiles plates sur lattis
- Figure 26 : Composants de la toiture en tôle
- Figure 27 : Toiture avec couverture en tôle.
- Figure 28: Composants de la toiture terrasse.
- Figure 29 : Plancher avec hourdis en terre cuite.
- Figure 30: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel toiture.
- Figure 31: Les composants du mur
- Figure 32 : L'adobe
- Figure 33: Appareillage des murs et cloison
- Figure 34 : blocs de béton ou parpaings
- Figure 35: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel mur
- Figure 36 : Semelles filantes.
- Figure 37 : Semelle filante en pierres maçonnées
- Figure 38 : Semelle en béton armé
- Figure 39: Semelles isolées
- Figure 40 : Le radier en béton armé
- Figure 41: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel fondation.
- Figure 42: Les différentes sortes de plancher d'une maison.
- Figure 43 : Eléments constitutifs du plancher
- Figure 44: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel plancher
- Figure 45 : Les éléments de départ et produits finaux du revêtement supérieur du plancher
- Figure 46 : Les éléments de départ et produits finaux du revêtement inférieur du faux plafond.
- Figure 47: Ouvertures avec volets et châssis vitrés en bois.
- Figure 48: Ouvertures avec châssis en aluminium.
- Figure 49: La décharge d'Antananarivo.
- Figure 50 : Feu allumé pour voir les déchets
- Figure 51: Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de toiture, sur une période de 50 ans.

Figure 52 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de toiture, sur une période de 50 ans

Figure 53 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de mur sur une période de 50 ans

Figure 54: Emission totale en gaz carbonique des différents types de mur sur une période de 50 ans.

Figure 55 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fondation, sur une période de 50 ans.

Figure 56 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de fondation sur une période de 50 ans.

Figure 57 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de plancher bas sur une période de 50 ans.

Figure 58 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de plancher bas, sur une période de 50 ans.

Figure 59: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de revêtement de plancher, sur une période de 50 ans.

Figure 60 : Émission totale en gaz carbonique des différents types de revêtement de plancher, sur une période de 50 ans.

Figure 61: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types d'habillages du plancher, sur une période de 50 ans.

Figure 62 : Émission totale en gaz carbonique des différents types d'habillage du plancher, sur une période de 50 ans.

Figure 63 : Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de porte, sur une période de 50 ans.

Figure 64: Émission totale en gaz carbonique des différents types de porte, sur une période de 50 ans.

Figure 65: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fenêtre, pour une période de 50 ans.

Figure 66 : Émission totale en gaz carbonique des différents types de fenêtre, sur une période de 50 ans.

Figure 67: Emission en gaz carbonique liée à la cuisson.

Figure 68: Emission en gaz carbonique liée à l'éclairage.

Figure 69: Emission en gaz carbonique liée au transport (pour d=1km).

Figure 70: Consommation en eau (litre/pers/an) et quantité de déchet produit (par pers/an).

Figure 71 : Page d'accueil de ECO2H.

Figure 72 : Interface relative à l'OF « fondation ».

Figure 73 : Interface relative à l'OF « mur ».

Figure 74 : Interface relative aux revêtements de l'OF mur.

Figure 75 : Interface relative à l'OF « plancher ».

Figure 76 : Interface relative aux revêtements de l'OF plancher.

Figure 77 : Interface relative à l'OF « toiture ».

Figure 78 : Interface relative à l'OF « ouverture ».

Figure 79 : Fenêtre présentant le fonctionnement d'un habitat.

Figure 80: Les résultats obtenus par ECO2H.

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : **Les autres impacts (autres que le CO₂) de l'ACV**

Annexe 2 : Les différents types de maisons d'habitation à Madagascar

Annexe 3 : Caractéristiques des ménages malgaches

Annexe 4 : **Processus de fabrication des matériaux** de construction

Annexe 5 : Protocole d'enquête

Annexe 6 : **Les caractéristiques des centrales et réseaux du RIA**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

A Madagascar, le taux de croissance démographique moyen actuel vaut 2,84%. La population malgache pourra dépasser les 32 millions d'habitants en 2030 [1]. Les besoins en logement vont donc s'accroître. Cela se traduit par des besoins croissants en matériaux de construction, en énergie et en eau potable. Les industries autour du bâtiment, de l'énergie devraient alors augmenter leur production. On devrait donc s'attendre à une croissance des rejets solides, liquides et gazeux dans l'atmosphère engendrés par les activités humaines.

Parallèlement à cela, Madagascar a mis parmi ses priorités la recherche de solutions aux questions environnementales qui préoccupent les autres nations du monde. C'est ainsi que notre pays a participé à la plupart des conventions internationales et en particulier, la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques qu'il a ratifiée en décembre 1998. Le pays s'est engagé à remplir des obligations, en particulier celle de contribuer à la stabilisation des émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Avant de parler de stabilisation et de réduction, il importe de connaître le niveau actuel des émissions de polluants.

A Madagascar, divers secteurs industriels ont fait l'objet d'étude d'émission de GES, plus particulièrement le gaz carbonique [2], [3], [4] et [5]. Les sources majeures d'émission sont les industries chimiques et para chimiques, textiles, agroalimentaires, des cuirs, papetières, la raffinerie de pétrole (45,31Gg de CO₂ en 2001), et les centrales thermiques (120,03Gg de CO₂ en 2001) et l'agriculture (7,03Gg de CO₂ en 2001). La circulation automobile figure également parmi les secteurs les plus polluants,

la part des émissions de CO₂ des échappements étant appréciable (495,15Gg de CO₂ en 2001) [3], [4] et [5].

Aucune investigation n'a été menée sur les émissions autour de l'habitat alors que plusieurs études tenant compte des spécificités locales ont été réalisées dans divers pays dans cette branche [6] et [7]. Cette étude s'inscrit dans l'objectif majeur de pallier à cette lacune, évaluer les rejets en CO₂ des habitats types de Madagascar, par la mise en œuvre d'une méthode et d'un outil de calculs qui prennent en compte le cycle de vie du bâtiment depuis l'extraction des matières premières pour la fabrication des matériaux de construction à sa démolition en fin de vie, en passant par son utilisation.

L'approche adoptée est donc l'Analyse de Cycle de Vie. Celle-ci est la plus utilisée au niveau international pour répondre au problème de l'évaluation des impacts environnementaux [8].

La première partie de ce document est consacré à la théorie sur la conception d'un habitat répondant aux exigences environnementales, sur l'outil d'évaluation environnementale qu'est l'Analyse de Cycle de Vie et sur diverses méthodes de calculs de CO₂ entreprises dans quelques pays.

Dans le premier chapitre, nous exposons les concepts fondamentaux de l'Habitat Haute Qualité Environnementale (HQE) et l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Dans le deuxième chapitre, nous présentons quelques méthodes de calculs d'émissions de CO₂ du bâtiment développées dans divers pays.

Nous développons dans la deuxième partie l'application de l'Analyse de Cycle de Vie.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie adoptée.

L'ACV des matériaux de construction est traité dans le second chapitre. Dans ce volet de l'étude, il s'agit de déterminer le facteur d'émission de chaque matériau. Les calculs se basent sur les processus de fabrication. Certaines des valeurs sont tirées des études menées à l'étranger tandis que d'autres sont estimées à partir d'enquêtes auprès des fabricants locaux.

Dans le troisième chapitre, nous exposons l'ACV de l'enveloppe du bâtiment. L'enveloppe du bâtiment est décomposée en ouvrages fonctionnels (OF). L'ACV porte sur chaque OF, depuis sa mise en œuvre jusqu'à sa fin de vie. La quantification des émissions en gaz carbonique est réalisée à chaque étape de cycle de vie. Des codes de calculs sont développés pour estimer la quantité de gaz carbonique émis par l'enveloppe du bâtiment.

Le fonctionnement du bâtiment est développé dans le quatrième chapitre. Les données sur les ménages sont celles publiées par l'INSTAT [1]. Lorsqu'elles font défaut, nous avons eu recours à des données étrangères [9]. Des codes de calculs sont établis pour quantifier l'émission en gaz carbonique pendant le fonctionnement de l'habitat.

Le premier chapitre de la troisième partie expose les résultats concernant les émissions en gaz carbonique selon les concepts généraux de l'ACV, c'est-à-dire par unité fonctionnelle.

Le second chapitre présente un outil permettant de calculer l'émission en gaz carbonique d'un habitat quelconque, outil dénommé ECO2H. Il permet également d'évaluer la consommation en eau et la production de déchets d'un ménage.

PARTIE I : ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE 1 : ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES : HABITAT HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE (HQE) ET ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

En 1992, au Sommet de la Terre de Rio, le Plan d'Action appelé Agenda 21 est adopté. Le développement durable s'appuie alors sur des approches écologiques, économiques et sociales. En juin 1996, les Nations Unies organisaient à Istanbul une grande conférence sur les Etablissements Humains : « Habitat » [10]. Depuis cette conférence, la préoccupation environnementale appliquée à l'urbanisme et à l'architecture a donné naissance à diverses méthodes dans plusieurs pays européens.

Concernant l'habitat, la France a élaboré la HQE, la Suisse la MINERGIE, l'Allemagne le PASSIVHAUS et l'Autriche le TOTAL QUALITY. En dehors de l'Europe, les Etats-Unis ont adopté le US Green Building Council, la Chine le HK-BSE et le Japon le CASBEE.

I. Habitat HQE

I.1. L'association HQE

Créée en 1997, l'association HQE regroupe les acteurs du bâtiment dans le but de développer la qualité environnementale des bâtiments de manière concertée [11]. L'association se définit comme un lieu d'échanges, de concertation, d'information, de formation et d'action. Elle est composée d'organismes publics ou collectifs représentant l'ensemble des acteurs du bâtiment comme les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises, fabricants de produits de construction [12].

I.2. La Démarche HQE

I.2.1. Définition

L'objectif majeur de la démarche HQE est de réduire les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables [11].

Les impacts environnementaux d'un bâtiment conçu, réalisé selon une démarche de qualité sont durablement minimisés. Cela, aussi bien par le choix des matériaux de construction, que par la prise en compte de la gestion et de la maintenance du bâtiment, éventuellement de sa déconstruction [9].

I.2.2. Les quatorze " cibles " de la HQE

Une liste précise de 14 cibles a été établie. Ces cibles s'appliquent à tous les types de bâtiments, neufs ou existants. Ces cibles sont tirées du document suivant : " Définition des cibles de la Haute Qualité Environnementale des bâtiments " [11]. Nous avons représenté ces cibles sur la [figure 1](#).

Cette liste comprend actuellement 14 cibles divisées en 4 familles ; l'écoconstruction et l'écogestion regroupent les cibles de maîtrise des impacts sur l'environnement extérieur.

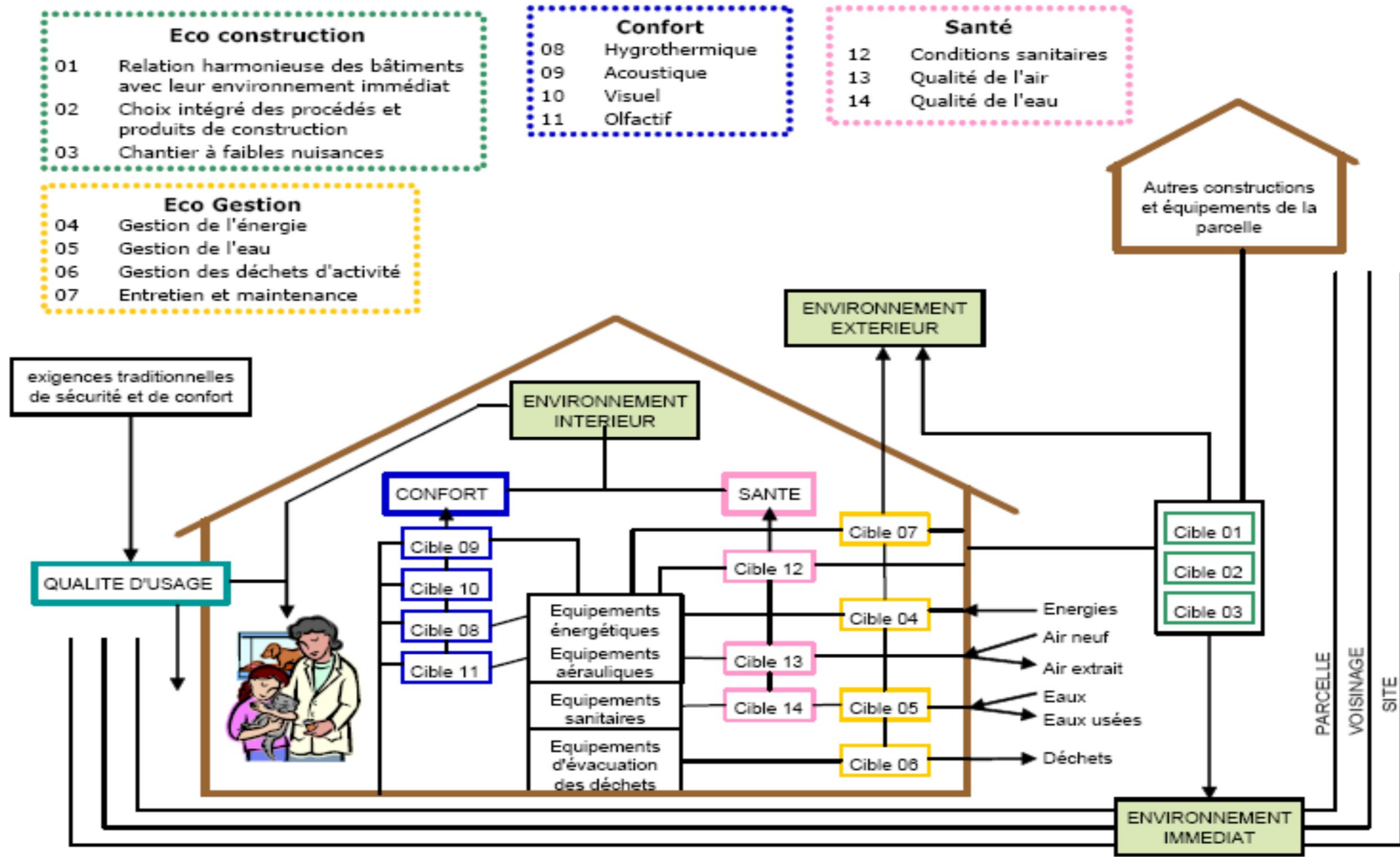


Figure 1 : Présentation de la démarche HQE et ses 14 cibles [13].

I.2.3. Techniques et procédés pour une démarche HQE

Ces démarches participent à une maturation des réflexions sur l'approche la plus pertinente et la plus adaptée pour arriver à concevoir et réaliser des bâtiments où qualité et respect de l'environnement ont été pris en compte de manière optimale [11].

La HQE vise à garantir la réduction des consommations d'énergie, le confort des usagers et la salubrité des locaux, une meilleure qualité d'usage dans la durée, la diminution des consommations d'eau et la diminution des émissions des gaz à effet de serre tel le gaz carbonique. D'autres évaluations pourront également élargir l'approche énergétique et de quantifier les impacts les plus significatifs des bâtiments sur leur environnement [11].

A Madagascar, même si une démarche analogue à la HQE n'existe pas encore, le gouvernement malgache a inclus parmi ses priorités la recherche des solutions relatives à « la réconciliation de l'homme avec son environnement ». Depuis lors, le pays s'est efforcé de se doter d'outils politiques, juridiques et institutionnels de gestion des ressources naturelles et de l'environnement comme la Charte sur l'environnement malgache (1990). Son application a abouti à la mise en œuvre des programmes environnementaux PE1, PE2 et à la conception du PE3 [4] et [14]. Elle traite des aspects généraux, aucune recommandation spécifique sur le secteur bâtiment. Cependant, les projets de construction de grande envergure doivent faire l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement alors que le critère de performance environnemental n'est pas encore intégré dans le choix des matériaux dans le cas de maisons individuelles.

L'étude peut être réalisée sur le cycle de vie d'un habitat par la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), depuis la fabrication des matériaux jusqu'à la destruction du bâtiment en passant par le transport, la construction, l'entretien et le fonctionnement. L'ACV est une technique d'évaluation environnementale parfaitement adaptée à la cible 2 et donne des repères aux cibles 4, 6 et 7 (figure 1).

II. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

II.1. Introduction

L'origine de l'ACV remonte à la fin des années 60, où des chercheurs américains, anglais, suédois et suisses développent des modèles pour analyser l'utilisation de

matériaux bruts et d'énergie associée à des systèmes de production. Progressivement, ces modèles (comme modèle américain REPA : « Resource and Environment Profile Analysis » considèrent une gamme de plus en plus large d'aspects environnementaux [15]. Dans le contexte des deux crises énergétiques des années 70, la plupart des études se focalisent uniquement sur l'efficacité énergétique des systèmes. C'est à la fin des années 80 que l'intérêt pour la méthodologie ACV renaît, poussé par la problématique des déchets solides. Des méthodes diverses et variées se développent pour évaluer des impacts sur l'environnement engendrés par les émissions, les consommations d'énergie et la production de déchets solides.

Un colloque du SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) [16] en 1992 en Floride permet l'élaboration du premier cadre de la phase d'évaluation d'impact de l'ACV sur la base de concepts clés :

- l'usage de catégories clairement explicitées pour l'évaluation,
- une procédure en plusieurs étapes clairement identifiées,
- une première tentative pour utiliser des mécanismes basés sur des connaissances scientifiques afin de décrire les catégories d'impact et
- l'usage de facteurs d'équivalence pour chaque catégorie pour convertir des paramètres unitaires selon une base commune afin de pouvoir les agréger.

II.2. Définition

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil utilisé pour évaluer l'impact environnemental potentiel d'un produit, d'un processus ou d'une activité tout au long de son cycle de vie en quantifiant l'utilisation des ressources (des "inputs" tels que l'énergie, les matières premières et l'eau) et les émissions environnementales (les "outputs" dans l'air, l'eau et le sol) associées au système évalué [17]. L'ACV traite uniquement des impacts environnementaux d'un produit (système), ignorant ainsi les aspects financiers, politiques, sociaux et autres (figure 2).

La notion de cycle de vie d'un produit induit la connaissance des cinq étapes suivantes [17] :

- acquisition des ressources,
- fabrication du produit,
- distribution,

- utilisation et
- fin de vie.

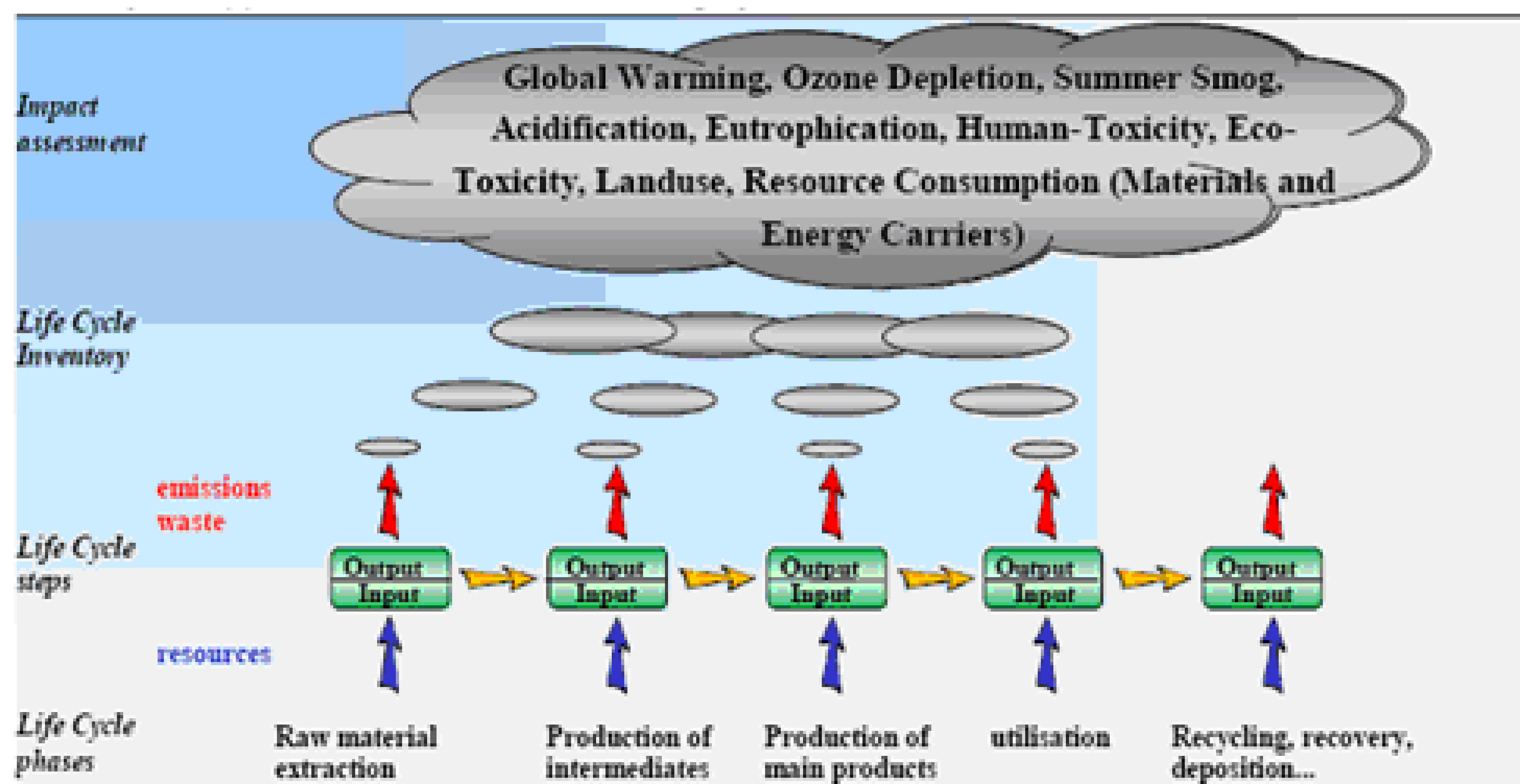


Figure 2 : Cycle de vie d'un produit

II.3. Objet de l'ACV

Selon l'ISO 14040 [17], l'ACV est « une technique d'évaluation des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiels associées à un système de produits, par :

- compilation d'un inventaire des entrants et des sortants pertinents d'un système de produits,
- évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à ces entrants et à ces sortants,
- interprétation des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation d'impact par rapport aux objectifs de l'étude.

Pour la mise en œuvre de la méthode, un cadre méthodologique a été défini et comprend quatre étapes (figure 3) et formalisé en normes ISO 14040 à 14043 [17], [18], [19] et [20].

Les normes ISO 14041 à 14043 ont été revues et remplacées par la norme ISO 14044 en 2006 [21].

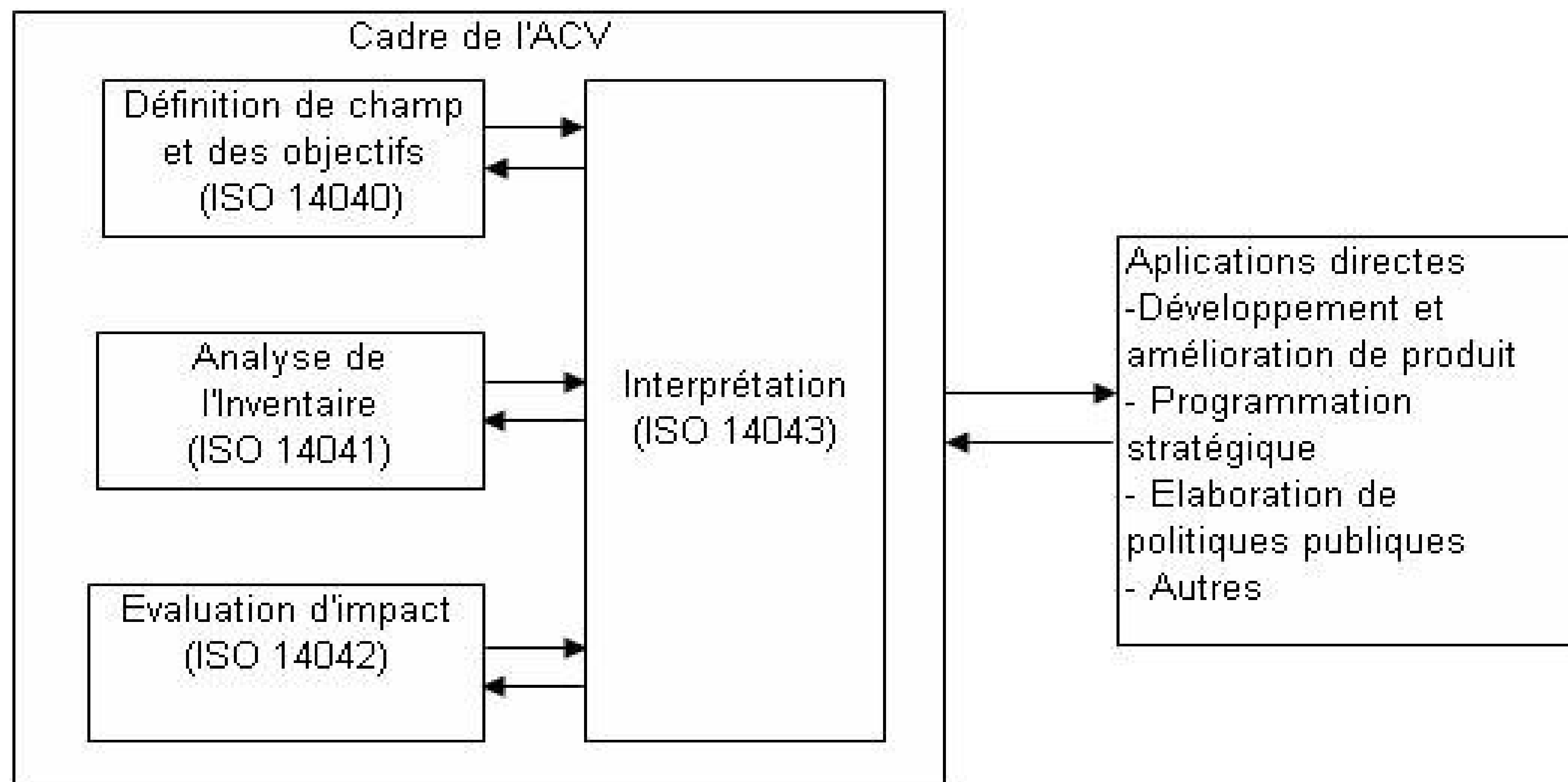


Figure 3 : Cadre méthodologique de l'ACV : les quatre étapes.

II.4. Définition de l'objectif et du champ d'étude

Un des objectifs de l'ACV est de comparer différentes alternatives, à savoir scénarios ou (étapes de) systèmes de produits assurant la (les) même(s) fonction(s).

II.4.1. Unité Fonctionnelle

Une « Unité Fonctionnelle » UF appropriée est construite à partir de l'évaluation des fonctions remplies. Elle permet de mesurer, pour chaque processus du système de produits, une quantité de produit, procédé ou service de référence, appelée unité de référence UR, qui remplit la fonction considérée.

L'UF est composé d'un chiffre et d'une unité et peut être avec des spécifications spatiales et/ou temporelles.

Exemple : 1 kg d'acier produit en Allemagne, 1m² de toiture pour une période de 50 ans.

II.4.2. Frontières des systèmes

Il est indispensable de préciser le niveau de détail auquel on veut parvenir. Ainsi, parmi les quantités entrantes et sortantes, on retrouve aussi des produits, dont les processus

d'utilisation, traitement ou de production ne sont pas considérés, leur contribution n'étant pas significative.

II.5. Inventaire d'analyse du cycle de vie

II.5.1. Définition du flux

L'étape d'inventaire d'analyse du cycle de vie ICV consiste à inventorier tous les flux à l'intérieur et à l'extérieur du système à l'étude. Cette étape est normalisée et décrite par la norme ISO 14041 [18].

Les ressources consommées et les émissions dans l'air, l'eau et le sol sont quantifiées pour chaque étape du *cycle de vie* du produit. Une fois quantifiées, ces *données d'inventaire* telles les émissions et les ressources sont agrégées tout au long du cycle de vie et exprimées par *unité fonctionnelle*. Chaque donnée présente originellement des caractéristiques spatiale (limite d'émission) et temporelle (moment d'émission) (figure 4).

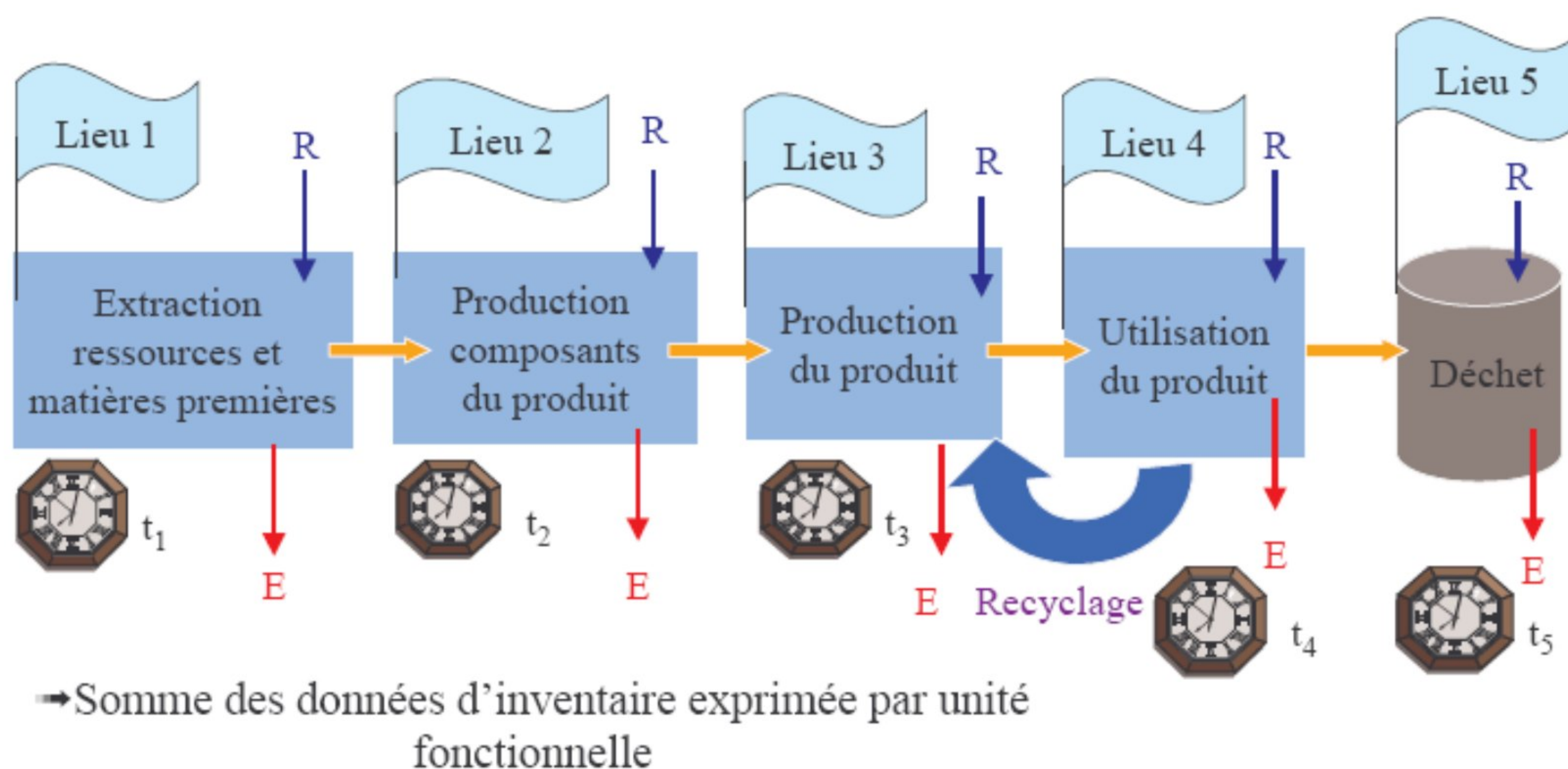


Figure 4 : Représentation de l'inventaire environnemental (R : ressources consommées, E : Emissions) du système de produits (cycle de vie). Agrégation spatio-temporelle des données d'inventaire de chaque site et expression par unité fonctionnelle.

II.5.2. Modes opératoires de collecte

Les données peuvent être obtenues par mesure directe, calcul, estimation ou par recherche bibliographique, conformément aux exigences de qualité des données. Dans tous les cas, il convient de décrire exhaustivement les procédures employées et de justifier leur utilisation.

Une première phase de collecte de données est généralement réalisée lors de la construction du cadre de travail : d'après ISO 14041, une recherche bibliographique suffit en principe à identifier les différentes opérations entrant dans le système, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la fabrication de chaque composant d'un produit [18].

II 6. L'évaluation des impacts

II.6.1. Notion d'impact

L'Evaluation des Impacts du Cycle de Vie (EICV) est une étape importante de l'analyse du cycle de vie et vise à transformer un inventaire de flux en une série d'impacts clairement identifiables. L'évaluation des impacts est standardisée par la norme ISO 14042 [19] et sollicite de :

- choisir des méthodes d'impact retenues pour l'étude,
- déterminer les flux pris en compte pour le calcul des impacts,
- déterminer leur contribution aux impacts,
- calculer des impacts et
- identifier des principaux flux contribuant aux impacts.

II.6.2. Classes d'impact

Les différentes classes d'impact considérées dans les ACV sont représentées par la figure 5.

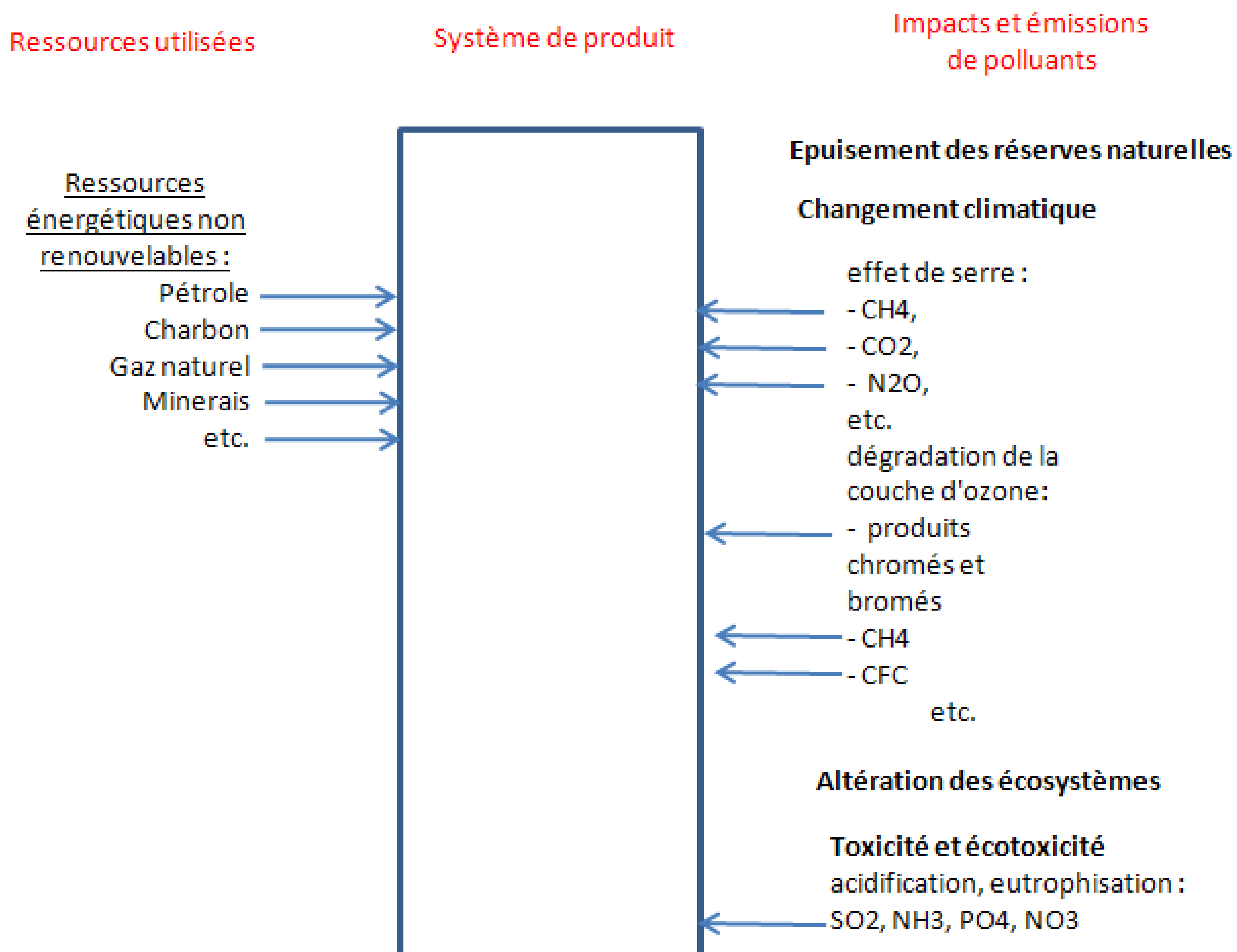


Figure 5: Etape de classification des données d'inventaire par catégorie d'impact dans la phase d'évaluation d'impact.

Sur la [figure 5](#), nous avons représenté en caractères **gras** les impacts et en caractères normaux précédés de flèches les émissions. Comme notre étude est axée principalement sur l'émission de gaz carbonique, nous développons ci après l'effet de serre. Les autres impacts sont trouvés dans [l'annexe 1](#).

II.6.3. Effet de serre

II.6.3.1. Phénomène d'effet de serre

L'équilibre radiatif naturel à la surface de la terre est déterminé pour une part importante par la présence de gaz qui ont la propriété d'intercepter les rayonnements émis par la Terre, puis de les renvoyer vers l'Univers. Au contact du rayonnement reçu, la Terre s'échauffe et renvoie vers l'atmosphère cette énergie, sous forme de chaleur [\[22\]](#).

Etant comparable à ce qui se passe dans une serre, ce phénomène a été baptisé « effet de serre » car, comme la vitre de la serre, l'atmosphère laisse entrer les rayonnements solaires mais elle emprisonne la chaleur grâce à ces gaz à effet de serre (GES).

II.6.3.1.1. Les gaz à effet de serre

Les deux principaux gaz à effet de serre (figure 6) sont la vapeur d'eau et le gaz carbonique.

- **La vapeur d'eau (H₂O)** qui provient des centrales électriques, de l'irrigation, des barrages, de la déforestation mais les émissions d'origine humaine ne sont pas suffisantes pour perturber le cycle global de l'eau, car la planète en est déjà couverte aux 2/3 et l'eau ne s'accumule dans l'atmosphère pas plus d'une semaine.
- **Le gaz carbonique (CO₂)** : est responsable à lui seul de **65%** de l'effet de serre anthropique.

Les autres gaz à effet sont les suivants :

- **le méthane (CH₄)** qui engendre environ **20%** de l'effet de serre anthropique. C'est un gaz 23 fois plus puissant que le CO₂,
- **le protoxyde d'azote (N₂O)** engendre environ **5%** de l'effet de serre anthropique. C'est un gaz 298 fois plus puissant que le CO₂ qui provient de l'utilisation d'engrais azotés en agriculture, et de certains procédés chimiques,
- **l'ozone (O₃)**, forme particulière de l'oxygène. Ceci engendre environ **5%** de l'effet de serre anthropique. C'est une variante de l'oxygène qui est naturellement présent dans l'atmosphère. Dans la stratosphère, l'ozone arrête les ultraviolets du Soleil qui ont tendance à "casser" les liaisons chimiques indispensables à la vie. Il y est formé par l'Homme, à partir de la combustion des hydrocarbures,
- **les halocarbures** ayant pour formule générique de type C_xH_yhal_z où hal représente un ou plusieurs halogènes, sont les principaux gaz industriels à effet de serre.

Il existe également un autre gaz industriel, l'hexafluorure de soufre (SF₆). Il n'est pas d'utilisation banale mais est encore plus absorbant pour les infrarouges et résistant à la partie "dure" du rayonnement solaire que les halocarbures [23].

Les gaz à effet de serre (en pourcentage du volume total)

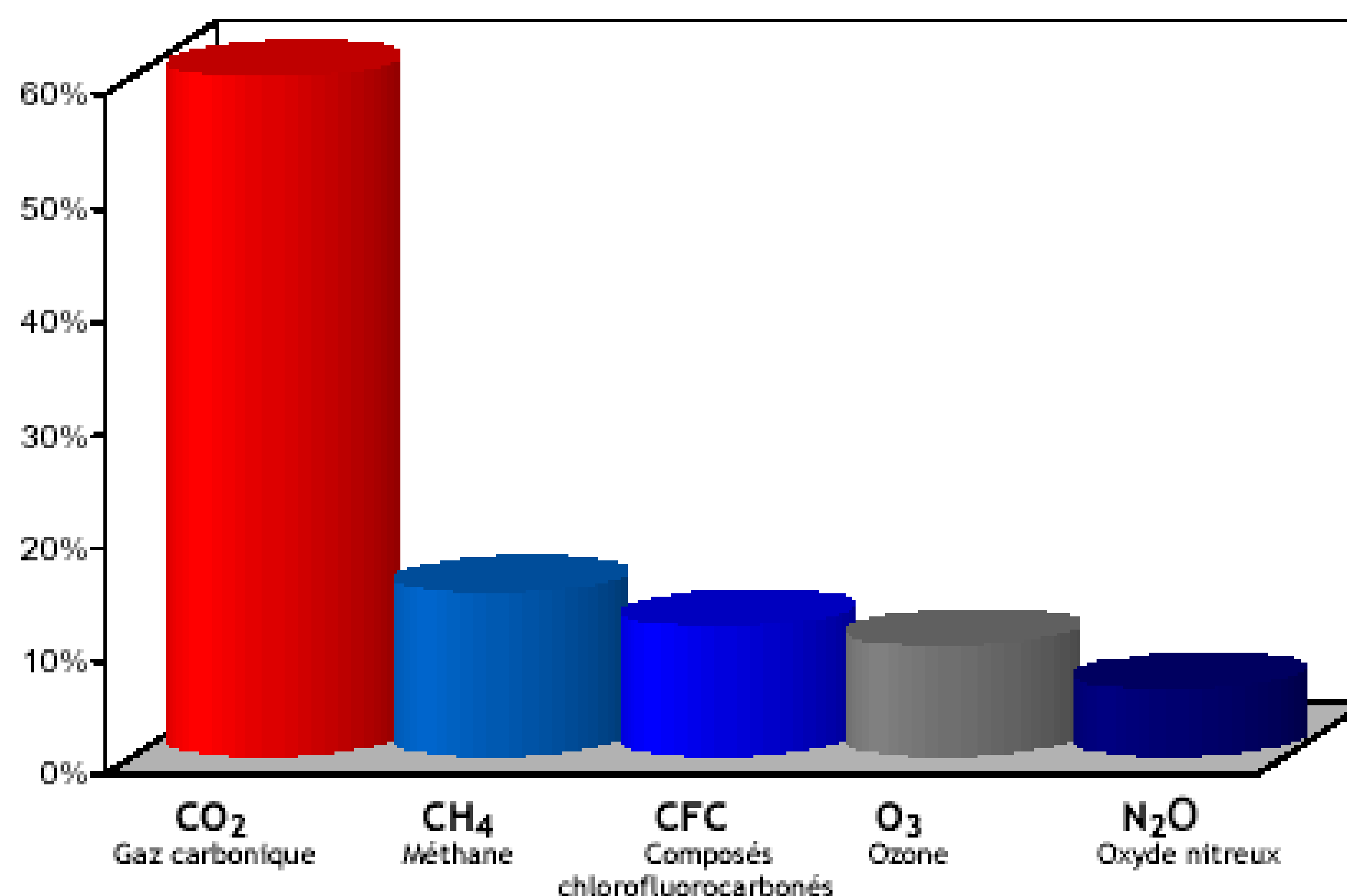


Figure 6 : Pourcentage des gaz à effet de serre dans l'atmosphère [23].

II.6.3.1.2. Spécificités des gaz à effet de serre

➤ Durée de séjour dans l'atmosphère

Les gaz à effet de serre, une fois dans l'atmosphère, n'y restent cependant pas éternellement. Ils peuvent être retirés de l'atmosphère :

- soit par suite d'un phénomène physique. Par exemple la pluie, phénomène physique (condensation), enlève de la vapeur d'eau de l'atmosphère,
- soit par suite d'un phénomène chimique, par exemple la photosynthèse des plantes enlève du gaz carbonique de l'atmosphère,
- soit par suite d'un phénomène radiatif. Par exemple les rayons cosmiques (qui sont de même nature que les rayons émis par une source radioactive) "cassent" des molécules dans la haute atmosphère. Mis à part la vapeur d'eau qui s'évacue en quelques jours, les gaz à effet de serre mettent très longtemps à s'en aller de l'atmosphère. On a une estimation de la durée de séjour, comme indique le tableau 1, c'est-à-dire du temps qui

est nécessaire à ce que le gaz en surplus disparaisse de l'atmosphère, pour les principaux d'entre eux [23].

➤ Equivalence des GES

Par définition, 1kg de CO₂ vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est-à-dire le poids du carbone seul dans le composé "gaz carbonique". Pour les autres gaz, l'équivalent carbone est donné par le [tableau 1](#).

Tableau 1 : Equivalence des GES et leurs durées de séjour approximatives dans l'atmosphère

Gaz	Formule	Equivalent carbone/kg	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique	CO ₂	0,273	100 ans
Méthane	CH ₄	5,73	12 ans
Protoxyde d'azote	N ₂ O	84,55	120 ans
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	1772,73 à 2372,73	Jusqu'à 50 000 ans
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	38,2 à 3190,9	Jusqu'à 50 000 ans
Hexafluorure de soufre	SF ₆	6518,2	

II.6.3.2. Le gaz carbonique

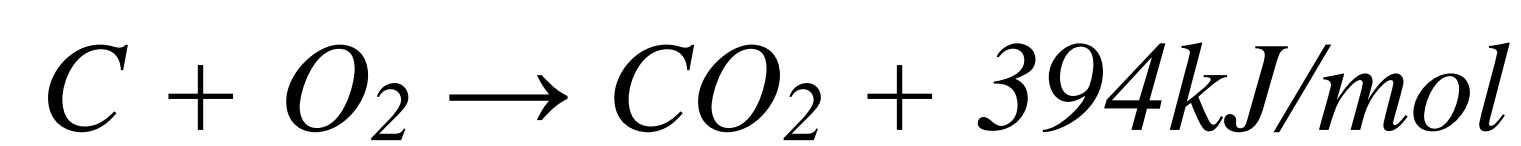
C'est un gaz incolore et sans odeur, formé par la combustion complète dans l'air ou l'oxygène, du carbone et de ses composés. C'est l'un des produits de combustion de tous les combustibles sauf l'hydrogène.

Le gaz carbonique est présent dans l'air dans la proportion de 0,03 % à 0,04 % et là, il est utilisé par les végétaux pour assurer leur croissance [23].

II.6.3.2.1. Sources de gaz carbonique

➤ Emission provenant de l'usage de l'énergie

Cette émission est due à la réaction de combustion. La combustion complète du carbone dans l'air libère du dioxyde de carbone et de l'énergie sous forme de chaleur suivant la réaction :



En amont, la teneur en carbone du combustible permet de prévoir la masse de gaz carbonique rejetée au cours de la combustion. En aval, la mesure de la teneur en dioxyde de carbone dans les fumées permet le contrôle de la combustion, à savoir complète ou incomplète.

On peut classer les sources d'énergie en deux catégories : les sources non polluantes (ou peu polluantes) et les sources polluantes.

Les sources non polluantes sont :

- les combustibles végétaux (ou biomasse) qui ne font que restituer à l'atmosphère lors de leur combustion. Le gaz carbonique qu'ils ont fixé par photosynthèse. Leur bilan en matière de rejets de CO₂ dans l'atmosphère peut être nul ou négatif [24],
- l'hydroélectricité,
- l'énergie éolienne et
- l'énergie solaire.

Les sources polluantes qui dégagent, entre autre gaz, du dioxyde de carbone en quantité relativement importante. Ce sont :

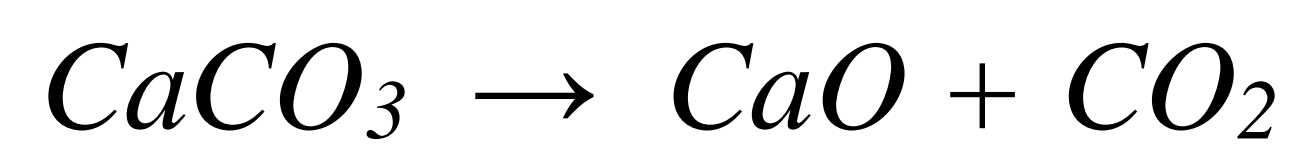
- les combustibles fossiles et
- l'électricité générée par des groupes utilisant des produits pétroliers et méthane.

➤ Emissions liées à la composition chimique

L'émission non énergétique est causée d'une part par les réactions de décomposition telle la réaction de décarbonatation et d'autre part par la libération de gaz carbonique contenu dans le matériau.

- **Décarbonatation**

Lors de la cuisson de produits contenant du carbonate de calcium vers 650 à 750°C, celui-ci se décompose suivant la réaction chimique :



Ce phénomène concerne particulièrement l'argile, le calcaire, la craie, le marbre et le cipolin qui, pour la plupart, entrent dans la composition des matériaux de construction tel le ciment, la chaux et les produits de terre cuite.

- **Libération de gaz carbonique occlus**

Des matières premières contenant originellement du dioxyde de carbone, libèrent cet élément sous l'effet de la chaleur et/ou de la pression en laissant des vides, ce qui a pour effet d'accroître la porosité du matériau fini.

II.6.4. Interprétation des résultats

Les résultats de l'analyse de l'inventaire doivent être interprétés en fonction de la finalité, des objectifs et du champ d'étude. L'interprétation doit considérer l'évaluation de la qualité des données, de l'incertitude des résultats et les choix méthodologiques faites afin de dégager les limites de l'étude. Elle doit évaluer la définition appropriée des fonctions et frontières du système et de l'UF.

Cette étape permet de :

- identifier des points forts et points faibles des cas étudiés,
- répondre aux objectifs fixés lors de la première phase,
- valider de la réponse au moyen si nécessaire,
- collecter de données complémentaires et
- détailler des applications et limitations de l'étude.

L'ACV est conçu dans un premier temps comme un outil de gestion environnementale. En effet, c'est un instrument de base pour l'éco-conception.

CHAPITRE 2 : AUTRES METHODOLOGIES

Des recherches ont déjà été entreprises dans divers pays dont le Japon et l'Inde [25] et [26] concernant l'émission en gaz carbonique relative à un bâtiment. Le point commun à ces approches réside dans la considération d'un nombre de groupe d'éléments intervenant dans des chaînes d'activités industrielles dont le produit final est la construction.

Dans d'autres pays comme la France et les Etats-Unis, des outils de travail comme BEES et EQUER sont développés.

Tous, dans le but de déterminer les impacts environnementaux pendant le cycle de vie d'un bâtiment, y compris l'émission en gaz carbonique.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les méthodologies adoptées au Japon et en Inde et ensuite nous présentons deux logiciels, BEES et EQUER.

I. Les méthodologies adoptées en Japon et en Inde

I.1. En Japon

Michiya SUZUKI, Tatsuo OKA et Kiyoshi OKADA [25] ont entrepris une étude technico-économique. Le but de l'étude est de quantifier l'émission de CO₂ par mètre carré des différents types de maisons d'habitation courants. Pour estimer l'émission, nécessaire est-il de savoir la part des biens produits et services locaux utilisés directement et indirectement car on ne tient pas compte de celle causée par la fabrication des produits importés. Il est à remarquer que le Japon exporte une partie des matériaux de construction fabriqués localement et en importe d'autres. L'émission se rapporte uniquement à la fabrication locale.

I.1.1. Les différents types d'habitation

Huit modèles de maisons d'habitation courants au Japon ont été retenus pour l'étude :

- deux « S.R.C (*Steel Reinforced Concrete*) multifamily » qui sont des logements construits massivement en béton armé,

- quatre maisons individuelles en bois et
- deux maisons individuelles préfabriquées à ossatures métalliques.

I.1.2. Produits considérés

Les matières premières utilisées pour les différentes catégories ont été calculées en utilisant le « *Table of the Materials of the Input/Output Table* » [27] et [28].

I.1.3. Méthodes de calcul

L'estimation de la consommation d'énergie et l'émission de CO₂ requièrent l'évaluation du montant total de services et biens locaux qui sont employés directement et indirectement pour la construction de maisons.

La construction est répartie en 5 corps :

- travaux temporaires,
- gros œuvre,
- finition,
- équipement et
- déboursés.

Les données utilisées sont issues des documents nationaux tels que le « *Labor/material cost* » et le « *Input-Output of Japan* » [27] et [28]. Le premier donne le rapport main d'œuvre/matériaux, ce qui permet d'aérer celui des matériaux, de la main d'œuvre. Les prix donnés sont des prix de vente, ainsi il est nécessaire donc d'extraire les prix de transport, de stockage et les bénéfices, car l'estimation des prix donnés par le second est basée sur le coût de revient.

Enfin le prix de revient par mètre carré des matériaux utilisés (produits localement et importés) pour la construction de chaque maison est obtenu.

Les quantités de gaz carbonique partielles émises sont obtenues en multipliant chaque quantité de matériau par son facteur d'émission. La quantité totale de CO₂ émis par la construction est la somme de ces dernières.

I.1.4. Résultats

D'après les évaluations précédentes, on obtient les quantités de gaz carbonique suivantes :

- SRC : 850 kg de CO₂ /m²,
- maison individuelle en bois : 250 kg de CO₂ /m² et
- maison individuelle à ossature métallique : 450 kg de CO₂ /m².

Il s'avère que la quantité pour le deuxième type de maison est approximativement le tiers de celle du premier qui utilise intensivement des matériaux dont la fabrication engendre d'importants rejets de gaz carbonique (due à la forte dépense énergétique durant la fabrication de ciment, aciers....

A la fin de l'étude, les Japonais ont introduit la notion de «*Intensité de CO₂* » qui est la quantité de gaz carbonique émis par unité de prix de construction (kg/1.000 yen).

I.2. En Inde

Piyush TIWARI et Jyoti PARIKH⁺ [7] ont effectué des études en ce sens. L'étude a montré que c'est le secteur de la construction qui émet le plus de CO₂ (17 % du CO₂ dans ce pays) par rapport à l'ensemble des secteurs industriels et agricoles. Ce résultat est obtenu en utilisant des documents donnant les quantités des matériaux utilisés dans le domaine de la construction [29], [30] et [31].

L'étude entreprise dans « *Input- Output approach for India* », *Input-Output table* » est axée sur l'évaluation des coûts de réduction d'émission de CO₂ dans la fabrication de maison [26].

I.2.1. Modèle d'habitation

L'idée de la recherche n'est pas de déterminer les émissions pour un type particulier de maison mais de calculer les intensités d'émission pour différentes techniques de construction. Cette intensité étant définie comme la quantité de gaz carbonique émise par **chambre construite**. Le coût de réduction d'émission de gaz carbonique pour un type particulier de maison n'a pas été étudié mais pour différentes techniques de

construction. Pour l'étude, il a été pris une pièce standard (d'après les données statistiques) de 3,5 x 3,5 x 3,14 m³.

I.2.2. Méthode de calcul

Pour le calcul de l'estimation de CO₂, le modèle utilisé est le « Input/Output ».

En plus des matériaux de construction couramment utilisés, les indiens utilisent du surkhi.

Dans un premier temps, les auteurs ont mené leur analyse sur une étude comparative entre un cas de base : « *Base case* », BC en abrégiation où la technique de construction est basée sur la vulgarisation de l'emploi de la chaux, et un modèle de pratique commune courante, « *Common practice* » (CP). Ils ont relevé une amélioration concernant le coût de la construction et l'émission de gaz carbonique.

En se référant au *Base case*, le coût de réduction de construction est réduit de 1,9 % et l'émission de gaz carbonique de 5,9 %. Plusieurs scénarios sont envisagés (en faisant varier les techniques et les matériaux utilisés et l'émission de CO₂ est réduite jusqu'à 21 %).

I.2.3. Résultats

D'après l'étude, en construisant une maison d'une pièce de 3,5 x 3,5 x 3,14 m³ ; 6,25 tonnes de gaz carbonique sont émises si celle-ci est bâtie avec les techniques communément pratiquées et 5,88 tonnes de gaz carbonique si elle est construite avec des techniques à base de chaux.

Pour un pays comme l'Inde, qui possède des industries métallurgiques et où les briques sont cuites avec du charbon de terre, afin de réduire l'émission de gaz carbonique, il faudrait employer d'autres matériaux de construction (chaux à la place du ciment et pierres à la place des briques). Cela demande en contre partie un coût de construction assez élevé.

Les calculs tiennent compte des technologies propres utilisées dans chaque contrée, leur production industrielle en matière de matériaux de construction, de la dynamique économique liée à l'importation et à l'exportation.

Le point commun de ces études effectuées en Inde et Japon est l'utilisation des modèles « entrées-sorties ».

Dans les autres pays, les chercheurs sont arrivés jusqu'à développer des logiciels concernant l'évaluation du gaz carbonique émis par un bâtiment, à titre d'exemple BEES aux Etats-Unis et EQUER en Europe. Pour ce dernier la méthode d'ACV est utilisée. La plupart de ces logiciels contiennent des données préenregistrées.

II. Les outils

II.1. BEES

BEES (**B**uilding for **E**nvironmental and **E**conomic Sustainability), est un logiciel libre et est conçu par les américains et plus précisément par NIST (National Institute of Standards and Technology) et le BRFL (Buildings and Fire Research Laboratory) [32].

II.1.1. Modélisation BEES

Les différents éléments de la construction rencontrés dans le logiciel BEES sont situés dans une structure composée de 7 groupes d'éléments majeurs (GEM), à savoir :

- l'aménagement du site,
- substructure,
- l'enveloppe externe,
- intérieur,
- équipements et ameublements,
- réparation et
- maintenance.

Les simulations portent essentiellement sur les matériaux de construction et intègrent leurs transports entre les sites de production et le chantier. De ce fait, le paramètre de l'étude est alors la distance entre ces localités.

II.1.2. Résultats proposés

Les résultats obtenus représentent les poids des scores de catégorie d'impact environnementale ainsi que leur somme, les chercheurs américains les appellent score de la performance environnementale.

II.1.3. Conclusion

BEES est très développé dans l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment, cela sur tous les plans : santé, environnemental et économique. Cependant, l'application du BEES dans l'analyse de cycle de vie est limitée au niveau mondial car le logiciel est conçu dans le but de générer des performances environnementales pour les produits de construction aux États-Unis, donc il n'y a pas assez de variantes de matériaux de construction.

Tout compte fait, les solutions produites sont des solutions propres aux États-Unis.

II.2. EQUER

EQUER est un logiciel payant et a été réalisé à partir de travaux du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. D'après la version démos, on peut dire que celui-ci est très souple en terme d'insertion de données, quelque soit les valeurs préétablies, l'utilisateur peut à tout moment saisir ses données personnelles. Les entrées d'EQUER sont très complètes pour l'étude d'un bâtiment.

II.2.1. Méthode de calcul

La base de données suisses Ecoinvent, et les données collectées pendant le projet européen REGENER [33] et [34] servent à fournir l'inventaire des émissions et extractions pour les procédés de fabrication des matériaux, d'élimination des déchets.

II.2.2. Résultats proposés

Ce logiciel permet de calculer 12 indicateurs environnementaux [33] et [34] sous forme d'éco-profil, avec la possibilité de visualiser la contribution de chaque phase et de comparer jusqu'à 4 variantes d'un projet :

- effet de serre,
- ressources abiotiques (non renouvelables),
- odeur,
- déchets radioactifs,
- eau utilisée,
- ozone,
- eutrophisation,
- déchets inertes,
- écotoxicité aquatique,
- toxicité humaine,
- énergie consommée et
- acidification.

II.2.3. Analyse

A partir de la version démos, nous avons constaté que EQUER est très facile à utiliser avec son interface très conviviale et très souple en terme d'insertion de données, quelque soit les valeurs préétablies, l'utilisateur pourra à tout moment saisir ses données personnelles.

Ce logiciel permet de présenter, après l'utilisation de cet outil de simuler l'enveloppe du bâtiment voire l'intérieur.

Cependant dans BEES et EQUER, quelques matériaux très adaptés à Madagascar qui ne sont pas y intégrés. A titre d'exemple les briques à Madagascar, il y a les productions artisanale et semi-industrielle. Les producteurs utilisent des combustibles végétaux, séchage à l'air libre, fabrication peu mécanisée, contrairement aux processus de production dans les pays développés. Les données utilisées ne sont pas compatibles avec la réalité malgache. A titre d'exemple d'après Oekoinventare 1996 [35], le facteur d'émission relatif à la fabrication de briques cuites est de 0,25kg de CO2/kg tandis que

la production artisanale de briques de terre cuite à Madagascar n'émet en moyenne que 0,027kg de gaz carbonique/kg de produits si on utilise du mélange de balle de riz et de fine de charbon pour la cuisson.

D'après les études effectuées dans d'autres pays, nous constatons que pour évaluer l'émission de gaz carbonique dans le domaine de la construction à Madagascar, les modèles de calcul déjà établis sont difficilement applicables chez nous. Ceci est dû à l'insuffisance des données qui concernent particulièrement :

- les industries : pour les fabricants de matériaux de construction, beaucoup d'entre eux sont dans le secteur informel, notamment les fabricants de produits à base d'argile cuite tels que les briques et les tuiles ;
- les études financières des constructions de maison d'habitation chez nous, la plupart des constructions n'est pas normalisée et, en lors de la construction, l'exécutant peut être le propriétaire lui-même jusqu'à des grandes entreprises, ce qui implique une large variation du prix unitaire (par m²) de chaque type de maison.

En outre, les réalités techniques dans ces pays et Madagascar sont très différents : mode de production, énergie utilisée,

Nous établissons alors un modèle de calcul compatible à notre cas pour évaluer l'émission en gaz carbonique d'un habitat.

PARTIE II : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE L'HABITAT

CHAPITRE 1 : METHODOLOGIE ADOPTEE POUR NOTRE ETUDE

Dans ce travail, nous limitons les frontières de l'Analyse de Cycle de Vie de l'habitat à l'extraction des matières premières jusqu'à la démolition comme indique la [figure 7](#).

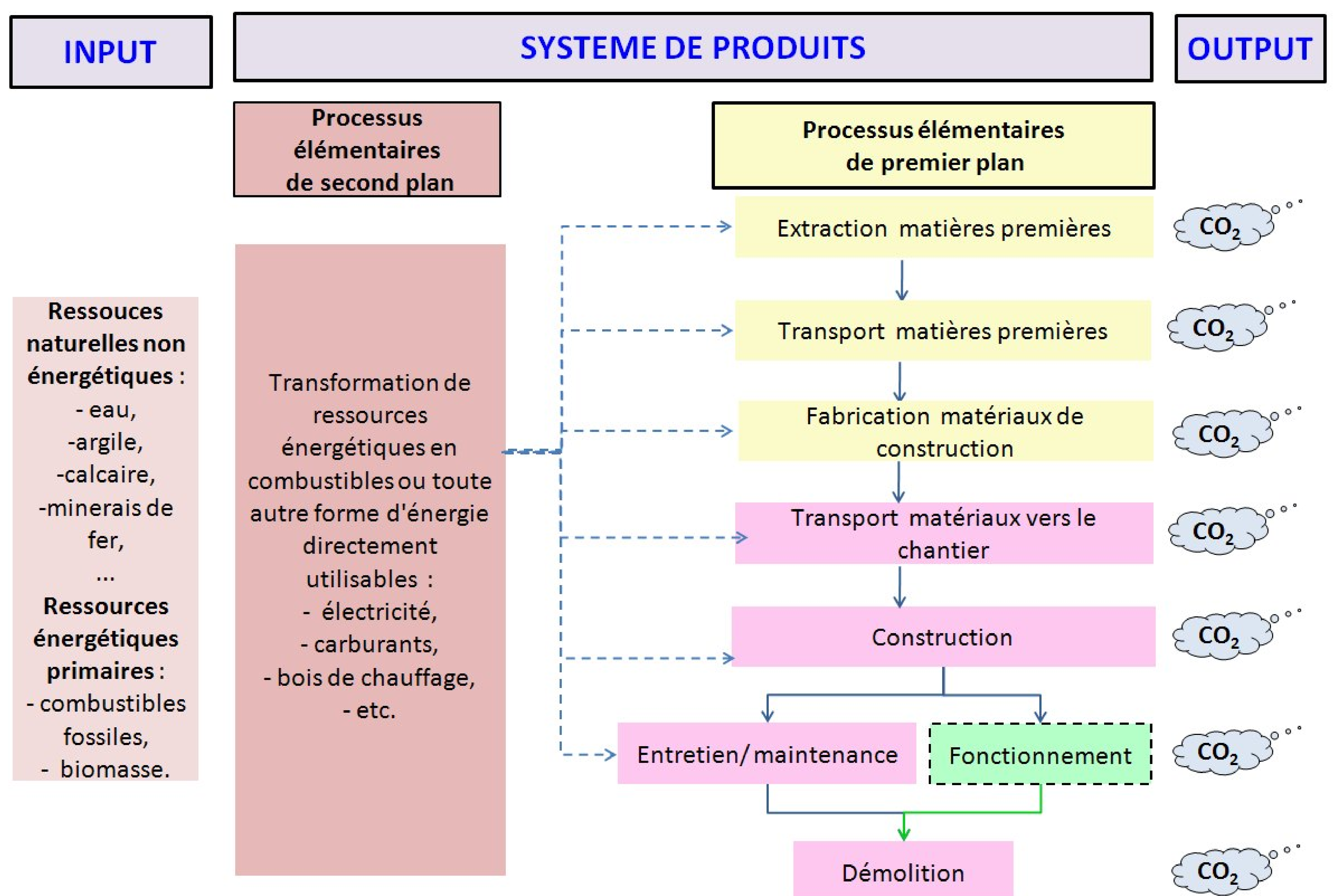


Figure 7 : Les frontières de l'Analyse de Cycle de Vie de l'habitat.

Notre travail se divise alors en deux grandes étapes.

La première consiste à l'ACV de l'enveloppe du bâtiment (cases colorées en jaune et rose) tandis que la deuxième est axée sur son fonctionnement (case colorée en vert) c'est-à-dire sur les activités des occupants.

Avant d'effectuer l'Analyse de Cycle de Vie de l'enveloppe du bâtiment, il s'avère indispensable de faire d'abord l'ACV des matériaux de construction ([Partie II, Chapitre 2](#)) nécessaires à la mise en œuvre du bâtiment.

I. ACV des matériaux de construction

L'ACV de chaque matériau se présente comme suit (figure 8) :

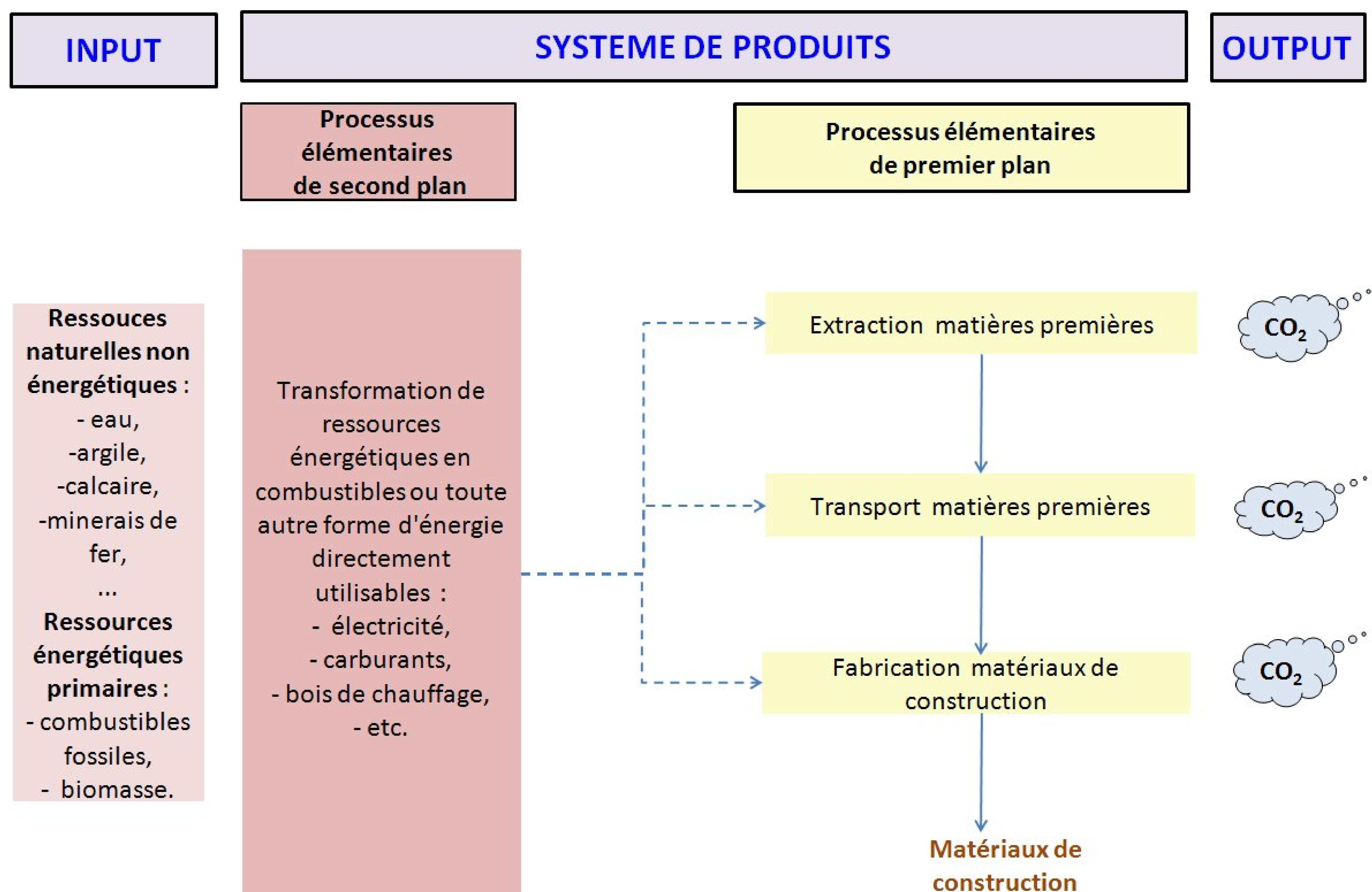


Figure 8 : ACV des matériaux de construction.

I.1. Acquisition des matières premières

L'extraction des matières premières comme l'argile, le calcaire et le minerai de fer nécessite de l'énergie humaine ou de l'emploi d'engins (pelles hydrauliques, excavateurs,...) fonctionnant avec des énergies tirés de combustibles fossiles.

Les matières brutes sont ensuite acheminées sur le lieu de traitements (lieu de fabrication, usine,...).

I.2. Transport des matières premières

Les sources d'énergie utilisées peuvent être issues de la main d'œuvre humaine, de l'énergie animale, du carburant ou de l'électricité.

I.3. Production des matériaux de construction

Certains procédés de fabrication, comme la fabrication de ciment par exemple sont plus ou moins mécanisés. Des étapes de production comme le broyage, le mixage, etc. nécessitent de l'énergie électrique. Dans le cas de fabrication des matériaux artisanaux, la plupart des productions sont manuelles. Exemple la production la fabrication de briques de terre cuite à Madagascar.

Pour les produits locaux dont les procédés de fabrication sont spécifiques à Madagascar, les processus de fabrication seront développés en détails dans le [chapitre 2](#) de cette deuxième partie. Pour les matériaux dont les modes de production sont applicables à un groupe de pays (comme le ciment et l'acier), les procédés de fabrication sont trouvés dans l'[annexe 4](#).

- **Collecte de données et détermination des facteurs d'émission**

Concernant les matériaux dont les procédés sont spécifiques à notre pays, les facteurs d'émission sont obtenus par estimation à partir des données venant des enquêtes menées sur terrain auprès des unités de fabrication locales. Ces matériaux sont les briques de terres cuites et bois transformés (voliges, planches, parquets, etc.). Le protocole d'enquête se trouve dans l'[annexe 5](#).

Les processus de fabrication des autres matériaux et les facteurs d'émission associés sont obtenus par des recherches bibliographiques issues des études menées par des consultants, universitaires, souvent à l'initiative des fabricants [\[9\]](#), [\[36\]](#), [\[37\]](#), [\[38\]](#), [\[39\]](#) et [\[40\]](#).

II. L'Analyse de Cycle de Vie de l'enveloppe du bâtiment

De nombreux auteurs s'accordent que la durée de vie d'un bâtiment est de 50 ans. [\[41\]](#), [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#). L'étude sera alors effectuée sur cette période.

Le bâtiment est un système complexe. L'étude de son Analyse de Cycle de Vie fait l'objet d'une approche particulière. Nous le décomposons alors en ouvrages fonctionnels (OF). Ces derniers ne sont que les éléments qui constituent la structure d'un bâtiment ([figure 9](#)). Ce sont :

- la toiture,
- le mur et cloison avec les revêtements,
- la fondation,
- le plancher avec les revêtements et
- les ouvertures.

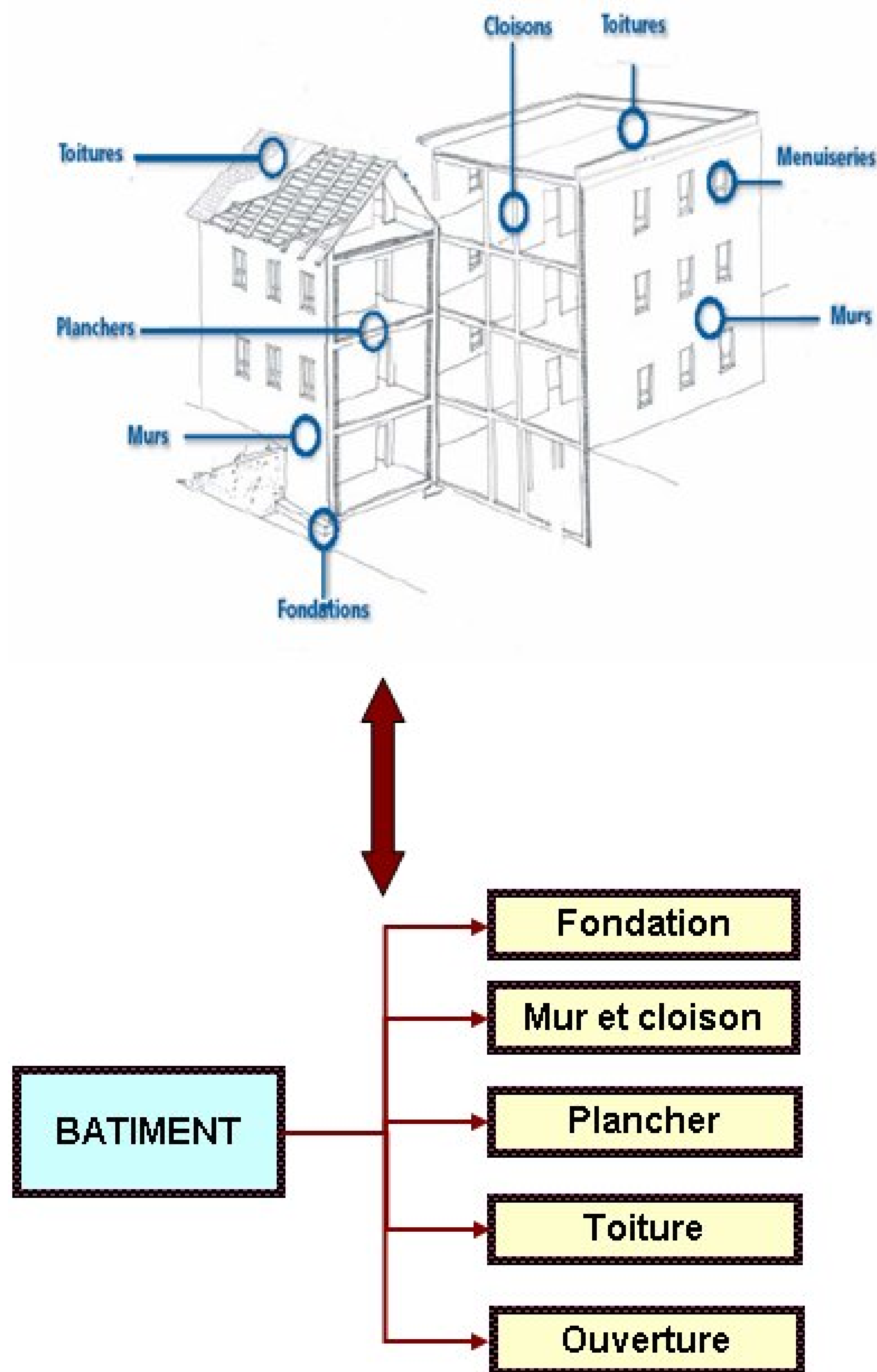


Figure 9 : Le bâtiment et ses ouvrages fonctionnels (OF).

Nous effectuons l'Analyse de Cycle de Vie de chaque ouvrage fonctionnel afin d'estimer l'émission de CO₂ émis pendant le cycle de vie du bâtiment entier. Différents

types de matériaux sont choisis pour la mise en œuvre des OF. Le choix des matériaux ainsi que les techniques utilisées tiennent compte du contexte à Madagascar [1] et [45].

Les méthodes de calcul sont développées dans la [Partie II, Chapitre 3](#).

L'Analyse de Cycle de Vie de chaque ouvrage fonctionnel s'effectue depuis le transport des matériaux vers le chantier jusqu'à la démolition ([figure 10](#)), en passant par l'entretien. Ceci correspond bien aux étapes recommandées par la norme NF-P01-010 [33].

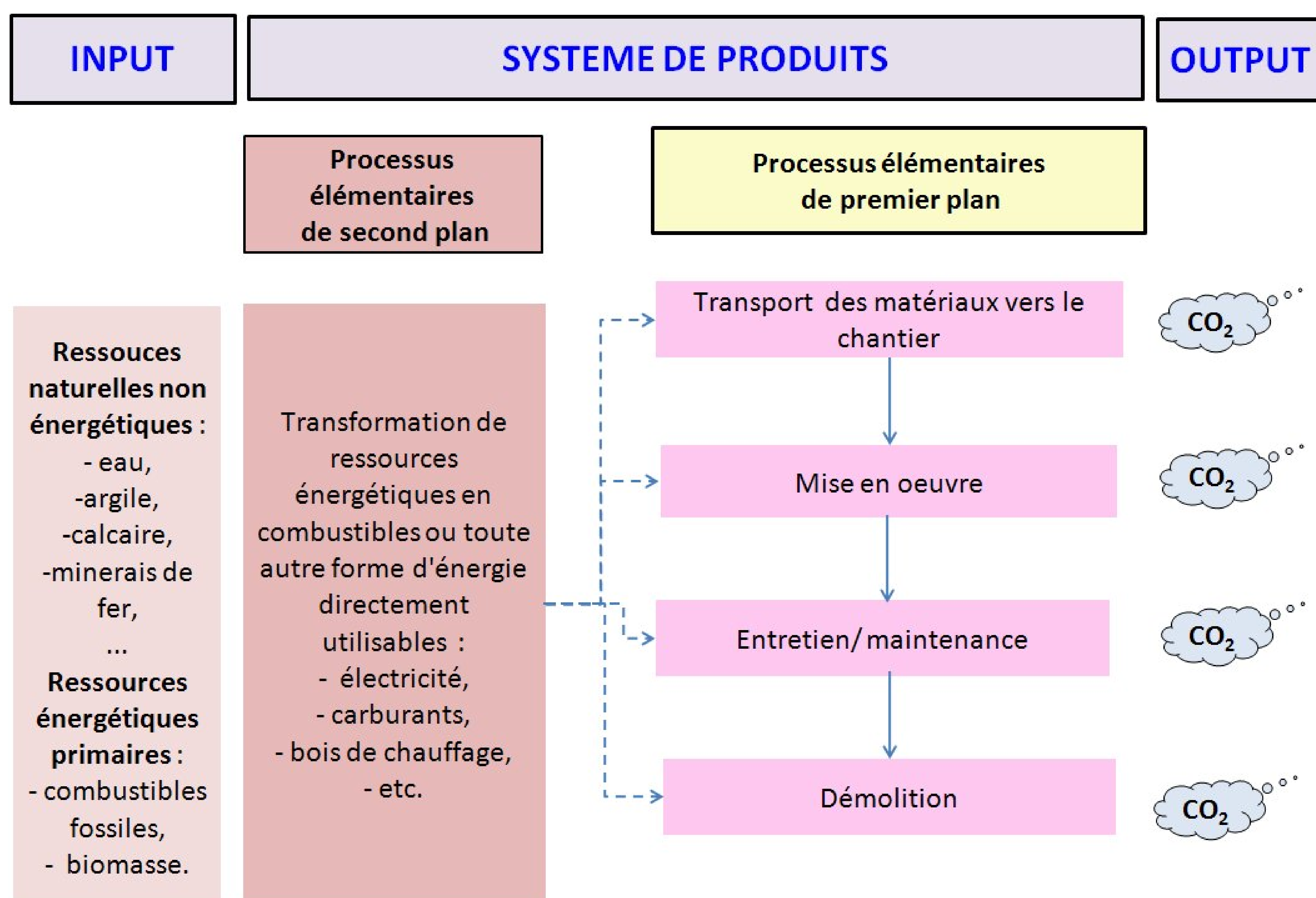


Figure 10 : Les étapes de l'ACV de l'enveloppe du bâtiment.

II.1. Transport des matériaux

Il s'agit du transport des matériaux de construction, de l'usine de production jusqu'au chantier où ils seront mis en œuvre. Le transport peut être maritime et/ou routier et/ou ferroviaire et/ou effectué par des humains. L'émission de dioxyde de carbone est

engendrée essentiellement par l'utilisation d'énergie provenant des combustibles fossiles.

II.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre de chaque ouvrage fonctionnel peut-être effectuée de différentes manières : manuellement et/ou mécaniquement (avec des bétonnières, malaxeurs, ...). Le CO₂ émis est donc issu de l'utilisation d'énergie s'il y a de la mécanisation.

II.3. Entretien et maintenance

Il s'agit du remplacement partiel de l'ouvrage fonctionnel pendant la période où celui-ci assure sa fonction dans le bâtiment. L'entretien s'effectue de la même manière que la mise en œuvre.

II.4. Fin de vie

La fin de vie consiste en la dépose du produit lors d'une opération de démolition. Le transport des déchets liés à cette étape jusqu'à en site de valorisation ou d'élimination est pris en compte.

En obtenant l'émission de gaz carbonique liée à chaque ouvrage fonctionnel, le dégagement lié à l'enveloppe du bâtiment est la somme de chaque émission.

Une fois que le bâtiment construit, celui-ci sera occupé et entre dans la phase de fonctionnement.

III. Fonctionnement de l'habitat

Chaque bâtiment est en général unique, et entretient des liens forts tant avec le site dans lequel il est intégré qu'avec ses occupants.

La fonction principale d'un habitat est d'assurer un abri dans lequel les occupants mènent diverses activités.

Dans ce travail, nous prenons le système habitat isolé de son environnement immédiat, c'est-à-dire isolé des systèmes de traitement de déchets intégrés qui pourraient lui être associé. Nous positionnons ce système dans une configuration de maison individuelle.

III.1. Emissions de CO₂ engendrées par le fonctionnement de l'habitat

Nous ne n'effectuons pas l'étude par sous-système mais par « **poste d'activité ou poste de consommation d'énergie** ».

L'émission en gaz carbonique pendant le fonctionnement de l'habitat est dû principalement à la consommation d'énergie lors des activités domestiques ([figure 11](#)).

Nous avons limité notre étude aux postes suivantes:

- la cuisson,
- le transport,
- l'éclairage et
- l'alimentation de divers équipements électroménagers et matériels informatiques.

Cette étude sera associée à la production de déchets et à la consommation d'eau.

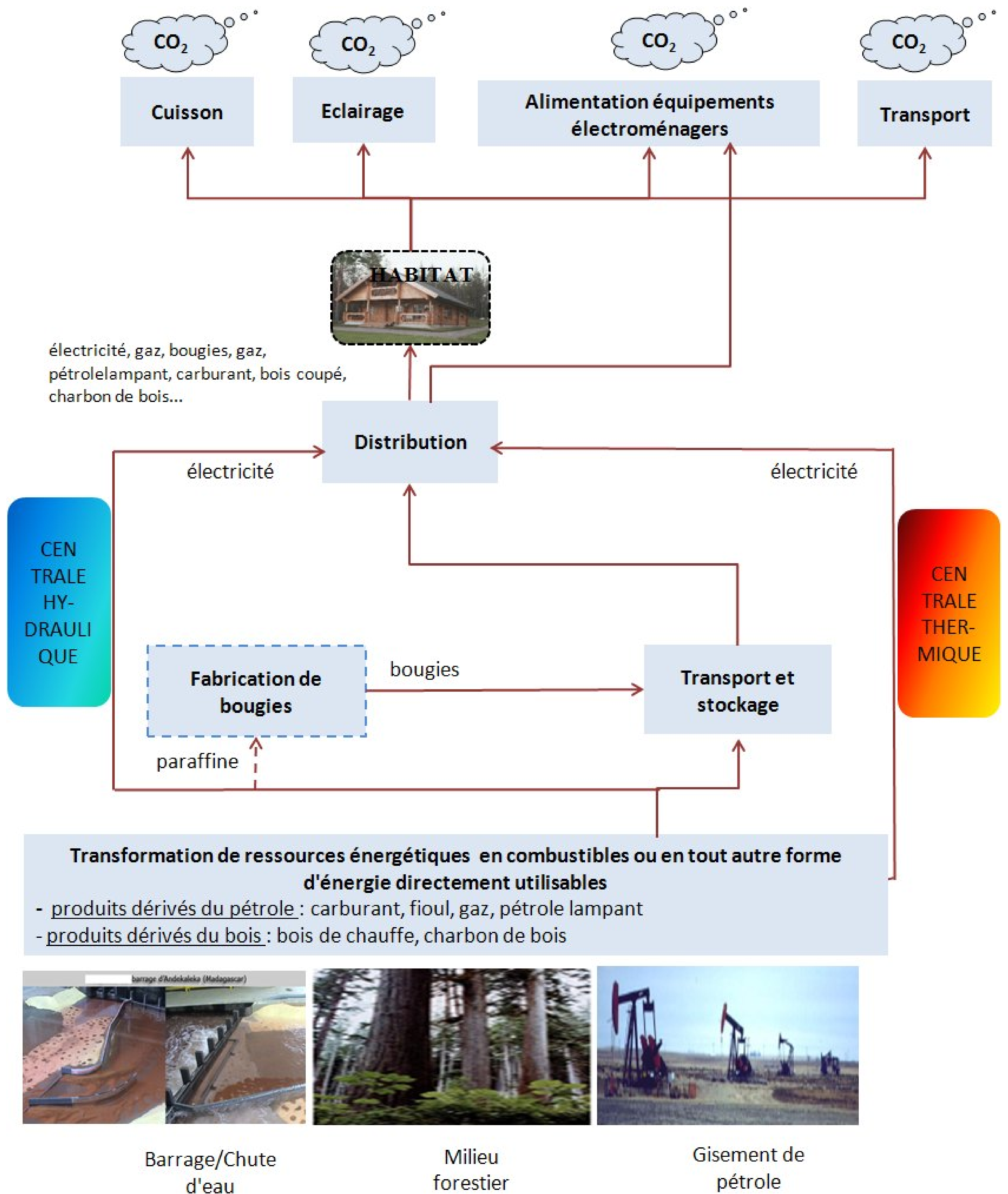


Figure 11 : Chaîne de processus de production d'énergie et postes de consommation énergétique de l'habitat type malgache.

➤ **Origine des bases de données**

Les modes opératoires des données sont conformes aux ISO 14040 à 14043 [17], [18], [19] et [20].

Les différents types d'énergie utilisée sont issus des données de l'INSTAT [1]. Les émissions en gaz carbonique liées à chaque source d'énergie sont tirées des recherches bibliographiques [9]. Pour déterminer le facteur d'émission de l'électricité à Madagascar, nous tenons compte des différentes sources constituant notre « mix électrique » [46].

III.2. Méthode de calcul

Un modèle mathématique est développé dans le [chapitre 4](#) afin d'obtenir les émissions liées au fonctionnement de l'habitat tout en tenant compte :

- de la taille du ménage,
- du nombre de pièces à éclairer,
- des sources d'énergie utilisée pour la cuisson et l'éclairage,
- du type de transport adopté,
- du nombre des équipements électroménagers,
- du nombre de véhicules particuliers appartenant au ménage et
- de la distance à parcourir par les occupants.

Pour la quantification de déchets produits et de la consommation en eau, le calcul est effectué à partir de l'effectif des occupants. Nous ne retenons pas la période de 50 ans pour le fonctionnement de l'habitat du fait que les caractéristiques d'un ménage pourront changer d'une année à une autre. Les émissions seront alors calculées par ménage et par an.

CHAPITRE 2 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES MATERIAUX

Les matériaux de construction sont les constituants élémentaires d'un bâtiment. Ils sont fabriqués à partir de ressources naturelles que sont les minerais tels que le sable, le calcaire, l'argile, les minerais de fer bruts. Aussi les qualifions-nous de matériaux intermédiaires. L'ACV d'un matériau de construction donné s'appuie sur son procédé de fabrication. Cette partie de notre travail comporte deux volets.

Le premier traite d'une part des procédés de fabrication spécifiques à Madagascar et, d'autre part, de l'utilisation des principaux matériaux de construction les plus usités selon les enquêtes de l'INSTAT.

Le second volet est axé sur les facteurs d'émission associés à chaque matériau.

I. Présentation des matériaux et procédés de fabrication

Les produits de terre cuite, les briques, les granulats, la chaux, considérés dans cette étude sont exclusivement fabriqués à Madagascar. La majeure partie de matériaux de construction en bois provient des ressources et de plantations forestières usinées localement. Seul trois huitième du ciment utilisé est produit sur place. Les matériaux métalliques et les vitreries sont importés en totalité de divers pays.

Si les procédés locaux de fabrication de ciment et de chaux sont conformes aux procédés universels, ceux des produits en argile cuite présentent des particularités. Aussi, nous les avons largement développés. Notre investigation a également porté sur les moyens mis en œuvre, en particulier les consommations énergétiques pour la fabrication des produits locaux.

Les facteurs d'émission de certains produits auxiliaires nécessaires à la construction de bâtiment comme le revêtement d'étanchéité, l'huile de décoffrage, les carrelages, la moquette et les plaques de plâtre sont aussi présentés à la fin de ce chapitre.

I.1. Matériaux de terre cuite

La fabrication industrielle de produits de terre cuite est inexistante à Madagascar. La plupart des matériaux en terre cuite sont produits artisanalement. Ce secteur est dominé par le secteur informel (petite entreprise familiale composée de 3 ou 4 artisans, pas de mécanisation, exploitation situant dans les rizières).

La fabrication semi-industrielle, moins répandue, se développe de plus en plus.

Les matériaux de terre cuite regroupent les produits pleins tels les briques pleines, les tuiles et les produits perforés tel les hourdis.

I.1.1. Fabrication artisanale de briques

Ce type de fabrication produit essentiellement de briques pleines et de tuiles plates. Les données relatives aux techniques de production, aux quantités de matières premières et les sources d'énergie utilisées sont obtenues auprès des artisans ([figure 12](#)). Nous avons enquêté sur quatre sites de production de briques de terre cuite d'Antananarivo sis à Sabotsy Namehana, Vontovorona, Anosizato, et Ambohitrimanjaka ([annexe 5](#)).

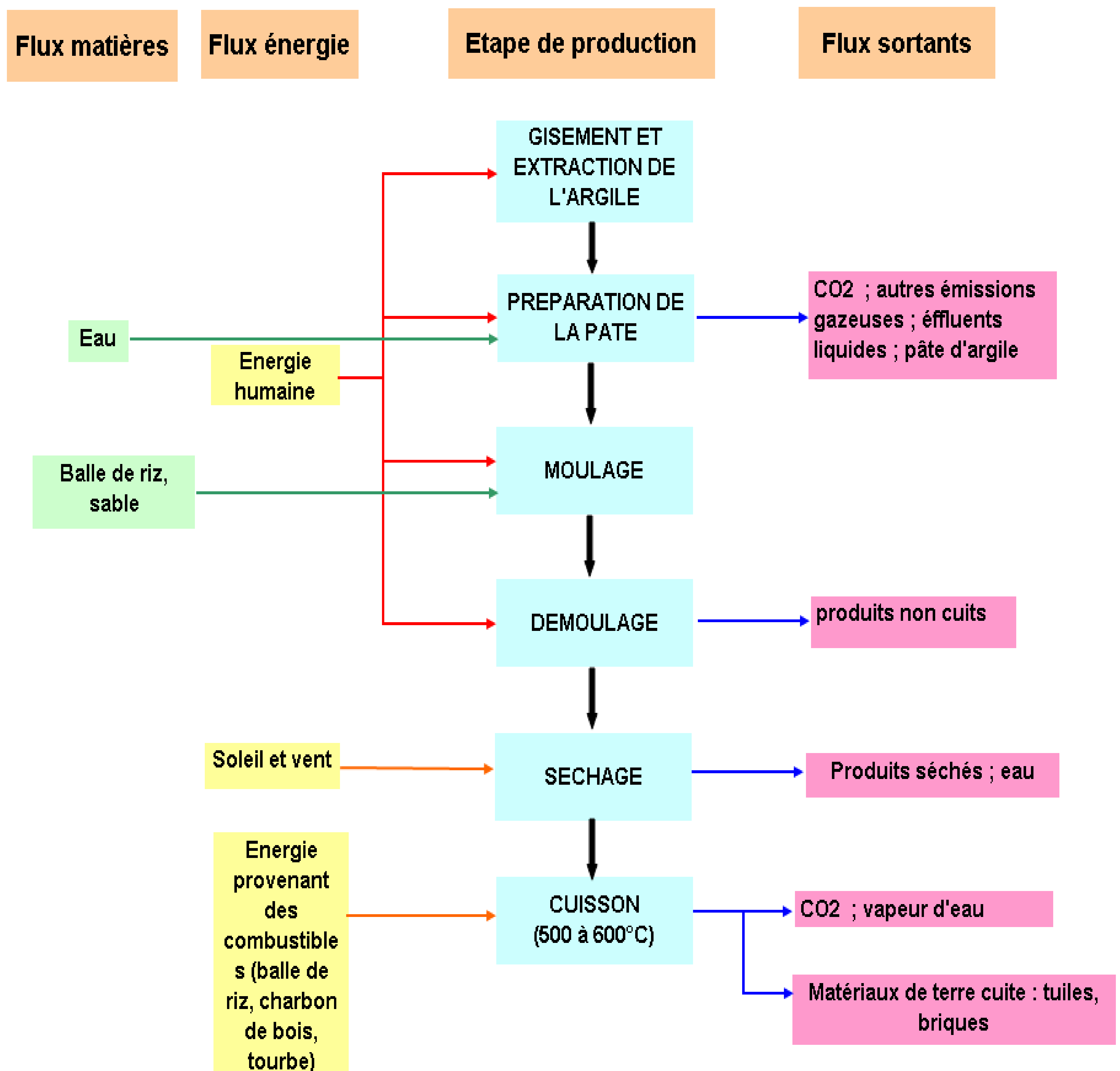


Figure 12 : Processus de fabrication artisanale de produits de terre cuite.

Ce mode de la fabrication artisanale est caractérisé par la prédominance de l'énergie humaine (tableau 2).

Tableau 2 : Types et postes de consommation énergétique de la production artisanale locale de briques de terre cuite

Type d'énergie	Mécanique humaine	Solaire (rayonnement direct)	Biomasse (Balles de riz, bois et dérivées, tourbes)
Postes de consommation	<ul style="list-style-type: none"> - Extraction des matières premières - Transports des matières premières - Mise en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Séchage 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuisson

- Gîte

La terre argileuse servant à fabriquer les briques ou tuiles artisanales est fréquemment extraite du sol de rizière, dont le propriétaire touche une redevance.

- Extraction et préparation de la matière première

L'extraction se fait manuellement, la terre étant ensuite foulée aux pieds et brassée avec une bêche en même temps qu'on lui ajoute de la quantité d'eau nécessaire, environ 30 % en masse, qui provient autant que possible d'une zone inondée se trouvant à proximité de la glaisière. L'argile est aussi mélangée avec du dégraissant, le plus couramment utilisé est le sable, de granulométrie comprise entre 0,3 à 1 mm, mais souvent, les artisans briquetiers utilisent aussi des argiles latéritiques se trouvant sur la couche superficielle des argiles ou d'argile cuite broyée dite chamotte.

- Moulage

Le mélange plastique suscité est laissé se reposer jusqu'au lendemain pour que le pourrissage puisse se faire, après quoi, ceci est brassé de nouveau afin de le porter au meilleur. La méthode de moulage couramment utilisée est intermédiaire entre le moulage à la balle de riz et celui en sable, ce fait est pour que la pâte ne se colle pas. Un saupoudrage du fond du moule est effectué, qui est fixe et maintenu en oblique par un

piquet haut de 80 cm environ. En outre, les parois du moule sont trempées dans l'eau avant de le placer sur le fond. Une masse d'argile de volume légèrement supérieur à celui du moule est prise, puis jetée d'une hauteur d'environ 25 cm. Le but est d'avoir une bonne compacité de la pâte dans le moule. Ces opérations reposent arbitrairement sur l'expérience des artisans (figure 13).



Figure 13: Moulage et des briques de terre avant cuisson.

- Démoulage

La matière moulée est enlevée en même temps que les parois du moule : elle est maintenue en place par une planchette pendant que les parois du moule sont retirées vers le haut. Le sable qui se trouve alors au-dessous de cette dernière permet d'enlever plus facilement la planchette qui servira au moulage de la brique suivante puis elle est transportée sur une aire de séchage.

- Séchage

Celui-ci se fait à l'air libre, il est à noter que la fabrication s'exécute essentiellement pendant la saison sèche (entre Mai et Septembre). Au bout de quelques jours, les briques séchées et endurcies sont empilées en formant de longs murs autour des aires de fabrication et de séchage. Elles restent là en attendant de passer à la cuisson.

- Cuisson

Combustibles

Celles-ci sont essentiellement assurées par la balle de riz, de bois ou de la tourbe. Quelquefois, on utilise des mélanges de ces combustibles.

Four

Le four en tas (modèle discontinu) a été utilisé pendant des siècles dans le monde entier. La température de cuisson est de l'ordre de 500 à 600°C. C'est le modèle de four utilisé à Madagascar qui est d'ailleurs le plus simple à construire et moins coûteux (figure 14). Il se compose d'une pile de 4 000 à 10 000 de briques soigneusement.

Dans le socle de four, sont pratiqués des tunnels de chauffe d'une hauteur égale à celle de 8 briques. C'est dans ces galeries de chauffe qu'on brûle les combustibles. Les briques séchées étaient empilées sur une hauteur de 2,5m environ au-dessus du sol. Le four qui contenait les briques, était enduit en toute surface d'une couche de boue destinée à colmater les brèches pouvant laisser passer l'air. La durée de cuisson varie de 7 à 12 jours suivant le nombre de briques.



Figure 14 : Four de cuisson pour les briques de terre.

Les besoins en matériaux de terre cuite de la population malgache sont assurés principalement par le secteur artisanal et complétés par la fabrication semi-industrielle. A Antananarivo, il n'y a que quelques usines de production semi-industrielle. Les données utilisées dans ce travail concernant ce mode de production sont recueillies auprès de la briqueterie d'Ambohimena (Ambatolampy) située à 95km d'Antananarivo. Cette unité de production ne produit que des briques perforées de dimension 20cm x 20cm x 40cm.

I.1.2. Fabrication semi-industrielle de briques

La production (figure 15) comprend plusieurs étapes dont les principales sont :

- l'extraction des matières premières,
- la préparation de la pâte,

- le façonnage,
- le séchage et
- la cuisson.

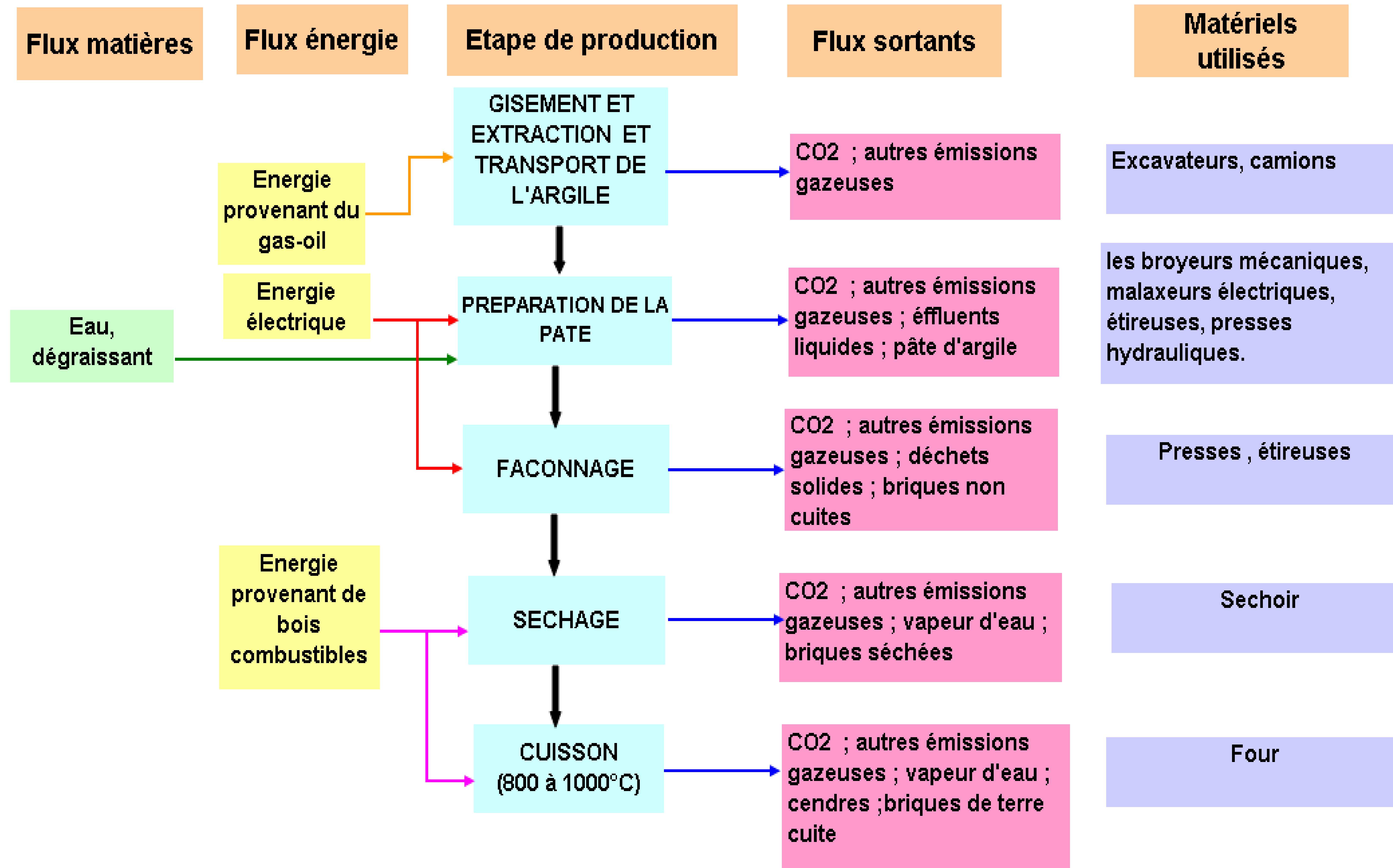


Figure 15 : Processus élémentaires de la fabrication semi- industrielle de briques en terre cuite.

Les différents types et les postes de consommation d'énergie sont présentés dans le [tableau 3](#).

Tableau 3 : Type et postes de consommation énergétique de la production semi-industrielle locale de briques en terre cuite

Type d'énergie	Combustibles fossiles	Electricité	Biomasse (Balles de riz, bois et dérivées, tourbes)
Postes de consommation	- Extraction et transport de l'argile	- Préparation de la pâte	- Séchage - Cuisson

- Extraction des matières premières et préparation de la pâte

L'argile constitue la matière première de base des produits en terre cuite. Les dégraissants, des matières inertes qui facilitent l'évacuation de l'eau pendant le séchage et le dégagement gazeux pendant la cuisson, sont mélangés à l'argile dans de faibles proportions. L'argile subit une préparation spéciale comme le concassage, le broyage et le tamisage afin d'obtenir une faible granulométrie. L'argile et les dégraissants sont extraits du sol de rizière situant aux alentours de l'usine de production de briques. Le transport se fait par des camions fonctionnant au gas-oil.

- Matériels utilisés

On utilise des matériels et électriques tels les broyeurs mécaniques, malaxeurs électriques, étireuses, presses hydrauliques. Quelques usines se sont équipées de presses automatiques à hautes performances utilisant.

- Façonnage

Le pressage est complété par l'étirage. Certaines briques pleines sont directement formées par pressage d'une terre relativement maigre dans un moule métallique.

- **Séchage**

Les briques sont séchées par des bois comme le pin et l'eucalyptus pendant 36 heures pour éliminer l'eau avant la cuisson.

- **La cuisson**

La température de cuisson peut atteindre de 800°C à 1000°C. Les combustibles utilisés pour les fours (figure 16) sont le bois, plus précisément l'eucalyptus (figure 17).



Figure 16: Four semi-industriel (briqueterie d'Ambohimena).



Figure 17 : Bois de feu utilisés pour source d'énergie pour la cuisson et le séchage (briqueterie d'Ambohimena).

A part les briques de terres cuites, actuellement, on constate un développement de la fabrication de briques de terre stabilisées.

I.2. Briques stabilisées

Les principales matières premières sont la latérite et les liants qui peuvent être du ciment ou de la chaux. Les briques stabilisées sont utilisées dans la construction pour la mise en œuvre des murs et cloisons des bâtiments.

I.3. Le bois

Le bois est un matériau que les industries de première transformation modifient et amènent sous de multiples formes: bois sciés, lamellés collés, panneaux, pièces aboutées, ... (figure 18).

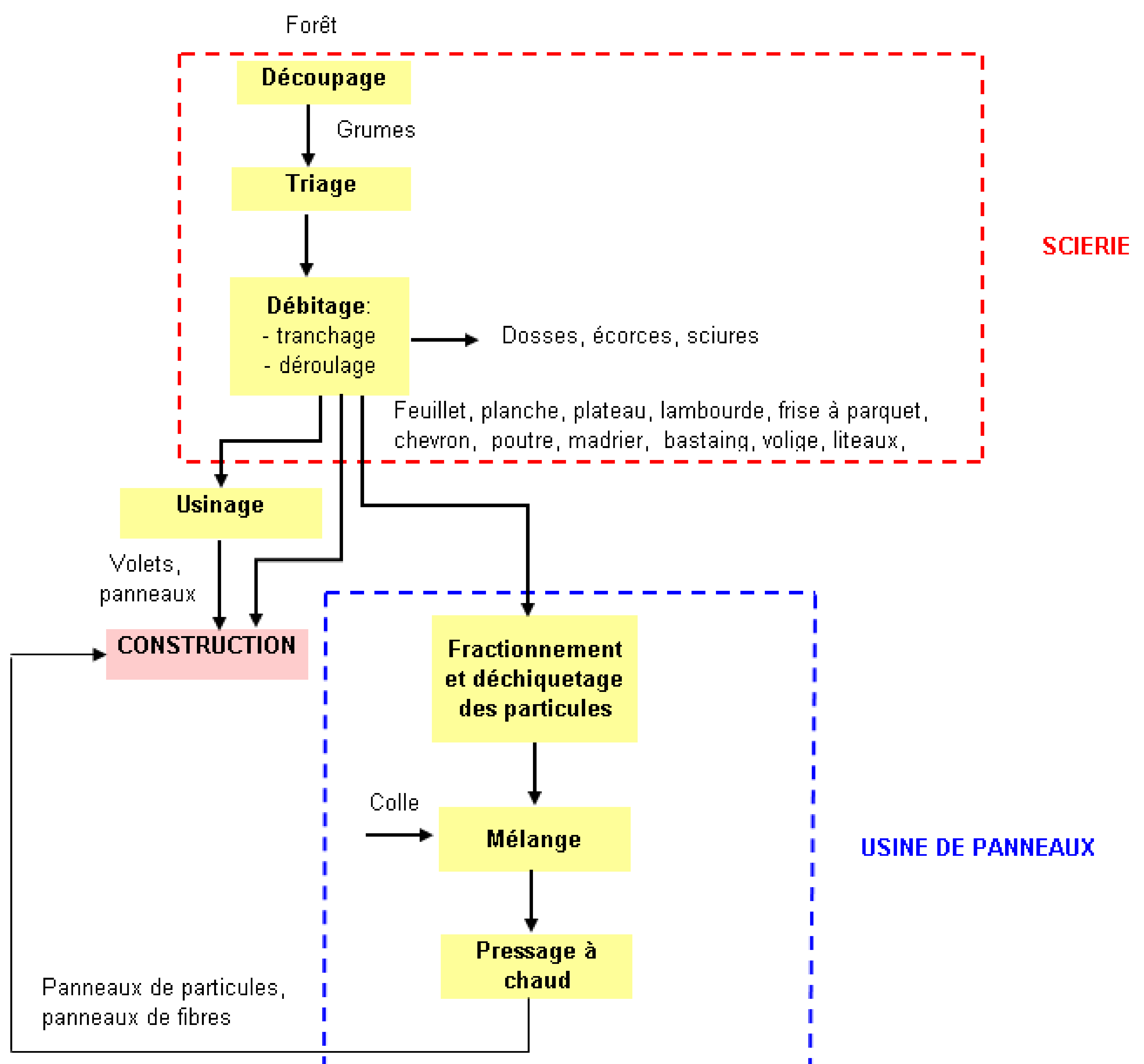


Figure 18 : Les différents traitements de bois et les produits obtenus.

- **Origine**

Les plantations de bois à Madagascar proviennent des :

- végétations naturelles appartenant au gouvernement,
- plantations des communautés villageoises travaillant avec l'ANAE (Association Nationale pour l'Action Environnementale), coopération japonaise, et le SAF FJKM et
- plantations des propriétaires privées : villageois, planteurs industriels.

Tableau 4 : Types et postes de consommation énergétique de la production locale de produits dérivés du bois

Type d'énergie	Mécanique humaine	Electricité	Solaire (rayonnement direct)
Postes de consommation	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Extraction - Transports - Mise en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Débitage - Transformation - Etuvage 	<ul style="list-style-type: none"> - Séchage

➤ **Utilisation**

Comme matériau, le bois s'emploie dans le domaine de la construction, soit directement comme matériau (planches) soit comme matière première, par exemple pour la fabrication d'éléments de menuiserie (volets pleins en bois) soit pour la réalisation de matériaux dérivés (panneaux de particules et contreplaqués) (figure 18).

I.4. Chaux

La chaux est un oxyde de calcium CaO obtenu par la calcination des pierres à chaux. Elle peut être du calcaire CaCO₃ ou de la dolomite CaCO₃, MgCO₃. Pour les transformer en chaux, on leur fait perdre leur CO₂ par calcination aux alentours de 825°C.



Le CaO obtenu est inondé d'eau, ce qui déclenche un lent processus dit extinction donnant des variétés différentes en fonction notamment de la quantité d'eau initiale : le

grassello (chaux éteinte en pâte), le lait de chaux et enfin l'eau de chaux, hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$, soit la chaux "typique", bien éteinte, séchée, se présentant sous forme de poudre.



En séchant, la chaux absorbe et fixe plus ou moins lentement le dioxyde de carbone atmosphérique ou marin. Dans le cas de certains mortiers, ce processus peut s'étaler sur des siècles.

A Madagascar, CHAUMAD assure une grande partie de la production de chaux. Cependant, il existe de petites entreprises qui fabriquent de façon artisanale.

La chaux, additionnée de l'eau ou de ciment ou sable peut être utilisée comme mortier de scellement, pour enduit, pour badigeonnage (figure 19).

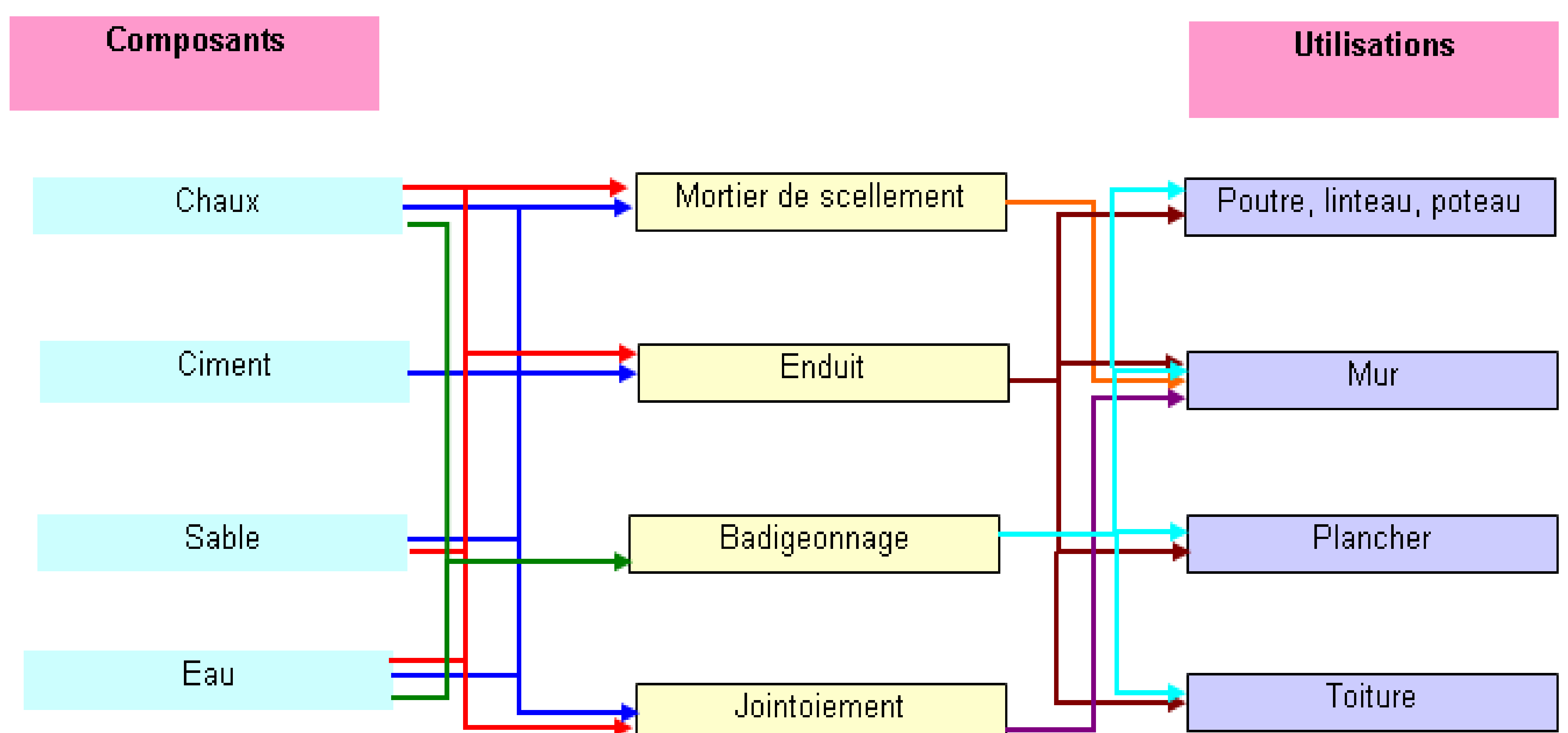


Figure 19 : Utilisation de la chaux dans la construction de bâtiment.

I.5. Ciment et produits à base de ciment

Le ciment entre dans la composition de divers produits nécessaires à la construction d'un bâtiment, notamment le béton, le mortier et les produits moulés. Divers types de béton sont retenus suivant l'utilisation à laquelle il est destiné : fondation, mur, plancher, toiture, poteau, poutre, linteau. Il en est de même du mortier. Nous

considérons ainsi les mortiers pour scellement, pour chape, pour enduits et pour jointoiement des murs (figure 20).

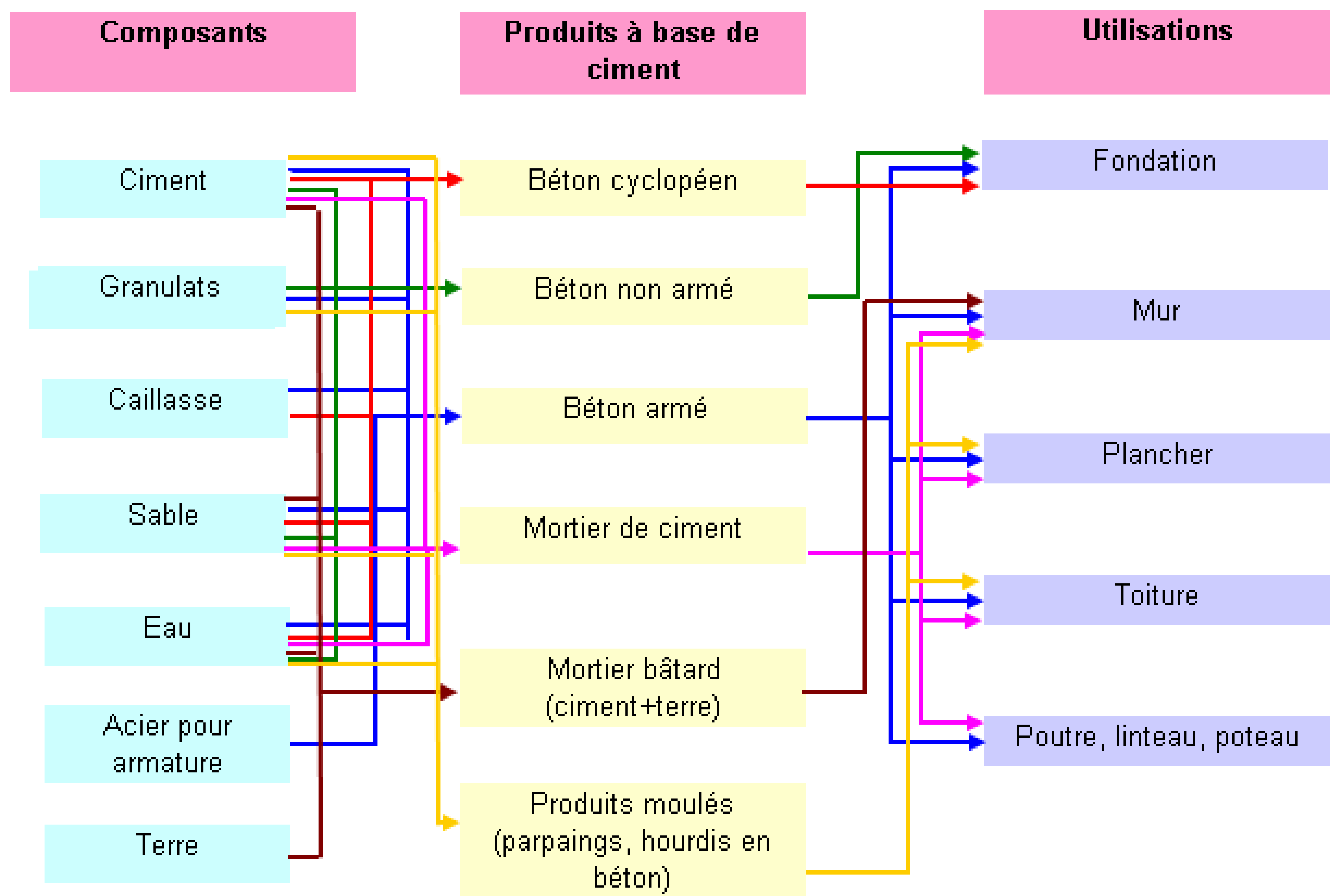


Figure 20 : Produits à base de ciment et leurs utilisations dans le bâtiment.

I.6. Acier

L'acier est un alliage métallique à base de fer contenant du carbone (< 2 %) et éventuellement des éléments d'addition dits éléments d'alliage. L'acier peut être produit par fusion de minerai de fer et de coke dans des Hauts Fourneaux (environ 2000°C) puis affinage dans un convertisseur à oxygène, soit par fusion de ferrailles de récupération dans des fours électriques (environ 1600°C).

L'acier obtenu est ensuite laminé pour produire soit des produits longs (poutrelles, profilés, barres, fils...), soit des produits plats (plaques, tôles en feuilles ou en bobines...) nécessaires pour la toiture, pour les ferrillages des bétons, etc. soit des accessoires en acier (menuiserie) (figure 21).

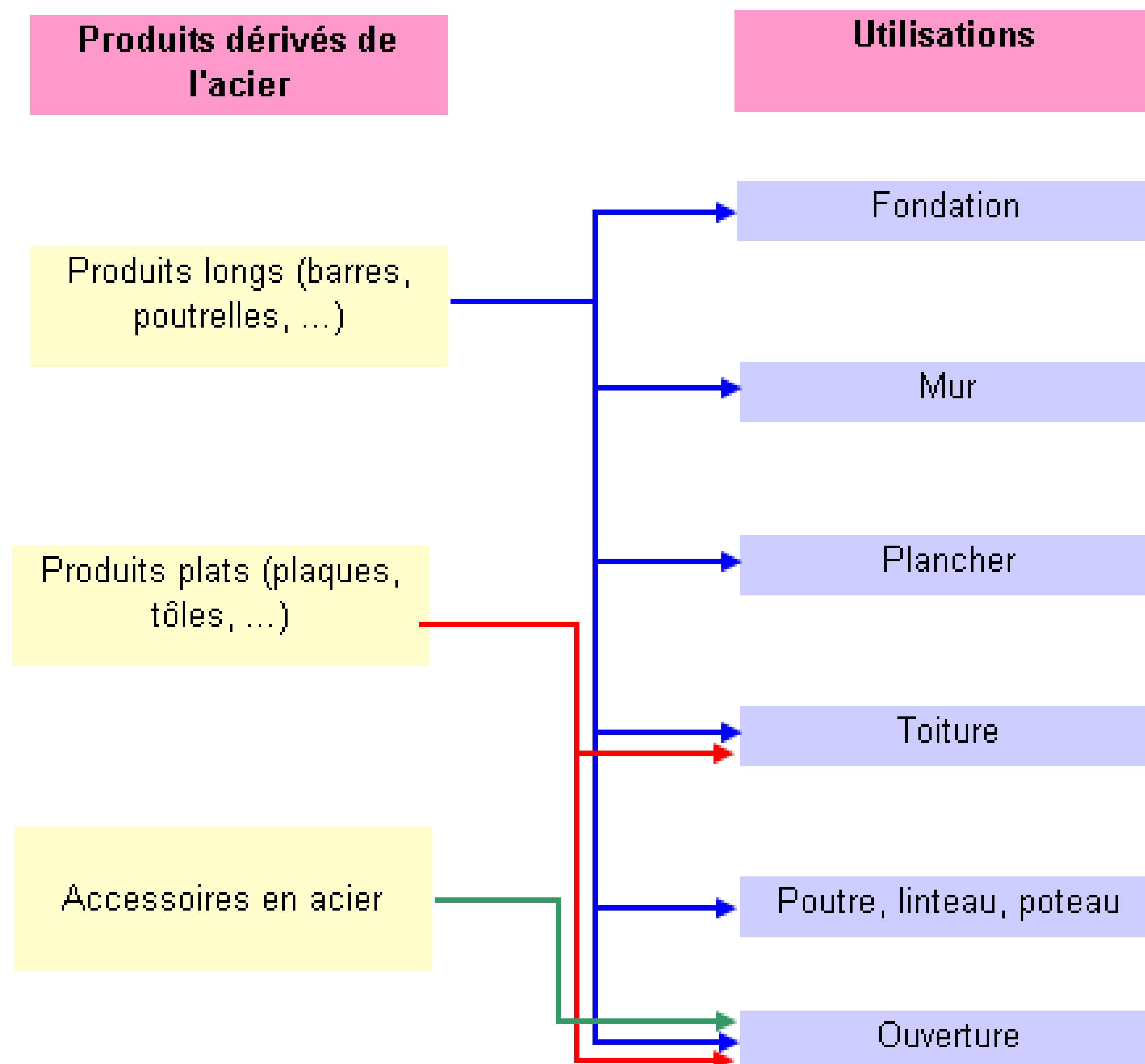


Figure 21 : Utilisation de l'acier dans la construction de bâtiment.

I.7. Verre

Le verre est un matériau amorphe présentant le phénomène de transition vitreuse. Les vitrages des bâtiments sont fabriqués à partir des verres silico-sodo-calcique.

II. Les facteurs d'émission

II.1. Les paramètres

Les principales sources de disparité dans les valeurs de facteurs d'émission d'un même produit sont :

- les compositions des matières premières,
- les procédés de fabrication,
- les formes d'énergie et/ou les combustibles utilisés dans le processus de fabrication.

Les données que nous avons retenues sont issues d'une part d'une analyse de l'inventaire bibliographique et, d'autre part, d'une estimation à partir des données d'enquêtes recueillies auprès des fabricants locaux..

II.2. Les valeurs des facteurs d'émission

II.2.1. Ciment

➤ Par recherches bibliographiques

D'après Janconvici 917kg de CO₂ sont émis pour produire 1 tonne de ciment [38].

En 2005, pour le groupe LAFARGE, 669 kg de CO₂ ont été émises pour produire 1 tonne de ciment. Tous les étapes de production sont considérées : de l'extraction jusqu'au conditionnement [37].

Enerdata, bureau d'études spécialisé dans les questions d'énergie [60] indique qu'il est nécessaire d'avoir une dépense énergétique d'environ 0,1 tep pour aboutir à une tonne de ciment, ce qui correspond à des émissions de CO₂ représentant environ 100 kg équivalent carbone par tonne en utilisant des combustibles très carbonés (vieux pneus, charbon, fioul lourd, etc.).

A partir du contenu en énergie du produit publié par le CEREN [36], on peut calculer qu'une tonne de clinkers (constituant prépondérant du ciment) conduit à l'émission de CO₂ à hauteur d'environ 70 kg équivalent carbone par tonne, donc une valeur proche.

Dans les deux cas de figure, la seule approche par les dépenses énergétiques ne permet pas de prendre en compte les émissions non énergétiques de cette industrie. En effet, l'industrie cimentière obtient sa matière première par décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO₃) ce qui engendre des émissions de CO₂ dit "non énergétique", c'est à dire qui ne découle pas d'une utilisation d'énergie.

Dans le mémento des décideurs, la Mission Interministérielle de l'effet de serre donne une valeur de 235 kg équivalent carbone par tonne de ciment (décarbonatation comprise) [37]. Enfin un rapide calcul effectué avec les documents proposés par l'initiative GHG [61] donne environ 250 kg équivalent carbone par tonne (tous les gaz sont pris en compte).

D'après GEMIS (Global Emission Model for Integrated System), un logiciel d'ACV, la fabrication de 1 tonne de ciment, en Allemagne, engendre 1864 kg de CO₂.

II.2.2. Granulats

➤ Par recherches bibliographiques

- Selon le CEREN, les consommations énergétiques liées à l'extraction des pierres sont faibles par unité de poids [37]. Les émissions en gaz carbonique relatives à la production de granulats sont essentiellement dues aux transports.

Compte tenu des valeurs obtenues pour les matériaux routiers de type graves qui sont de l'ordre de 5 kg équivalent carbone par tonne hors transport [9] et compte tenu du fait que les granulats nécessitent normalement plus de traitement que la pierre, on retiendra de manière provisoire 11kg de CO₂ par tonne (hors transport) [9]. Ces chiffres ne sont à considérer que comme des premières estimations et sont donc entachés d'une incertitude de 80% [9]. Dans ce travail, la valeur de l'émission en gaz carbonique considérée pour la production de sable est nulle, nous supposons qu'on utilise du sable de rivière.

D'après GEMIS , l'extraction de 1 tonne de granulats, en Allemagne, entraîne une émission de 6,13 kg de CO₂ tandis que pour 1 tonne de sable de rivière, en Tchécoslovaquie, il y a 1,02kg de CO₂.

II.2.3. Produits à base de ciment : parpaings

➤ Par recherches bibliographiques

On a une émission de 40,55 kg de CO₂ par tonne de parpaing.

II.2.4. Matériaux de terre cuite

Dans le cas de la fabrication des produits de terre cuite, on distingue :

- l'émission en CO₂ liée à la composition chimique des matières premières c'est-à-dire le phénomène de décarbonatation,
- l'émission en CO₂ engendrée par la consommation énergétique c'est-à-dire par combustion.

➤ **Par recherches bibliographiques**

Dans l'industrie, le charbon reste le combustible le plus avantageux en matière de coût. Au point de vue environnemental, l'utilisation exclusive de charbon comme source thermique engendre le maximum de rejet, soit 320kg de CO₂ par tonne de produit de terre cuite. La valeur minimale est de 160kg [36]. Dans d'autre document [63], une valeur de 190 kg de CO₂/kg de matériau de terre cuite est donnée mais sans aucune spécification sur les caractéristiques de l'argile, la nature des sources d'énergie utilisées et les origines des émissions. En outre, cette valeur ne tient compte que les dégagements durant les phases de façonnage, de séchage et de cuisson.

D'après Oekoinventare 1996 [35], le facteur d'émission relatif à la fabrication de briques cuites est de 250kg de CO₂/tonne de produit.

D'après GEMIS, la production de 1 tonne de briques d'argile cuite, en Allemagne, entraîne une émission de 189,89 kg de CO₂ et pour la fabrication 1 tonne de tuiles d'argile cuite, il y a une émission en dioxyde de carbone de 431,95kg.

➤ **Par estimation dans le cas de production locale**

Concernant la fabrication artisanale de briques de terre cuite à Madagascar, par notre estimation, nous avons une émission en gaz carbonique qui varie de 200,95kg à 878,80kg pour 10 000 briques de dimension 9cm x 10 cm x 20 cm. L'émission en gaz carbonique varie en fonction du type de combustible utilisé. La valeur minimale est obtenue si on utilise du mélange de balle de riz et de fine de charbon de bois c'est à dire 0,02kg de CO₂/brique. L'émission est maximale, 0,09kg de CO₂/brique si on cuit les briques avec du mélange de balle de riz et de la tourbe.

Pour la fabrication semi-industrielle de briques cuites, le transport des bois combustibles et l'extraction de l'argile à l'aide des tractopelles occupent une part importante au point de vue d'émission en dioxyde de carbone. Pour la fabrication de briques de terre creuse de dimension 20cm x 20cm x 40cm, on a une émission de 39,23 kg de CO₂ par tonne de produit.

Pour les tuiles de terre cuite de dimension 15cm x 23 cm, nous avons obtenu par estimation, une valeur de 32 kg de CO₂ par tonne de produit.

II.2.5. Briques stabilisées

➤ Par recherches bibliographiques

C'est l'extraction de la latérite qui émet le 80% du dioxyde de carbone. Les transports des stabilisants et de la latérite puis les productions du ciment et de la chaux à l'usine provoquent le 20% de l'émission [38].

➤ Par estimation dans le cas de production locale

Si on a des briques stabilisées avec de la chaux, on a une émission de 72kg de CO₂/tonne de brique. Quant aux briques stabilisées avec du ciment, on estime à 20kg de CO₂ par tonne de brique. Ces valeurs résultent principalement des émissions relatives aux productions des stabilisants. La presse considérée est manuelle.

II.2.6. Acier

➤ Par recherches bibliographiques

La récupération et le recyclage des ferrailles en fin de vie permettent de préserver les ressources (minerais, combustibles), et de réduire les émissions de CO₂.

C'est surtout la consommation énergétique pour la fusion du minerai de fer ou ferraille et pour le fonctionnement des machines qui génèrent de dioxyde de carbone.

Divers documents publient par des études d'Analyse de Cycle de Vie, des facteurs d'émission différents. Notons que l'agence fédérale américaine "Environment Protection Agency" [15] a publié un document dans lequel elle donne des valeurs comprises entre 2900 kg et 3560kg de gaz à effet de serre par tonne pour les canettes en acier, sans précision sur les gaz retenus.

Les facteurs d'émission moyens pour l'électricité aux USA sont 30% plus élevés que la moyenne européenne, d'où les valeurs élevées des facteurs d'émission des matériaux fabriqués aux USA [15].

Les valeurs données par la publication suisse sont de 3192 kg de CO₂ pour une tonne d'acier en première fonte, et 1100 kg de CO₂ pour une tonne d'acier entièrement issue du recyclage [9].

Selon l'ADEME [9], la production d'une tonne d'acier engendre une émission de 1,6 t de CO₂.

Selon Jancovici [38], il y a une émission de 2,9t de CO₂/t d'acier si l'acier est obtenu par fusion de minerai de fer. Et si l'acier est obtenu par fusion de ferrailles de récupération, l'émission est moindre et a une valeur de 1,1t de CO₂/ t d'acier.

Il est à noter que, à l'échelle mondiale, 40 % des aciers produits proviennent du recyclage des ferrailles [37].

D'après GEMIS , la production de 1 tonne d'acier, entraine une émission de 3659 kg de CO₂ (en Chine) et de 1650 kg de gaz carbonique (en Inde).

La production de 1 tonne de rouleau de tôle en Allemagne engendre 1536 kg de CO₂.

Concernant la fabrication de tôle, seule l'opération de profilage est effectuée à Madagascar. C'est le cas des usines comme « TSFM » à Mandrozeza, « Mateza tôle » à Ampitatafika, « PROMA » à Tanjombato et « Metallikit » à Soavimbahoaka.

II.2.7. Emission en gaz carbonique de la chaux

➤ Par recherches bibliographiques

D'après GEMIS la production en Allemagne, de 1 tonne de chaux provoque une émission en CO₂ de 1313kg.

➤ Par estimation dans le cas de production locale

D'après notre estimation, en tenant compte de toutes les données obtenues au sein de CHAUMAD :

- le calcaire utilisé par cette usine est du cipolin titrant plus de 98% de CaCO₃ avec un rendement de cuisson de 96%,
- la quantité d'électricité nécessaire pour produire une tonne de chaux est de 8 kWh,
- l'usine utilise un four vertical,
- la consommation spécifique de chaleur est de 3980KJ / kg de chaux,
- la production est de 80 t / heure, production de chaux de 450 t / jour, la quantité d'énergie requise est de 3980 KJ / kg de chaux,
- le combustible utilisé est le lignite avec un pouvoir calorifique inférieur de 25500 kJ / kg et une teneur en carbone de 70%

Nous avons obtenu une valeur de 1,027t de CO₂ par tonne de chaux.

Cette dernière englobe :

- l'émission engendrée par l'utilisation de lignite : 0,401tonne de CO₂/t de chaux

- l'émission engendrée par l'utilisation de l'électricité: 0,0057t de CO₂/tonne de chaux.
- l'émission causée par la réaction de décarbonatation : 0,62t de CO₂ par tonne de chaux

II.2.8. Emission en gaz carbonique du verre

➤ Par recherches bibliographiques

D'après Boustead [47], la fabrication d'un double vitrage Haut Rendement comportant deux feuilles de verre de 5 mm d'épaisseur engendre l'émission de 2500kg de dioxyde de carbone par m³ de verre.

Le Mémento des Décideurs [37] donne la valeur de 1520 kg de gaz carbonique par tonne de verre plat produit.

D'un autre côté, une valeur de 1,3kg de CO₂/kg de verre est retenue par deam database [40], équivalente à 3120kg de gaz carbonique par m³ de verre la densité de verre est de 2,4.

D'après GEMIS , la production de 1 tonne de verre pour fenêtre, produit en Allemagne, entraine une émission de 1063 kg de CO₂.

II.2.9. Emission de gaz carbonique causée par le travail du

bois

➤ Par recherches bibliographiques

Dans le mémento des décideurs de la MIES, pour une tonne de bois, on a de -500 kg équivalent carbone [9].

D'après GEMIS , la production de 1 tonne de planche de bois, produite en Allemagne, entraine une émission de 63 kg de CO₂.

➤ Par estimation dans le cas de production locale

Pour ce travail, nous n'allons pas prendre la valeur négative. A Madagascar, on constate actuellement le phénomène de déforestation, En effet, en l'absence de replantation, le fait de couper un arbre pour le transformer en charpente ne fait que déplacer un stock existant, mais n'en reconstitue aucun. Dans le cas où les bois de forêts ne sont pas bien

gérés, et où les coupes ne sont pas compensées par des plantations, on ne peut donc pas parler de puits de carbone. Dans ce travail, nous tenons compte des émissions dues à la consommation énergétique pour le débitage et au transport des bois.

Des mesures effectuées au sein des usines de débitage nous permettent d'obtenir les quantités d'électricité relatives aux productions d'une unité de planche (4m x 0,2m x 0,015m), une unité de volige (4m x 0,1m x 0,01m) et une unité de madrier (4m x 0,17m x 0,07m). Ce qui nous amène à quantifier les quantités de gaz carbonique émises lors de la production de ces produits.

II.2.10. Les valeurs des facteurs d'émission des matériaux retenues dans cette étude

Le facteur d'émission en gaz carbonique d'un produit varie d'un pays à un autre. La différence dépend essentiellement des caractéristiques des matières premières, du processus de production et de la source d'énergie utilisée.

- Briques de terre cuite de 9 cm x 11cm x 22 cm : nous prenons l'estimation concernant la production artisanale locale. Nous prenons la moyenne des valeurs obtenues, d'où 27kg de CO₂ par tonne de produit.
- Tuiles de terre cuite de 15cm x 23 cm : par notre estimation, on a 32 kg par tonne de produit.
- Hourdis de terre cuite de 15cm x 33cm x 33cm : par notre estimation, on a 39,23kg de CO₂ par tonne de produit.
- Hourdis en béton de 20cm x 20cm x 53cm : par notre estimation, on a 93,75 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Briques stabilisées de 9 cm x 11cm x 22 cm : 46kg de CO₂ par tonne de produit. Valeur moyenne obtenue des facteurs d'émission des briques stabilisées d'une part avec 3% de ciment et d'autre part avec 7% de chaux.
- Ciment : 669 kg de CO₂ par tonne de produit, données de LAFARGE.
- Granulats (gravillon et caillasse) obtenu par dynamitage : 6,13 kg de CO₂ par tonne de produit. Cette valeur est déduite de GEMIS.
- Sable de rivière : nous prenons une émission de 0 kg de CO₂ par tonne de sable, car ce dernier est supposé extrait manuellement.
- Parpaing : 40,55 kg de CO₂ par tonne de produit.

- Hourdis en béton : 40,55 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Chaux : par notre estimation, on a 1027 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Acier pour armature : en tenant compte qu'à l'échelle mondiale, 40 % des aciers produits proviennent du recyclage des ferrailles et prenant la valeur donnée par Jancovici [38], on a 2180kg de CO₂ par tonne d'acier.
- Tôle : 1536t de CO₂ par tonne de tôle. Cette valeur est donnée par GEMIS.
- Aluminium : 1947 kg de CO₂ par tonne de produit. Emission relative de GEMIS au procédé de fabrication des pays en développement.
- Verre pour fenêtre : 1063 kg de CO₂ par tonne de produit. Cette valeur est déduite de GEMIS.
- Plâtre : 136 kg de CO₂ par tonne de produit [9].
- Planche : par notre estimation, on a 29,35 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Madrier : par notre estimation, on a 13,34 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Chevron : par notre estimation, on a 29,35 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Latte : par notre estimation, on a 29,35 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Parquet à l'anglaise : par notre estimation, on a 71,17 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Parquet à coller : par notre estimation, on a 240 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Volige : par notre estimation, on a 92 kg de CO₂ par tonne de produit.
- Carreau pour sol : 1400 kg de CO₂ par tonne de produit [37].
- Moquette : 800 [47].
- Revêtement d'étanchéité : 42,85 kg de CO₂ par tonne de produit [47].
- Huile de décoffrage : par manque de données, nous prenons une valeur de 3160kg par tonne de produit.

Les valeurs des facteurs d'émission retenues pour cette étude sont présentées dans le [tableau 5](#).

Tableau 5 : Valeurs des facteurs d'émission en gaz carbonique retenues pour l'étude

Matériau	Facteurs d'émission de quelques matériaux [kg de CO ₂ /t de matériau]
Brique de terre cuite	27
Tuile de terre cuite	32
Hourdis de terre cuite	39,23
Briques stabilisées	46
Ciment	669
Gravillon	6,13
Sable de rivière	0
Parpaing	40,55
Hourdis en béton	40,55
Chaux	1027
Acier pour armature	2180
Tôle	1536
Aluminium	1946
Verre pour fenêtre	1063
Plâtre	136
Bois :	
- Planche	29,35
- Madrier	13,34
- Chevron	29,35
- Latte	71,17
- Parquet à l'anglaise	240
- Parquet à coller	92
- Volige	

ESTIMATION DE L'EMISSION DE CO2 D'HABITAT TYPIQUE A MADAGASCAR PAR L'ACV

Carreau pour sol	1400
Moquette	800
Revêtement d'étanchéité	42,85
Huile de décoffrage	3160

CHAPITRE 3 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT

Comme nous avons signalé dans la méthodologie ([Partie II, Chapitre 1](#)), le bâtiment est un système complexe, nous le décomposons en différents ouvrages fonctionnels.

Le choix des matériaux de construction pour chaque ouvrage fonctionnel, est déduit des données statistiques [\[1\]](#). Les cas à considérer sont représentés par la [figure 22](#).

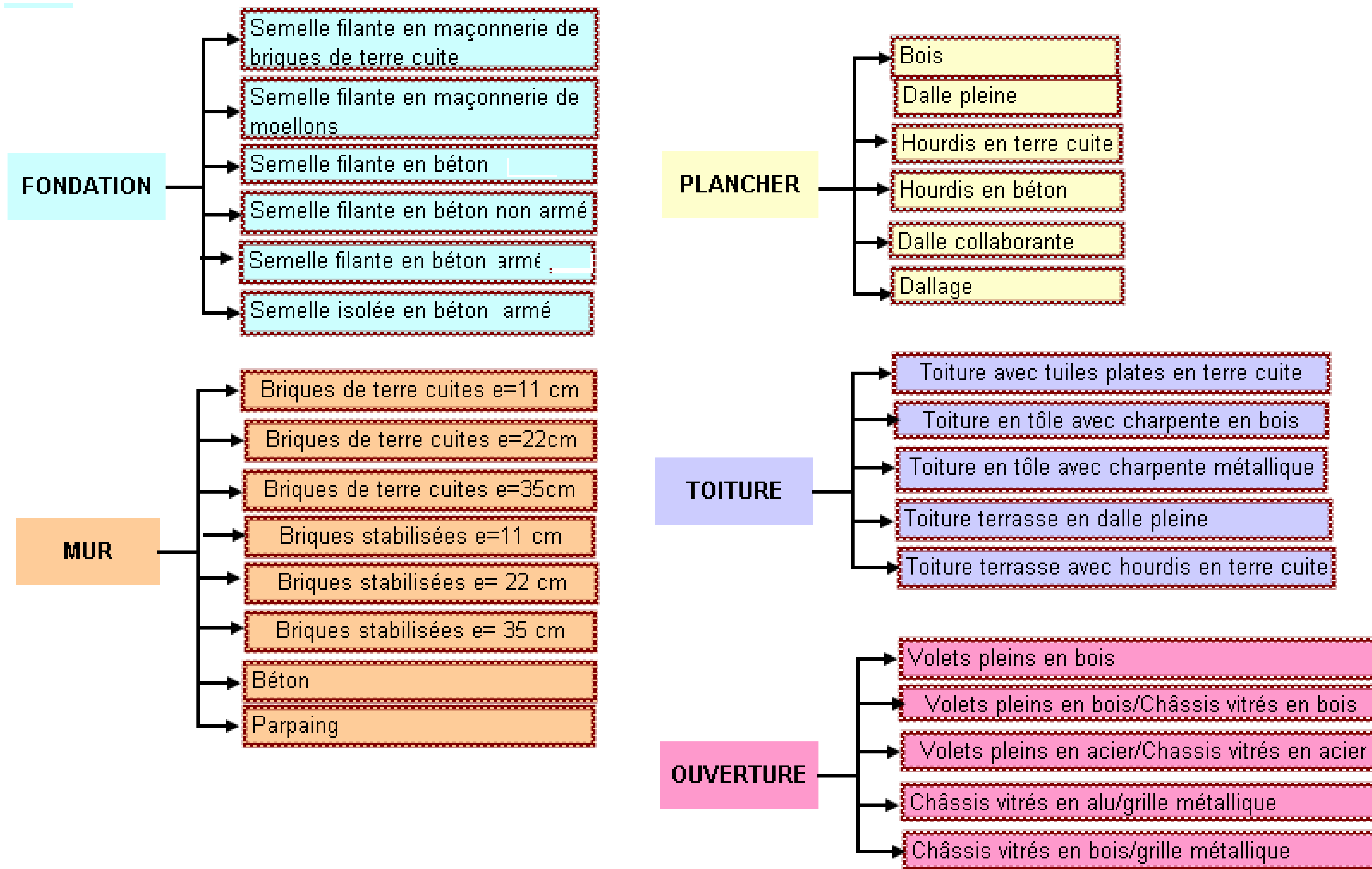


Figure 22 : Les ouvrages fonctionnels avec les différents types de matériaux de construction.

I. Mode de calcul

On devra tenir compte de la durée de vie typique de chaque ouvrage fonctionnel car on devra entretenir pour lui conserver son habitabilité.

L'Unité Fonctionnelle est fixée pour chaque ouvrage fonctionnel pour une période de 50 ans (tableau 6). La plupart des ouvrages s'accordent à cette durée de vie [41], [42], [43] et [44].

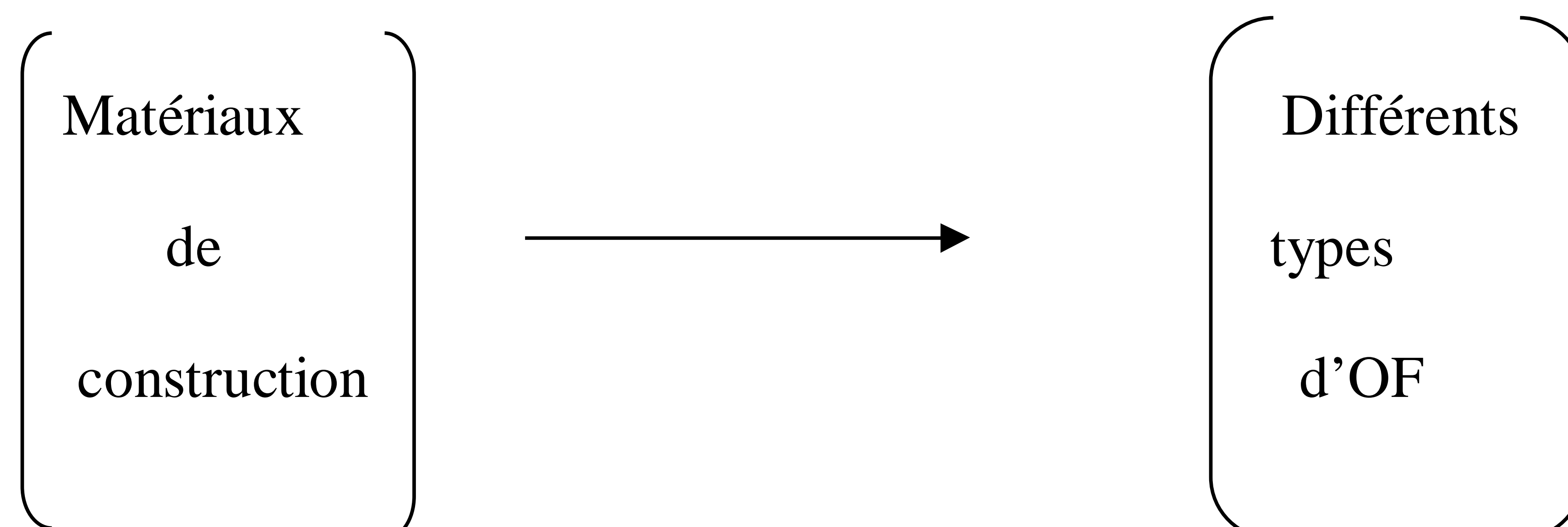
Tableau 6: Unité Fonctionnelle pour chaque ouvrage fonctionnel.

Ouvrage fonctionnel	Unité Fonctionnelle (UF)
Toiture	1 m ² de surface à couvrir
Mur / cloison	1 m ² de mur / cloison
Plancher	1 m ² de plancher
Fondation	1 mètre linéaire de fondation
Ouverture	1 unité de fenêtre ou porte

Pour chaque ouvrage fonctionnel, l'évaluation de CO₂ utilisés dans ce travail est basée sur des calculs matriciels s'inspirant des modèles Entrée / Sortie ou Input / Output qui repose sur la considération d'un ensemble d'éléments de départ d'une part et d'un ensemble d'éléments d'arrivée d'autre part. Les éléments de départ sont les matériaux de construction constituant chaque ouvrage fonctionnel tandis que les éléments d'arrivée sont les différents types d'OF.

Eléments de départ (i)

Eléments d'arrivée (ou produits finis) (j)



Les calculs tiennent compte toutes les étapes relatives à l'Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment, y compris celui des matériaux de construction. ([Partie I, Chapitre 2](#)) :

- production des matériaux de construction,
- transport des matériaux de l'usine de production jusqu'au chantier où ils seront utilisés,
- la mise en œuvre ou construction qui consiste en la mise en place des matériaux dans un ouvrage fonctionnel et le transport des déchets de mise en œuvre.
- l'entretien ou la maintenance qui est la mise en œuvre partielle des matériaux de remplacement pendant la période où le produit assure sa fonction dans le bâtiment.
- la fin de vie qui consiste en la dépose des matériaux lors d'une opération de démolition. Le transport des déchets liés à cette étape jusqu'au site de valorisation ou d'élimination est pris en compte.

Dans toutes les formules, nous avons les indices suivants :

i : indice correspondants aux éléments de départ (matériaux de construction).

j : indice correspondants aux produits finis (type d'ouvrage fonctionnel).

Soient I le nombre total de matériaux de construction et J le nombre d'OF.

I.1. Phase de production des matériaux

L'émission en CO₂ correspondant aux productions des divers matériaux nécessaires pour la mise en œuvre des différents types d'OF est donné par :

$$P' = Q \cdot P = (P'_j) \quad (1)$$

$P = (P_i)$ est une matrice colonne à I lignes, formée par les facteurs d'émission P_i , relatifs à la production de chaque matériau i ;

$Q = (Q_{ji})$ est une matrice rectangulaire ($I \times J$). Ses éléments représentent les quantités de matériaux de construction i nécessaires pour la mise en œuvre du type d'OF j [tonne] ;

$P' = (P'_j)$ est une matrice colonne à J lignes.

Représentation matricielle :

$$P' = \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1j} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_i \end{pmatrix}$$

I.2. Transport des éléments i , des usines de production vers le chantier où le type d'ouvrage fonctionnel j sera mis en œuvre

Le transport des matériaux de construction des usines de fabrication vers le chantier peut être :

- maritime et/ou,
- terrestre (routier ou ferroviaire) et
- rarement aérien.

I.2.1. Transport maritime

➤ Hypothèses et sources de données concernant le transport maritime

À propos des matériaux de construction importés tel le ciment, le fer à béton, les clous, la tôle, la vitrerie, les profilés en aluminium, les produits céramiques, etc., l'actuelle tendance pour nos principaux fournisseurs sont la France, la Chine et l'Afrique du Sud. Au cours de l'année 2006, trois marchandises sur quatre ont transité par ce port. Ce dernier est le premier port de Madagascar. Nous supposons alors que les matériaux de construction importés passent tous par celui-ci.

Concernant la distance des produits importés comme le ciment et l'acier, nous prenons une valeur moyenne de 12000km pour la distance entre les pays producteurs et le port

de Toamasina. C'est la moyenne des distances « France-Toamasina » et « Chine-Toamasina ».

En 2007, sur la demande locale en ciment est de 40 000 tonnes dont 25 000 tonnes sont importés [54]. Dans notre calcul relatif à l'émission en CO₂ lié au transport, nous tenons compte de cette proportion.

➤ **Disponibilité des données pour la distance "Tamatave – Antananarivo"**

Les distances entre Toamasina et les principaux pays fournisseurs de matériaux sont présentées dans le [tableau 7](#).

Tableau 7 : Distances entre Le port de Toamasina et les ports de quelques pays fournisseurs de matériaux de construction

Pays d'origine	Distance avec le port de Toamasina (km)
Afrique du Sud (Port Elizabeth)	1800
Chine (Hong Kong)	11400
France	13 000

➤ **Facteur d'émission en CO₂ du transport maritime**

Le facteur d'émission lié au transport maritime est lié au carburant consommé, aux taux de remplissage ainsi qu'à la distance à parcourir. Une valeur de **0,0097kg de CO₂/tonne.km** est évoquée sans tenir compte de l'émission liée à la fabrication du bateau et son entretien [9].

I.2.2.Transport terrestre

➤ Hypothèses et sources de données concernant le transport terrestre

Le transport routier des matériaux est encore dominant par rapport au transport ferroviaire. Ce dernier étant en déclin ces dernières années et en cours de redynamisation par la société madarail.

En 2007, seulement 3% des ciments importés ont été acheminés par chemin de fer [62]. Ce sont les hydrocarbures, les minerais et le riz qui sont les plus transportés par chemin de fer.

C'est pourquoi, nous prenons comme hypothèse que le transport des matériaux venant du port vers le chantier est routier.

Pour les matériaux importés, nous prenons une valeur de 400 km pour la distance entre Toamasina et Antananarivo étant donné que Toamasina est le premier port de Madagascar.

Pour les matériaux produits localement (produits moulés, granulats matériaux en bois), la distance entre le lieu de production de matériau et le chantier est variable :

En ACV, on suppose généralement un retour ou un aller à vide donc on multiplie par deux la distance.

➤ Facteur d'émission en CO₂ du transport routier

Des investigations [9] menées à l'étranger, ont démontré que le facteur d'émission du transport routier des marchandises est lié :

- à la consommation réelle du véhicule qui est fonction de sa classe PATC,
- au taux de remplissage moyen et
- au taux de distance à vide.

Dans le cas d'un véhicule avec une classe PTAC de 21,1 à 32,6 tonnes, avec une consommation moyenne de 42,8 litres de diesel/100km et un taux de remplissage moyen de 50%, on a **0,064kg de CO₂/tonne.km** [9]. La figure 23 présente des émissions entre les différents modes de transport.

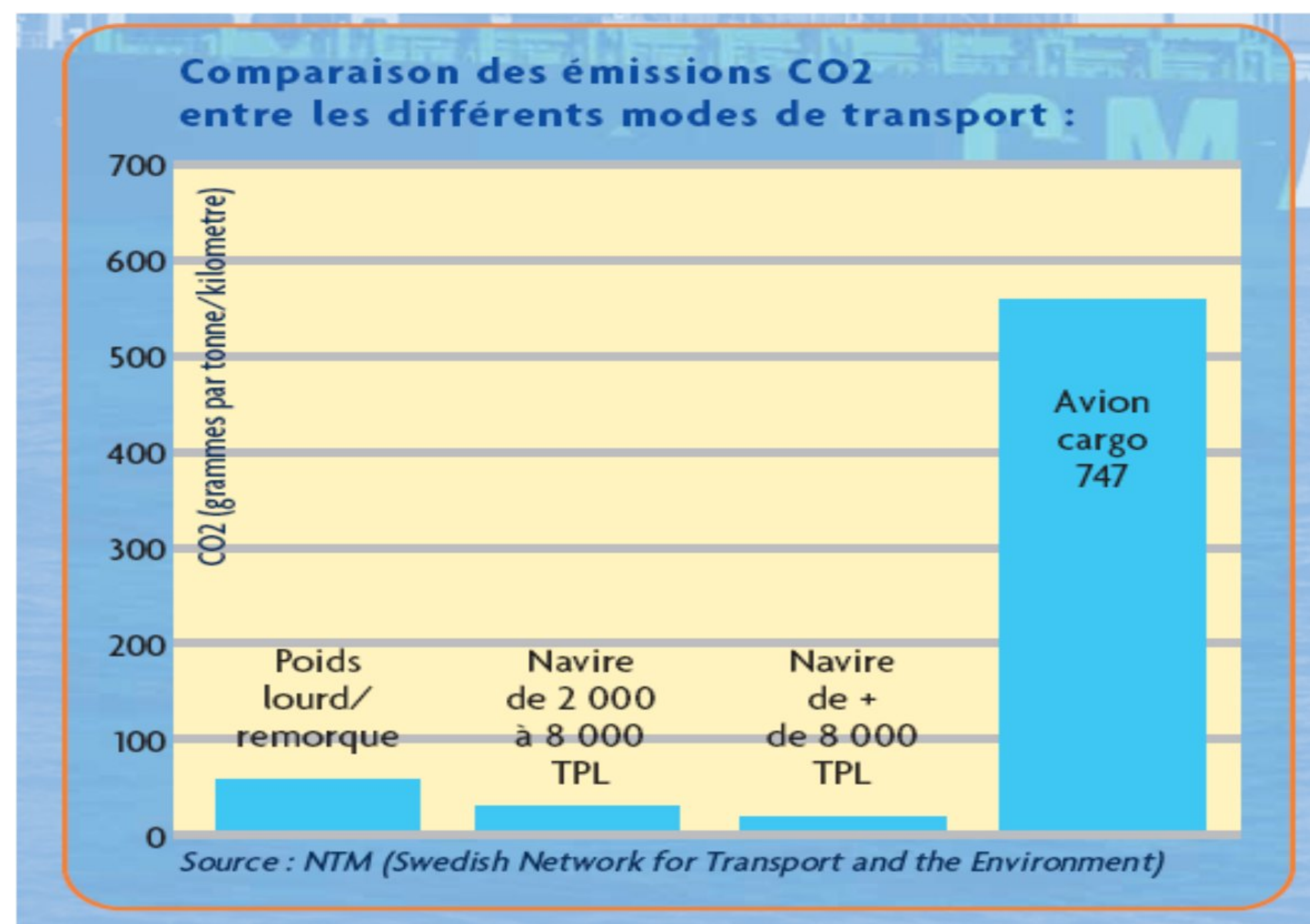


Figure 23: Comparaison des émissions entre les différents modes de transport (Source : Swedish Network for Transport and the Environment).

La quantité de gaz carbonique émis par le transport des matériaux du lieu de fabrication (ou d'extraction) est la somme de l'émission de dioxyde de carbone relative au transport des matériaux de l'usine de fabrication au port de Toamasina et celle liée au transport des produits du port au chantier.

- Si les matériaux sont importés :

$$T' = (T'_j) = T'_{usine-port} + T'_{port\ chantier} \quad (2)$$

Avec $T'_{usine-port} = f_{mar} \cdot (Q.d)$

$$T'_{port-chantier} = f_{rout} \cdot (Q.d')$$

- Si les matériaux sont produits localement :

$$T'_{usine-chantier} = f_{rout} \cdot (Q.d')$$

f_{mar} est le facteur d'émission lié au transport maritime et égal à 0,0097kg de CO₂/tonne.km.

f_{rout} est le facteur d'émission lié au transport routier et égal à 0,064kg de CO₂/tonne.km.

$d = (d_i)$ est une matrice colonne à I éléments, formée par les distances entre le lieu de fabrication du matériau i vers le port ;

$d' = (d'_i)$ est une matrice colonne à I éléments, formée par les distances entre le port de Toamasina et le chantier où le matériau i sera mis en œuvre ;

$T'=(T'_j)$ est une matrice colonne à J éléments.

Représentation matricielle :

$$T' = \begin{pmatrix} T'_1 \\ T'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ T'_j \end{pmatrix} = f_{mar} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\ \cdot \\ \cdot \\ \begin{pmatrix} Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \end{bmatrix} + f_{rout} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d'_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\ \cdot \\ \cdot \\ \begin{pmatrix} Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

I.3. Phase de mise en œuvre du type d'ouvrage fonctionnel j

La quantité de CO₂ émis pendant la phase de mise en œuvre englobe les émissions relatives, à la mise en œuvre proprement dite et aux transports des déchets.

La mise en œuvre peut être l'élévation d'une maçonnerie, de briques par exemple ou le façonnage des charpentes en bois ou la confection des menuiseries, etc. Dans certains cas, la mise en œuvre est effectuée manuellement et il ne nécessite que de l'énergie humaine. Dans d'autres cas, l'utilisation d'autres sources d'énergie est nécessaire. Par exemple la mise en œuvre des grilles de protection réclamant de l'électricité.

On a la formule suivante :

$$M' = [Q \cdot ((1-c) \cdot M)] + [f_{rout} \cdot ((c \cdot Q) \cdot l)] \quad (3)$$

$Q \cdot ((1-c) \cdot M)$ correspond à l'émission relative à la mise en œuvre proprement dite des OF.

$f_{rout} \cdot ((c \cdot Q) \cdot l)$ correspond à l'émission liée au transport des déchets de chantier,

c est le pourcentage des matériaux transformés en déchets lors de la mise en œuvre des OF [%].

$M = (M_i)$ est une matrice colonne à I éléments, formée des facteurs d'émission, de mise en œuvre, des éléments i .

$l=(l_i)$ est la matrice colonne à I éléments, formée par les distances entre le chantier et le lieu de traitement ou valorisation des déchets.

$M'=(M'_j)$ est une matrice colonne à J éléments.

Représentation matricielle :

$$M' = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1i} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \cdot (1-c) \cdot \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ M_i \end{pmatrix} + F_{rout} \cdot c \cdot \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1i} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l_i \end{pmatrix}$$

➤ Hypothèses et sources de données concernant la distance entre le chantier et le lieu de traitement ou valorisation des déchets

Dans cette étude, nous prenons une distance de 20 km, la distance entre le chantier et le décharge. La mise en décharge est encore la méthode de traitement la plus répandue dans le monde et adopté à 90% des cas dans les pays en développement comme Madagascar [50].

I.4. Phase de maintenance ou d'entretien

➤ Hypothèses et sources de données concernant la distance entre le chantier et le lieu de traitement ou valorisation des déchets

Pour un bâtiment, le gros œuvre nécessite peu d'entretien. La maçonnerie n'exige que des petites réparations, par exemple l'enduit. La charpente n'aura pas besoin d'entretien si la couverture est régulièrement entretenue. Lorsqu'une maison est neuve, les

dépenses d'entretien sont très réduites [41]. Le ratio d'entretien de chaque corps d'état est présenté par le [tableau 8](#).

Nous tenons compte de ces ratios d'entretien dans notre étude et les taux de remplacement correspondants à chaque OF sont représentés dans le [tableau 8](#) suivant.

Tableau 8 : Ratio d'entretien des principaux corps d'état (pour 50 ans) [41].

OF	Type d'OF	Eléments à remplacer	Pourcentage (%)
Toiture	Toiture en tuile	Couverture	60
		Charpente en bois	5
	Toiture en tôle	Couverture	60
		Charpente en bois	5
Mur	Mur en briques	Maçonnerie de briques	8
		Enduit (de ciment)	8
		Enduit (bâtard)	100
Ouverture		Menuiserie en bois	15
		Vitrierie	15
Plancher		Carrelage	80
		Parquet	100

Pendant la phase de maintenance, une partie de l'ouvrage fonctionnel est remplacé, cette quantité est présentée par la formule :

$$q = (q_{i,j}) = (f_{i,j} \cdot Q_{i,j}) \quad (4)$$

$q = (q_{i,j})$ = quantité de matériau i nécessaire pour l'entretien du produit j [tonne] ;

$$q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & q_{1i} \\ q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ q_{j1} & q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & q_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & f_{1i} \\ f_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{j1} & f_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & f_{ji} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{1i} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{bmatrix}$$

La quantité de CO₂ émis pendant la phase de maintenance englobe les émissions pour la production des matériaux, pour les transports de chaque matériau q_{ji} et pour la mise en œuvre. Celle-ci est exprimée par :

$$E' = (q.P) + [f_{mar} \cdot (q.d)] + [f_{rout} \cdot (q.d')] + [q \cdot ((1-c).M)] + [f_{rout} \cdot ((c.q).l)] \quad (5)$$

I.5. Phase de dépose ou démolition

La quantité de dioxyde de carbone émis lors de la démolition résulte en premier lieu la quantité émise lors de la dépose des $Q_{i,j}$, et en second lieu, les transports des déchets du chantier vers le lieu d'élimination des déchets. Celle-ci est donnée par :

$$D' = (Q.D) + [f_{rout} \cdot (Q.l)] \quad (6)$$

Représentation matricielle :

$$D' = \begin{pmatrix} D'_1 \\ D'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ D'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ij} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ D_i \end{pmatrix} + f_{rout} \cdot \left[\begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ij} \\ Q_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdot & \cdot & \cdot & Q_{ji} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l'_1 \\ l'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l'_i \end{pmatrix} \right]$$

1.6. Emission totale en CO₂ relative à chaque type d'ouvrage fonctionnel pendant son cycle de vie

La quantité de gaz carbonique émise, pour chaque ouvrage fonctionnel, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la démolition, pour une période de 50 ans est donnée par « Unité Fonctionnelle » et a pour expression :

$$F = P' + T' + M' + E' + D' \quad (7)$$

Pour un OF donné, F est une matrice colonne à J éléments, composée par les émissions en CO₂, de chaque type d'ouvrage fonctionnel, par UF, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la démolition du bâtiment, pour une période de 50 ans.

II. Les ouvrages fonctionnels

II.1. La toiture

II.1.1. Fonction et éléments constitutifs de la toiture

La fonction de la toiture est de « couvrir » un bâtiment. La toiture est composée en général de couverture et de charpente. Le paramètre clé majeur de la toiture est la pente.

II.1.2. Les différents types de toiture

Nous étudions ici trois types de toitures, selon la couverture : la toiture en tuiles, toiture en tôle et toiture terrasse en béton. Cette dernière peut être en dalle pleine, en corps creux en terre cuite, en hourdis en béton, ou en dalle collaborante.

II.1.2.1. Toiture en tuiles

- **La couverture**

Pour cette étude, la couverture est formée par des tuiles plates de terre cuite de dimension 15cm de large, 23cm de long, et 1cm d'épaisseur. Ce sont des tuiles fabriquées artisanalement.

Pour la pose, nous prenons la pose courante, les tuiles sont posées de manière que leurs tenons viennent simplement reposer sur le cours supérieur de latte ou liteau (figures 24 et 25). Pour notre étude, on a pris la pente égale à 1, conforme à la construction [42].

- **La charpente**

Pour la toiture en tuiles, la charpente est en bois.

On distingue deux types :

- la charpente en bois non assemblée composée de panne en madrier 7/17 (7cm sur 17cm), chevron en bois de dimension 6/10 et latte en bois 3/2,5 ;
- la charpente assemblée formée par des madriers de 7/17.

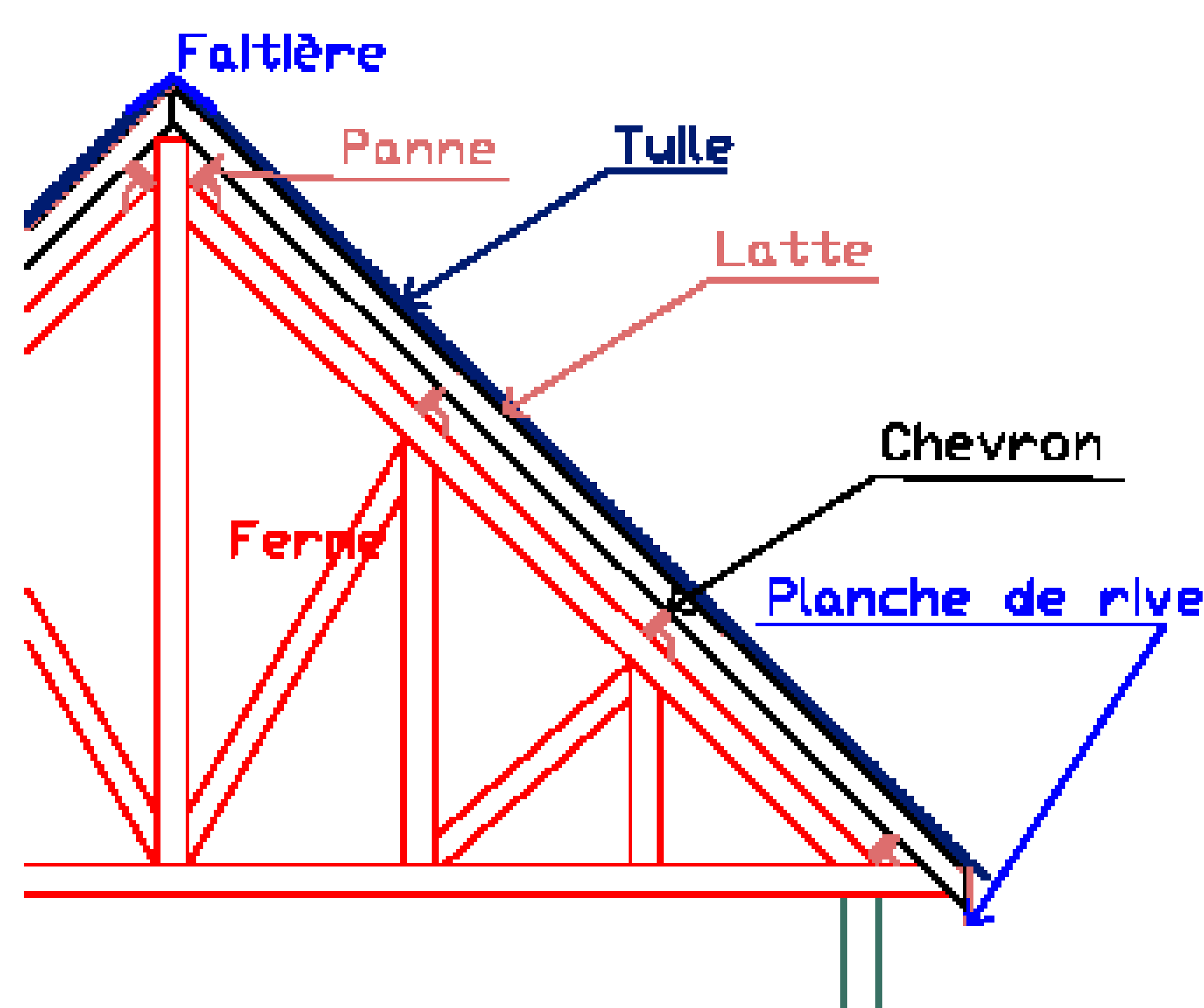


Figure 24: Toiture avec couvertures en tuiles plates

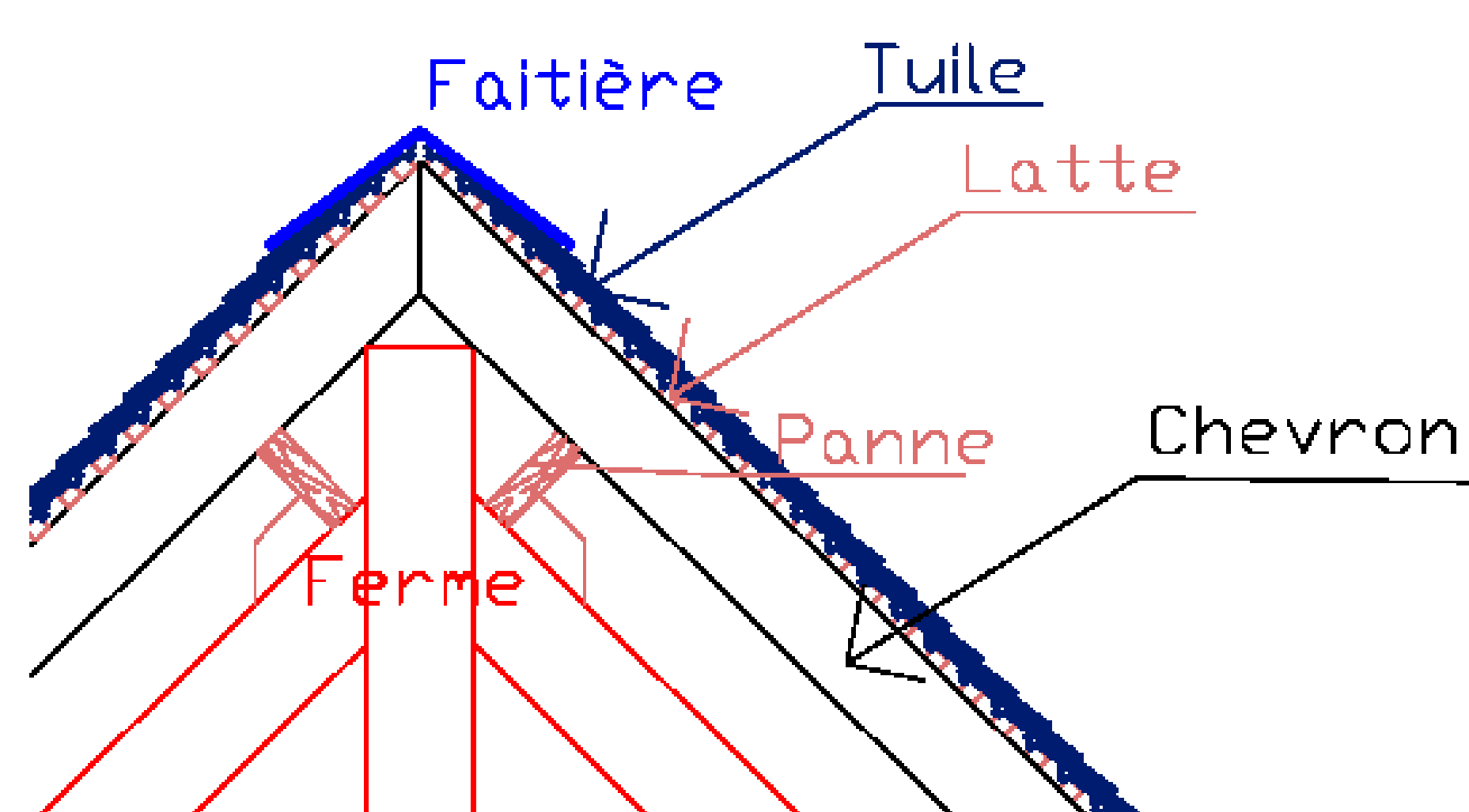


Figure 25 : Pose des tuiles plates sur lattis

II.1.2.2. Toiture en tôle

La toiture est composée de couverture et de charpente qui peut être en bois ou en métal (figure 26).

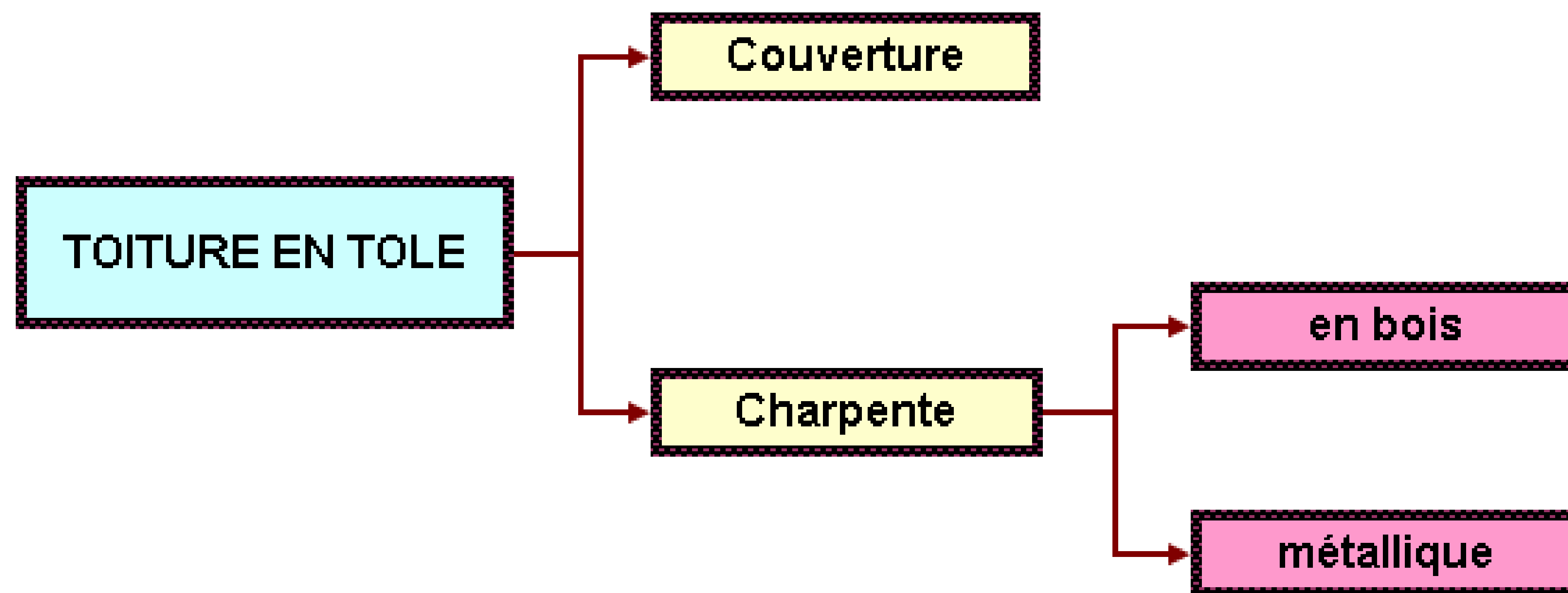


Figure 26 : Composants de la toiture en tôle.

- **La couverture**

La couverture est en tôle ondulée d'épaisseur 30/100. Les tôles sont fixées par des vis et des clous. Le support est constitué par des pannes, entretoises et fermes.

- **Charpente**

La charpente peut-être en bois ou métallique.

- **Charpente en bois**

Celle-ci est composée de pannes en madrier 7/17, entretoises en bois carré 5/5 et des fermes en madrier 7/17 (figure 27).

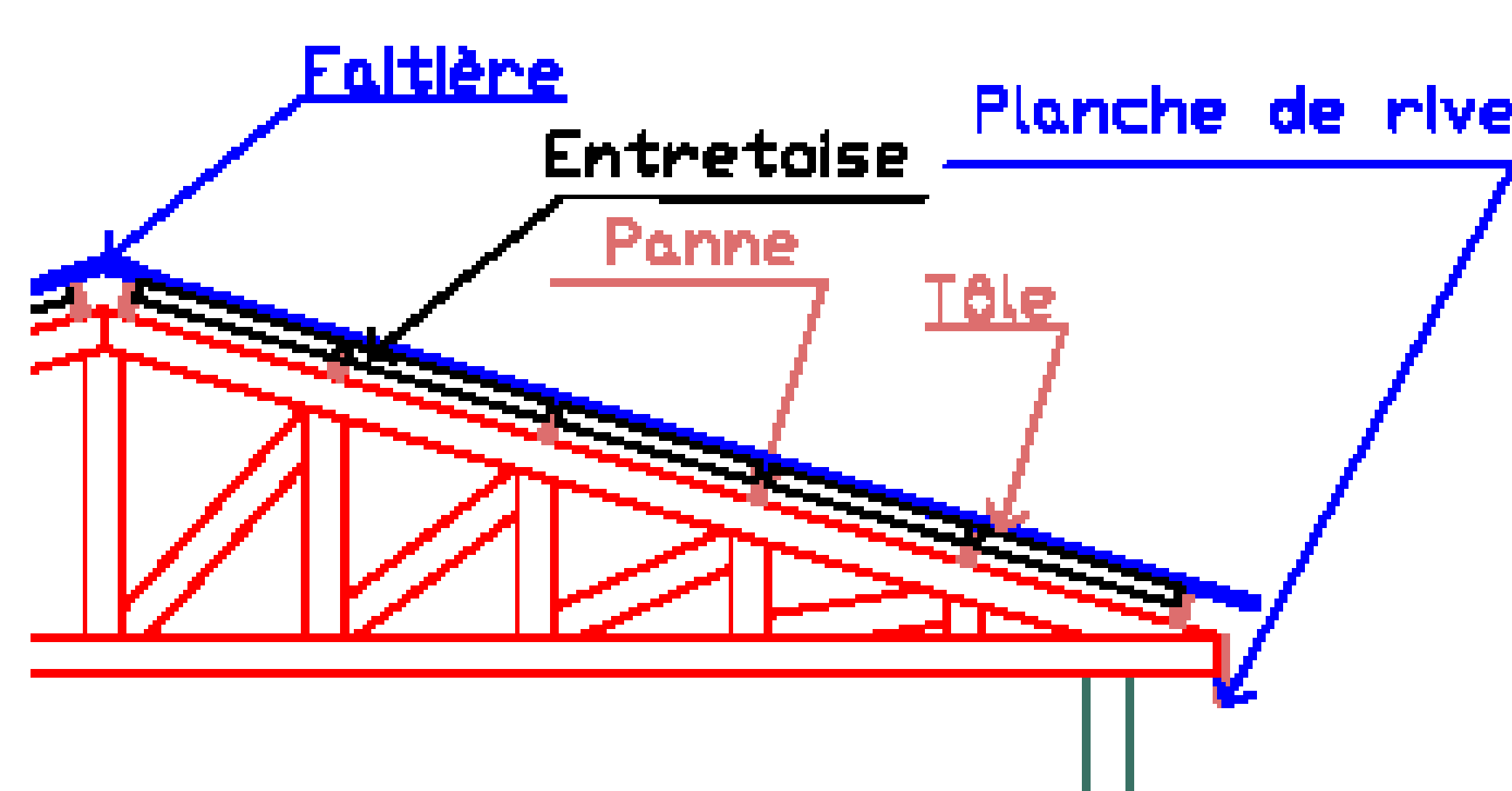


Figure 27 : Toiture avec couverture en tôle.

- **Charpente métallique**

La charpente métallique a en général un poids de 40 kg par mètre carré de toiture.

II.1.2.3. Toiture en béton ou toiture terrasse

Ce type de toiture comprend son support, la forme en pente et enfin le revêtement d'étanchéité (figure 28).

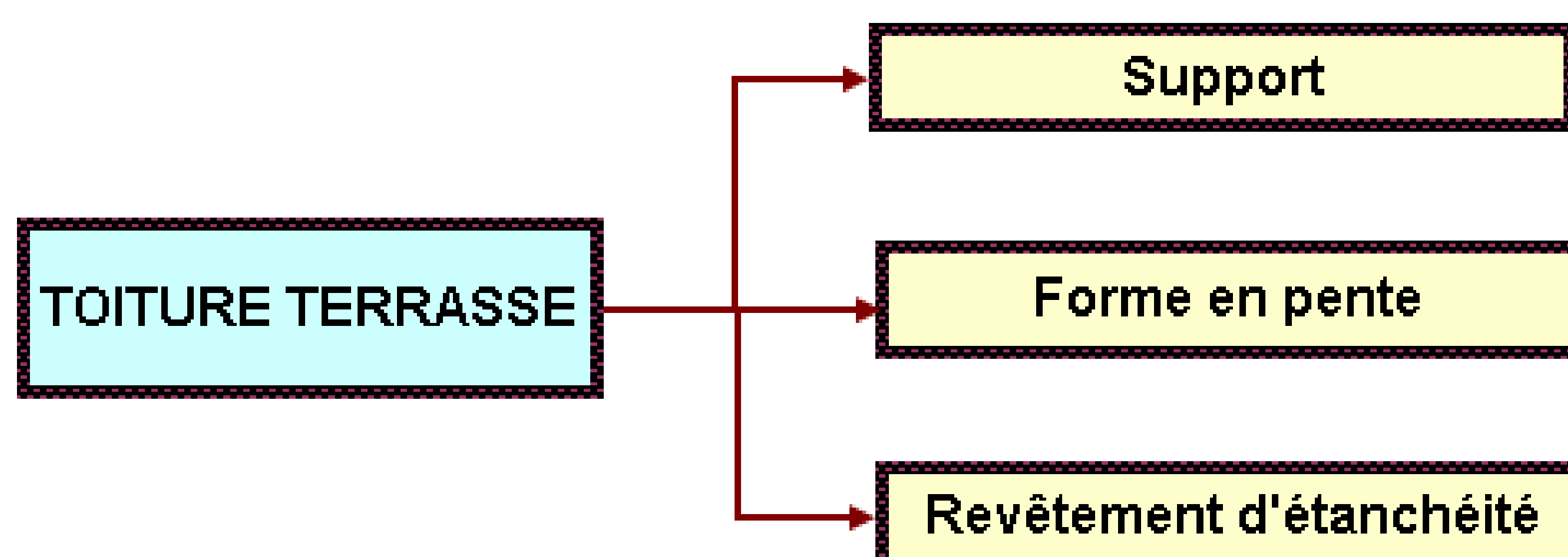


Figure 28: Composants de la toiture terrasse.

- **Le support**

Le plancher en béton peut être en dalle pleine, ou en dalle collaborante ou en corps creux. Ces derniers peuvent être en terre cuite ou en béton.

- La dalle pleine est du béton armé dosé à 350 kg de ciment. Son épaisseur est de 15 cm pour cette étude.

- Le support à corps creux est une dalle nervurée avec des corps creux en béton ou en terre cuite qui forment un coffrage perdu entre la nervure et sous la dalle.

Les hourdis sont posés sur des poutres porteuses en béton armé dosé à 350 kg de ciment/m³ avec acier de 7kg /m² de plancher et recouverts ensuite d'une dalle de compression.

Les hourdis en terre cuite sont de dimension de 33cm x 33cm x 15cm et ceux en béton sont de 51cm x 20cm x 15cm (figure 29).



Figure 29 : Plancher avec hourdis en terre cuite.

La dalle collaborante s'agit de bacs en tôle d'acier profilée à froid sur lesquels est coulé du béton. Le profil de la tôle est fait d'ondes qui lui donnent une raideur longitudinale suffisante et permettent au béton de s'accrocher aux bacs, qui constituent le coffrage perdu et l'armature du béton. Il peut toutefois y avoir des armatures d'appoint.

Les bacs collaborants en acier sont d'épaisseur 75/100 (0,75mm), le béton est dosé à 350 kg de ciment et faiblement armé de l'ordre de 3kg /m² de plancher. L'épaisseur du béton au dessus de la tôle est variable mais pour cette étude, nous prenons une valeur de 11cm.

- **La forme en pente**

Celle-ci est formée par une chape dosée à 350kg de ciment, d'épaisseur moyenne de 5cm et éventuellement hydrofugée. Pour cette étude, on n'utilise pas de produit hydrofuge car il y aura le revêtement d'étanchéité.

- **Le revêtement d'étanchéité**

Ceci est à base d'hydrocarbures lourds. Ce revêtement est appliqué en 5mm d'épaisseur, à l'état de fusion sur la forme en pente.

- **Durée de vie de la toiture**

Pour les toitures en tuiles et en tôles, pour une période de 50 ans, l'entretien d'une construction est de 5% pour la charpente et 60% pour la couverture [42] et [44]. Dans nos calculs, nous tenons compte de cet aspect du problème.

La durée de vie typique d'une toiture en béton dépasse les 50 ans.

II.1.3. Quantités des matériaux

Chaque quantité est obtenue à partir des données bibliographiques basées essentiellement sur la technologie de construction [42], [43] et [44] et des devis estimatifs [45]. Le [tableau 9](#) nous présente ces quantités.

Tableau 9: Les différents types de toiture et leurs éléments constitutifs

Type de toiture	Pente	Éléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
TOITURE EN TUILES DE TERRE CUITE	45°	- Tuiles plates en terre cuite - Charpente en bois	- Tuiles plates en terre cuite - Lattes - Chevrons 6/10 - Madriers - Clous	110 unités 0,014 m ³ 0,008 m ³ 0,020m ³ 0,66 x 10 ⁻³ t
TOITURE EN TOLE ONDULE	17°	- Tôles ondulées - Charpente en bois ou métallique	- Tôles ondulées Si charpente en bois - Chevrons 5/5 - Madriers - Clous Si charpente métallique - Boulons - Acier pour charpente métallique	1,151m ² 0,003m ³ 0,025m ³ 0,484 x 10 ⁻³ t 0,484 x 10 ⁻³ t 0,04 t
TOITURE EN BETON (DALLE PLEINE)	0°	- Béton pour dalle pleine - Forme en pente - Revêtement d'étanchéité - Coffrages en bois	- Ciment - Sable - Gravillons - Eau - Acier pour armature - Revêtement d'étanchéité - Planches - Chevrons 5/5 - Clous	0,074t 0,116 m ³ 0,132 m ³ 0,038m ³ 8,22 x 10 ⁻³ t 1,01m ² 0,008 m ³ 0,001 m ³ 0,15 x 10 ⁻³ t

TOITURE EN BETON (HOURDIS EN TERRE CUITE)	0°	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en terre cuite - Béton dosé à 350kg de ciment - Forme en pente - Revêtement d'étanchéité - Coffrage en bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en terre cuite - Ciment - Sable - Gravillons - Eau - Acier pour armature - Revêtement d'étanchéité - Planches - Chevrons 5/5 - Clous 	<ul style="list-style-type: none"> 9 unités 0,045t 0,082 m³ 0,064 m³ 0,023 m³ 7 x 10⁻³ t 1,01m² 0,004 m³ 0,001 m³ 0,10 x 10⁻³ t
TOITURE EN BETON (HOURDIS EN BETON)	0°	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en béton - Béton dosé à 350kg de ciment - Forme en pente - Revêtement d'étanchéité - Coffrage en bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en béton - Ciment - Sable - Gravillons - Eau - Acier pour armature - Revêtement d'étanchéité - Planches - Chevrons 5/5 Clous 	<ul style="list-style-type: none"> 8 unités 0,049 m³ 0,086 m³ 0,072 m³ 0,025 m³ 7 x 10⁻³ t 1,01m² 0,005 m³ 0,001 m³ 0,10 x 10⁻³ t
TOITURE EN DALLE COLLABORANTE	0°	<ul style="list-style-type: none"> - Tôle collaborante - Béton dosé à 350kg de ciment - Forme en pente : - Revêtement d'étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> - Tôle collaborante - Ciment - Sable - Gravillons - Eau - Acier pour armature - Revêtement d'étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> 1,01m² 0,049t 0,086m³ 0,072m³ 0,025m³ 3 x 10⁻³t 1,01m²

- Mise en œuvre du béton

Nous supposons dans cette étude que le béton est malaxé manuellement.

Pour le coffrage en bois, on utilise des planches bouvetées ou non, éventuellement avec des contreplaqués et des chevrons comme solives et contre solives avec étais en bois ou métalliques. Dans toute l'étude, nous supposons que les planches de coffrage ne sont

pas réutilisables. Si on a du coffrage métallique, celui-ci est réutilisable jusqu'à 100 fois, donc l'émission liée à ce type de coffrage n'est pas tenue compte.

II.1.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF toiture

Les éléments de départ et les produits finaux, nécessaires aux calculs sont présentés par la [figure 30](#).

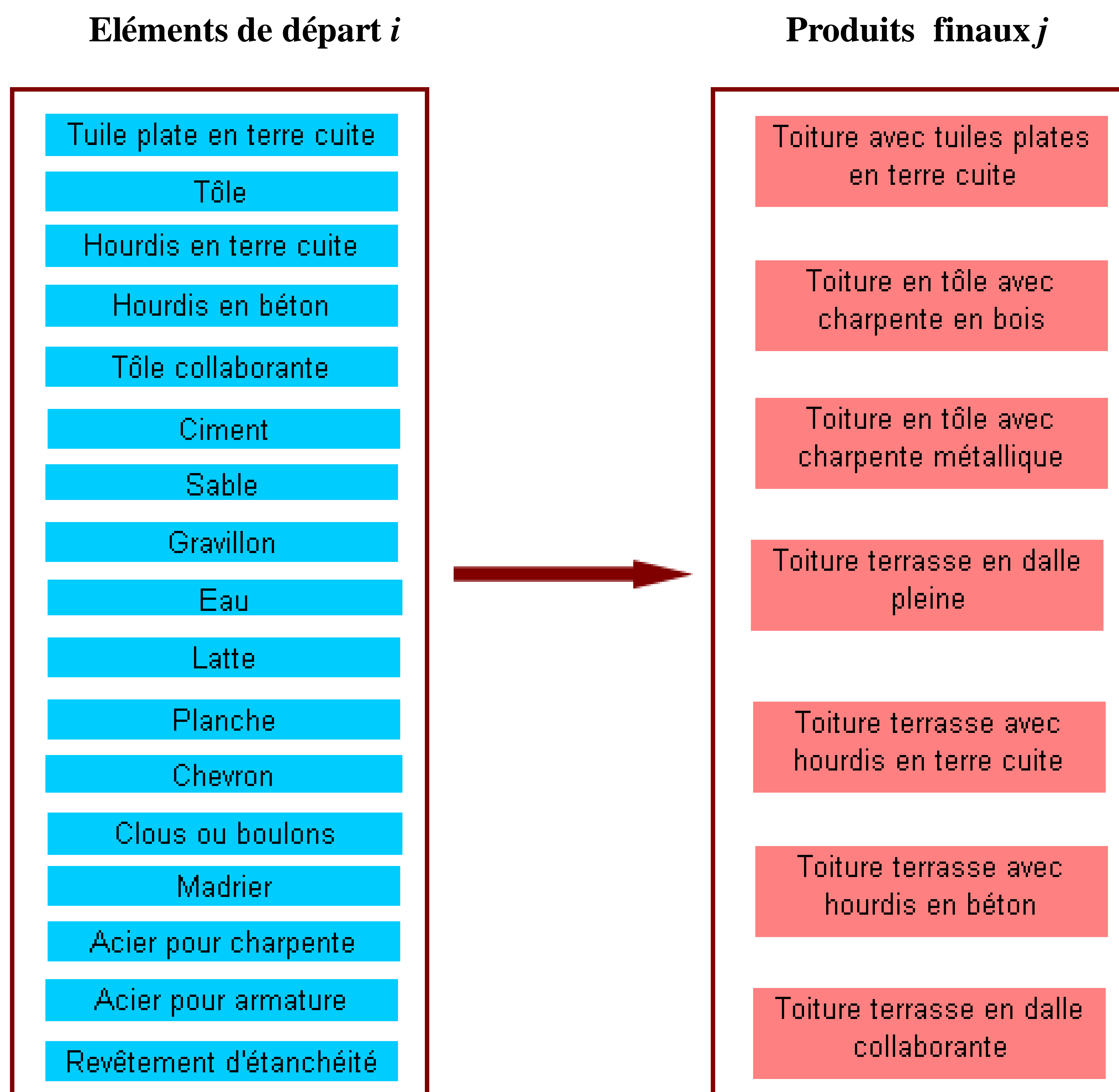


Figure 30: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel toiture.

II.2. Le mur

II.2.1. Fonction et éléments constitutifs du mur

Les murs porteurs sont les parties d'une construction chargées de transmettre les charges et les surcharges sur les fondations. Ils assurent une répartition plus homogène de ces charges et surcharges. Les murs occupent plusieurs fonctions telles l'assurance du confort intérieur, la protection contre l'incendie ou le feu, l'isolation thermique ou acoustique, la participation à la stabilité de l'ouvrage mais dans cette étude la fonction à tenir compte est la clôture d'un espace. Le mur peut être extérieur ou intérieur appelé aussi mur refend ou cloison.

Les murs sont composés de deux parties :

- le matériau qui peut être de la terre, des matériaux de terre cuite ou du béton, ...et
- le revêtement qui est choisi en fonction de l'esthétique, de leur possibilité d'entretien ou du point de vue économique (figure 31).

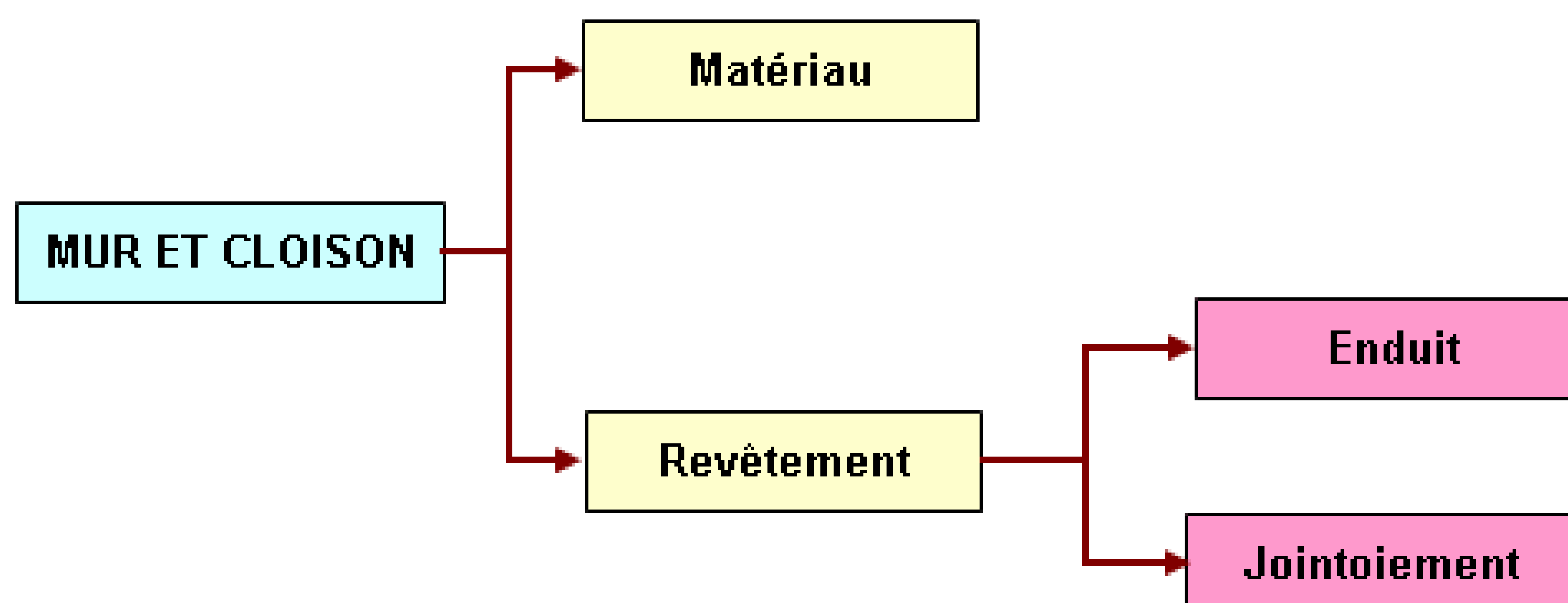


Figure 31: Les composants du mur

II.2.2. Les différents types de mur

Il existe deux types de murs : les murs porteurs qui supportent le poids de la charpente et de la toiture et les murs de remplissage qui ne soutiennent pas le poids du toit, cette fonction étant assurée par une ossature porteuse.

Les murs porteurs peuvent être maçonnés de deux façons. Soit le matériau se présente sous forme de briques ou parpaings que l'on assemble avec du liant. Soit le matériau de base est tassé entre des banches.

Si l'on opte pour une ossature porteuse, on pourra monter les murs de remplissage selon deux principes :

- avec des panneaux ou des briques,
- ou en utilisant la technique du banchage, les murs étant montés entre chaque poteau de l'ossature.

➤ **Remarque : Mur en terre crue**

La plupart des murs à Madagascar sont en terre crue. On rencontre les types suivants :

- le torchis qui est un mélange de fibres végétales comme la paille et foin et ensuite de limon argileux auquel on ajoute de l'eau et éventuellement du sable. Le torchis est souvent utilisé pour monter les murs des maisons à ossature en bois ;
- la bauge : à l'inverse du torchis, la bauge est une technique qui ne nécessite aucune armature, aucun moule. La terre est directement empilée et façonné pour bâtir des murs. On la mélange généralement avec de la paille ou de l'herbe puis on la tasse ;
- l'adobe ou mur en briques en terre crue (figure 32) sont pressées manuellement, on utilise une terre sableuse et argileuse.

La fabrication de briques de terre crue est artisanale, il n'y a pas d'industrialisation. Signalons que ces briques sont toujours produites in situ car il est difficile de les transporter à cause de leur fragilité.

La compression de la terre se fait manuellement, il n'y a pas de compresseurs pneumatiques. On ne rencontre pas non plus de coffrage. La technique est très archaïque.

L'enduit de finition est à base de terre et de sable et éventuellement de fibres de foin.



Figure 32: L'adobe.

On n'étudiera pas les maisons en terre crue car l'émission en gaz carbonique est presque nulle. Les matières premières sont exploitées tout près de la maison à bâtir, l'énergie humaine qui assure toute la construction.

II.2.2.1. Mur en briques de terre cuite

Les briques peuvent être pleines fabriquées semi-industriellement ou artisanalement. Il y a différentes dimensions pour les briques de terre cuite, pour cette étude, nous utilisons des briques pleines de dimension 9 cm x 10 cm x 20 cm. L'épaisseur du mur peut être de 11cm ou de 22cm ou de 35cm. Les « murs 11 » sont assemblés exclusivement par des mortiers de ciment. Pour les deux autres types de murs, les briques peuvent être assemblées par des mortiers de ciment ou de terre. L'utilisation de mortier de chaux éminemment hydrauliques n'est plus courante dans la construction de maison d'habitation à Madagascar car la commercialisation de ce type de chaux n'existe pas. La fabrication locale de ce type de chaux est destinée à quelques constructions routières comme la route Nationale n° 6 Mampikomy- PortBergé ou sur des cas isolés comme la réhabilitation du Palais de la Reine. L'appareillage des briques peut être français ou anglais (figure 33).

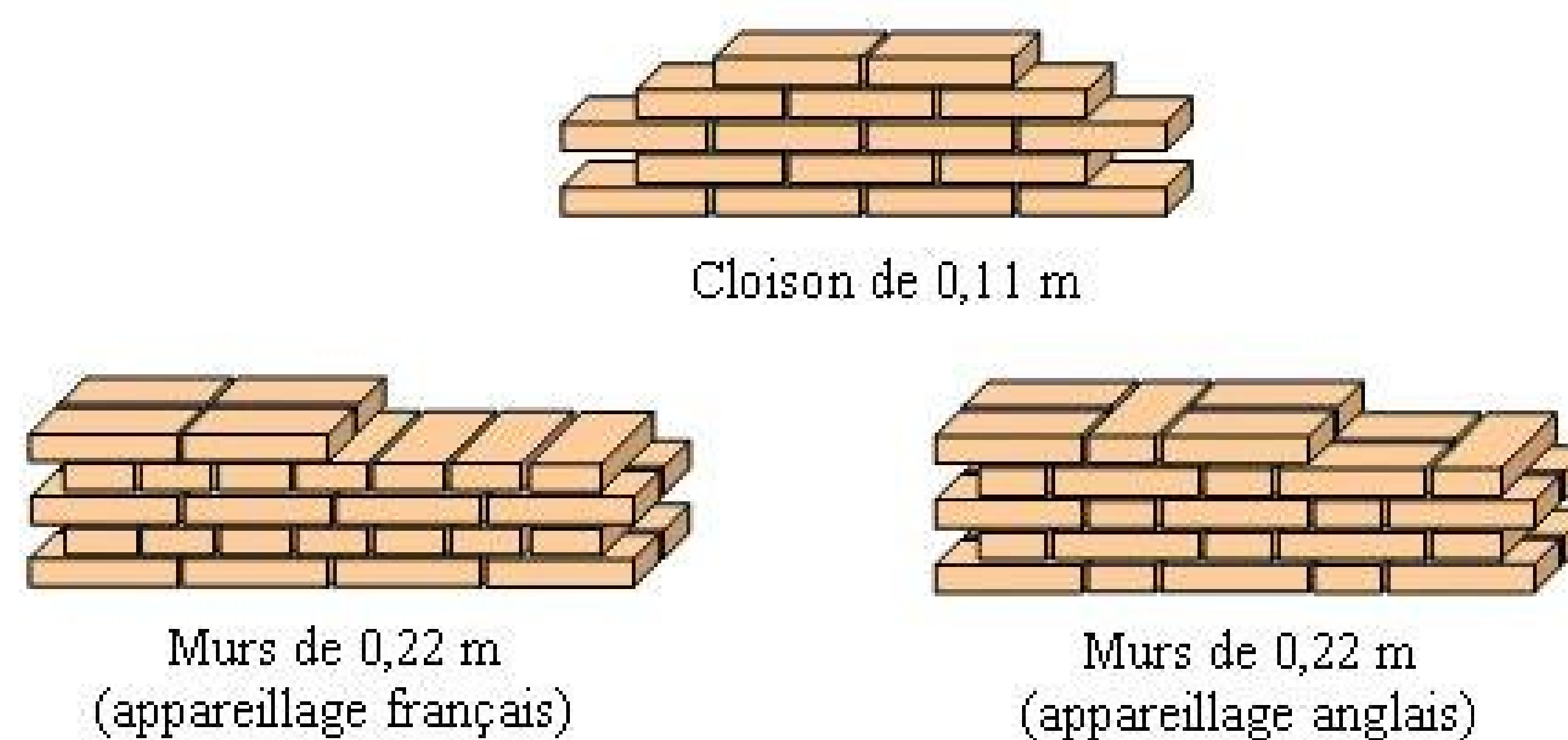


Figure 33: Appareillage des murs et cloison

II.2.2.2. Mur en blocs de béton

Les parpaings ou blocs de béton (figure 34) sont fabriqués industriellement à Madagascar. La dimension courante est de 50cm x 20cm x 20cm.

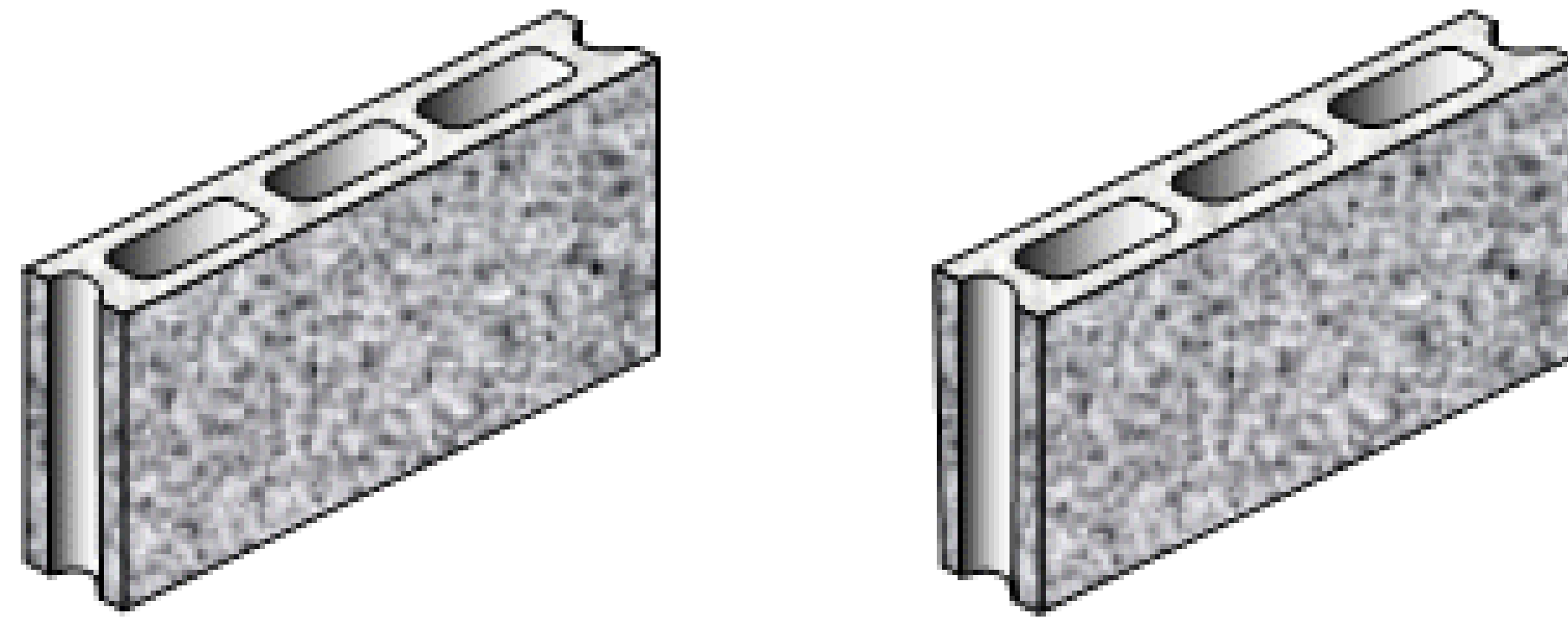


Figure 34 : blocs de béton ou parpaings

La forme des parpaings permet un assemblage facile et rapide et parfois esthétique. Lorsque les parpaings sont employés pour l'habitation, ils sont généralement enduits ou protégés extérieurement, soit pour contribuer à améliorer certaines caractéristiques physiques du mur, soit pour rattraper les irrégularités de surface afin d'obtenir une surface plane.

II.2.2.3. Mur en béton banché

Ces murs sont utilisés pour des murs porteurs grâce au système de coffrage en bois ou en métal. Le béton est dosé à 350kg de ciment par mètre cube et l'épaisseur pour cette étude est de 10cm.

II.2.2.4. Mur en briques stabilisées

Pour cette étude, nous prenons des briques mécaniques ne nécessitant pas de mortier d'assemblage et d'enduit.

II.2.3. Revêtements muraux

Il existe de multiples façons de recouvrir le mur d'une maison, que ce soit avec des enduits de terre, de ciment, de chaux ou bâtard (terre + ciment ou ciment+chaux), ou du jointoiement.

II.2.3.1. Enduits de ciment

Les enduits de ciments se font avec du ciment, de l'eau et du sable. Pour cette étude les enduits de ciments sont dosés à 350 kg de ciment par mètre cube.

II.2.3.2. L'enduit bâtard (terre+ciment)

On mélange la terre avec du ciment et de l'eau.

II.2.3.3. L'enduit bâtard (chaux+ciment)

La chaux est mélangée avec de l'eau, du ciment et du sable. Par le fait qu'on ne trouve quasiment pas de chaux éminemment hydraulique sur le marché, nous ne considérons pas ce type de revêtement.

II.2.3.4. Le jointoiment

Le mortier utilisé est un mortier richement dosé (mortier gras). Le mortier est posé sur une taloche que l'on appuie sur le mur et poussé dans le creux avec un fer à joint ou un outil similaire, en pressant fortement pour remplir complètement le joint.

II.2.4. Quantités des matériaux

Le [tableau 10](#) indique les quantités de matériaux sont obtenues à partir des données sur la technologie de construction et des devis estimatifs [\[45\]](#) et des références bibliographiques [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#).

Tableau 10 : Les trois types de mur et leurs éléments constitutifs

Type de mur	Épaisseur du mur (35cm)	Éléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Mur en briques de terre cuite	11	Briques de terre cuite Mortier de ciment dosé à 300 kg/m ³	Briques de terre cuite Ciment Sable Eau	50 unités 5,4 x 10 ⁻³ t 0,018m ³ 0,02 m ³

	22	Briques de terre cuite Si mortier de ciment dosé à 300 kg/m ³ :	Briques de terre cuite Ciment Sable Eau	100 unités 13,5 x 10 ⁻³ t 0,045 m ³ 0,005 m ³
		Si mortier de terre :	- Latérite - Eau	0,04 m ³ 0,02 m ³
	35	Briques de terre cuite Si mortier de ciment dosé à 300 kg/m ³ :	Briques de terre cuite Ciment Sable Eau	150 unités 18 x 10 ⁻³ t 0,06 m ³ 0,007m ³
		Si mortier de terre :	Latérite Eau	0,06 m ³ 0,03 m ³
Mur en briques stabilisées	11	Briques stabilisées	Briques stabilisées	50 unités
	22	Briques stabilisées	Briques stabilisées	100 unités
	35	Briques stabilisées	Briques stabilisées	150 unités
Mur en parpaing	20	Parpaing Mortier d'assemblage :	Parpaing Ciment Sable Eau	10 unités 5,2 x 10 ⁻³ t 0,018 m ³ 0,02 m ³

Mur en béton (voile)	10	Béton	Ciment	$35 \times 10^{-3} \text{ t}$
		Acier pour armature	Sable	$0,04 \text{ m}^3$
			Gravillons	$0,08 \text{ m}^3$
			Eau	$0,015 \text{ m}^3$
			Acier pour armature	$5 \times 10^{-3} \text{ t}$
		Si coffrage en bois	Planches	$0,016 \text{ m}^3$
			Chevrons 5/5	$0,002 \text{ m}^3$
			Clous	$0,30 \times 10^{-3} \text{ t}$
			Huile de décoffrage	$0,07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
		Si coffrage métallique	Métal pour coffrage	$33 \times 10^{-3} \text{ t}$
	Huile de décoffrage	$0,07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$		

II.2.5. Enduit pour le mur

Nous allons étudier trois types : l'enduit de ciment, l'enduit bâtard (terre+ciment) et le jointoiement (tableau 11).

Il est à noter qu'il existe aussi l'enduit en terre qui est mélangé éventuellement de fibres végétales ou de bouse de bœuf. Cet enduit est adapté dans le cas où les murs sont en briques de terre crue. On rencontre surtout ce type d'enduit dans des constructions précaires.

L'enduit de ciment est dosé à 350 kg de ciment/ m^3 avec une épaisseur de $1,5 \text{ cm}$. Celui-ci peut être appliqué sur des murs en briques de terre cuite, en parpaing et quelquefois sur des murs en béton. Dans la plupart des cas, ce dernier type de mur ne nécessite plus d'enduit.

L'enduit bâtard est applicable sur des murs en briques de terre cuite ou terre crue. Celui-ci n'est pas convenable pour les murs en parpaing.

Tableau 11 : Les différents types revêtements muraux

Type de revêtements muraux	Matériaux	Quantités /UF
Enduit de ciment	Ciment	$5,3 \times 10^{-3} \text{ t}$
	Sable	$0,0158 \text{ m}^3$
	Eau	$0,003 \text{ m}^3$
Enduit bâtard (ciment+terre)	Terre	$0,004 \text{ t}$
	Ciment	$0,7 \times 10^{-3} \text{ t}$
	Sable	$0,004 \text{ m}^3$
	Eau	$0,004 \text{ m}^3$
Jointoiment	Ciment	$0,5 \times 10^{-3} \text{ t}$
	Sable	$0,0016 \text{ m}^3$
	Eau	$0,0003 \text{ m}^3$

II.2.6. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF mur

Les éléments de départ et les produits finaux considérés dans le calcul, pour l'ouvrage fonctionnel « mur » sont donc les suivants ([figure 35](#)).

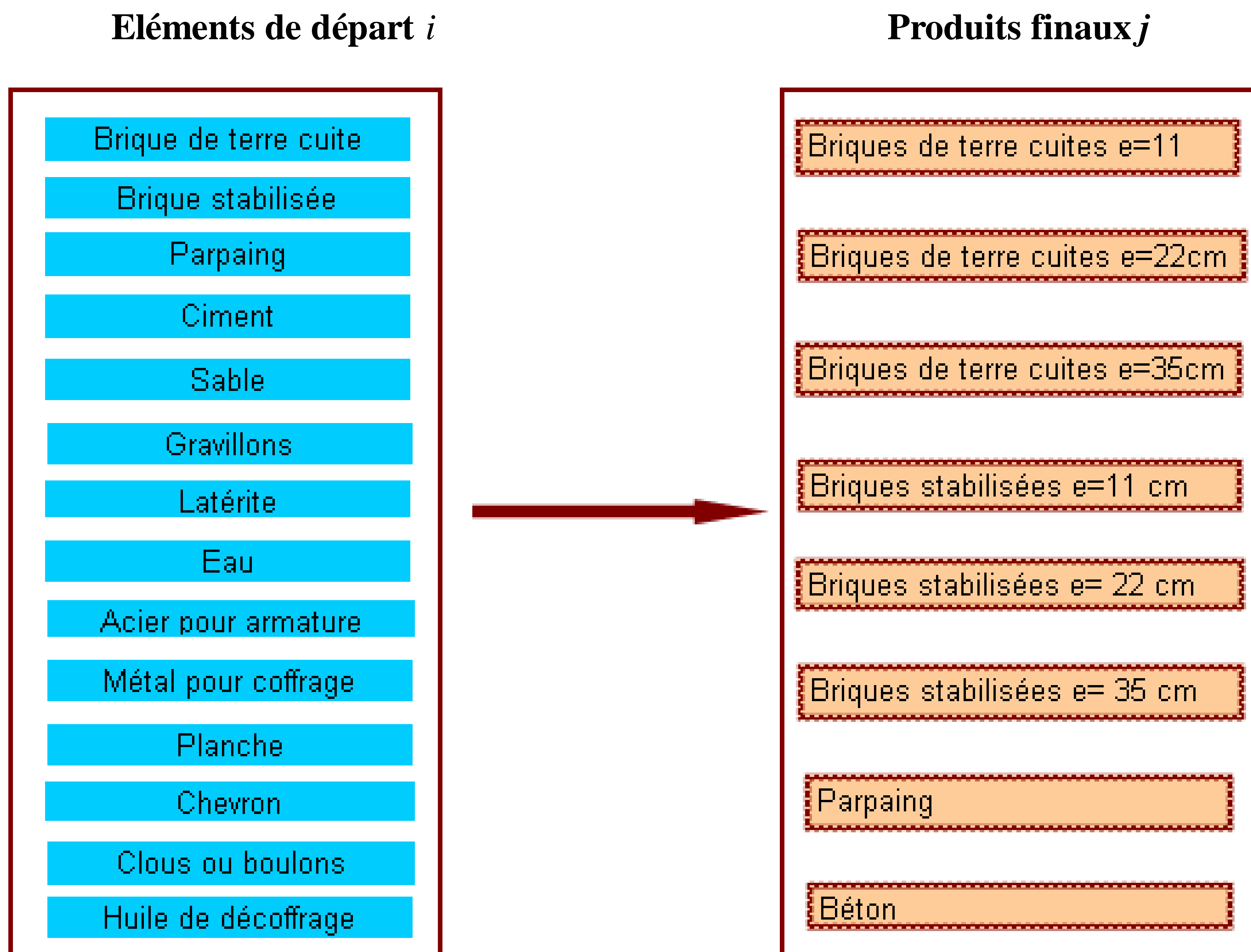


Figure 35: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel mur.

II.3. La fondation

II.3.1. Fonction

Les fondations sont destinées à asseoir le bâtiment sur le terrain en évitant que les éventuelles modifications de ce dernier provoquent des désordres dans la construction, par exemple des tassements différentiels. Les fondations assurent la liaison avec le sol, y répartissent les efforts et jouent le rôle d'appui.

Les fondations superficielles sont celles utilisées couramment dans la construction légère ou pour les maisons d'habitation avec des étages inférieures ou égales à deux, encrées à des sols de résistance supérieure ou égale à 5 Mpa [43].

II.3.2. Les différents types de fondation

On distingue plusieurs sortes de fondations superficielles :

- les fondations sur grandes semelles continues : ce sont les plus fréquentes pour les constructions courantes ;
- les fondations sur petites semelles isolées ;
- les fondations profondes (pieux, pieux) ou de surface (radier), mises en œuvre dans des situations spéciales.

Il est à signaler que les constructions sans étage ou avec un seul étage sont généralement bâties sur des semelles filantes et des murs porteurs assez résistants pour supporter toutes les charges verticales [43].

II.3.2.1. Fondations sur grandes semelles continues

Ce sont les semelles filantes (figure 36). Une semelle filante est une fondation construite sous tous les murs porteurs. Elle peut être réalisée là où le bon sol est peu profond, de 60 à 80 cm. Les semelles doivent être plus larges que les murs pour répartir le poids du bâtiment sur le terrain. La semelle filante peut être en briques ou pierre de maçonnerie ou en béton.

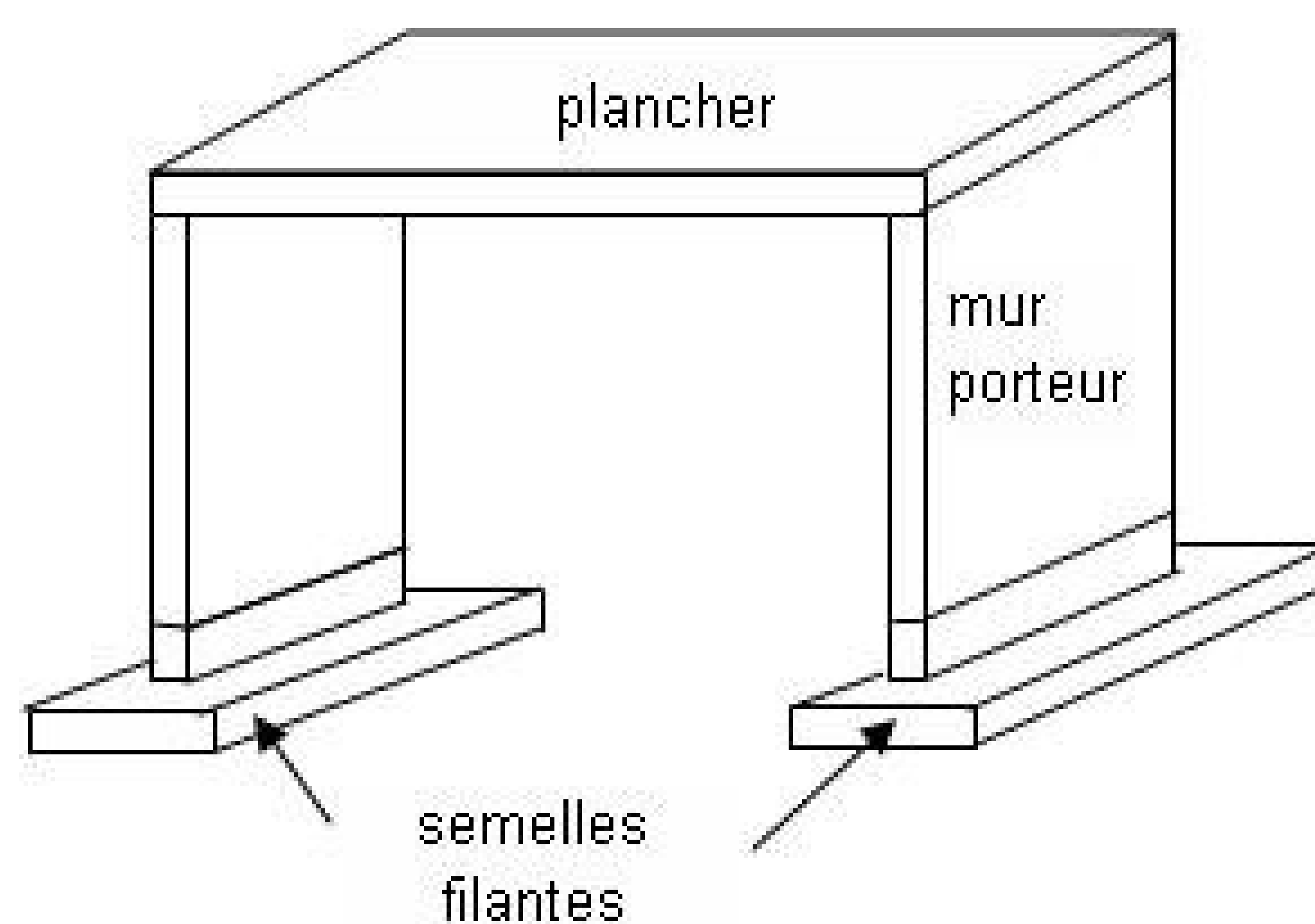


Figure 36 : Semelles filantes.

- **Semelle filante en briques ou pierre maçonnée**

Large de 40 à 80cm, la semelle filante en briques de terre cuite ou en pierres est montée à partir du fond de fouille, sur le béton de propreté. La hauteur de la semelle est de l'ordre de 60cm (figure 37).

Remarque : le béton de propreté est mis en place en fond de fouille, sur une épaisseur de 5 à 10 cm, pour permettre un travail propre. C'est un béton maigre, dosé à 150 kg de ciment par m³ de béton.

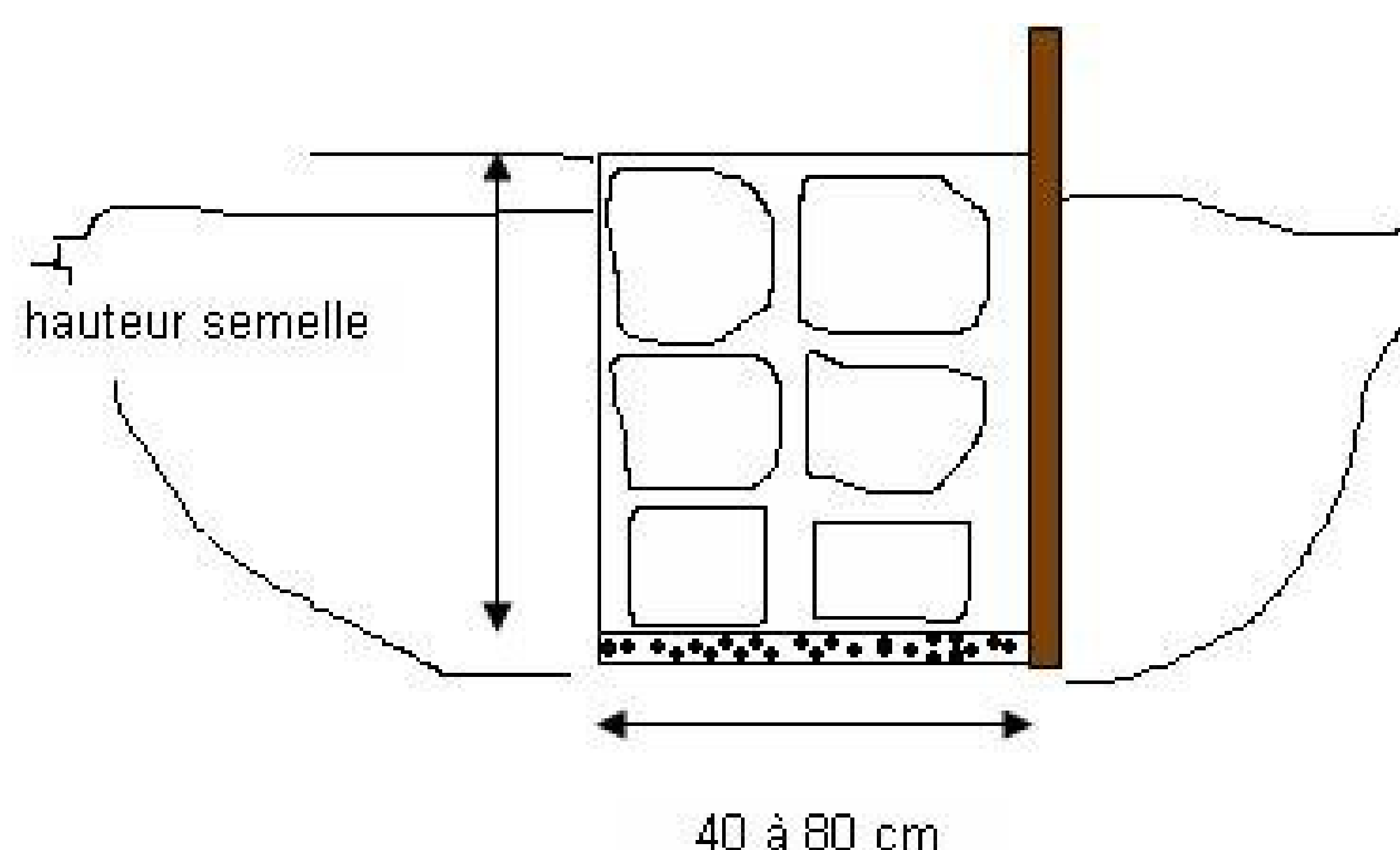


Figure 37 : Semelle filante en pierres maçonnées.

- **Semelle filante en béton cyclopéen**

Le béton cyclopéen est un béton qui contient des pierres, des cailloux de grosse dimension ou caillasses plus de 30mm de diamètre; qui sont mélangés au béton pendant la mise en place dans la fouille. Large de 40 à 80cm, cette semelle peut monter au maximum jusqu'au niveau du terrain décapé.

- **Semelle filante en béton non armé**

Pour les constructions légères comme murets ou clôtures sur terrains de bonne résistance, on réalise ce type de fondation. C'est une semelle peu profonde (pas plus de 20 cm) et sa largeur est au maximum deux fois la largeur du mur prévu. Le béton est dosé à 300 kg de ciment/m³.

- **Semelle filante en béton armé**

Pour les constructions courantes à murs porteurs, la semelle en béton armé a une hauteur de 20 à 35cm, au minimum égale à l'épaisseur du mur et une largeur de 40 à 50 cm, minimum deux fois la largeur du mur prévu (figure 38).

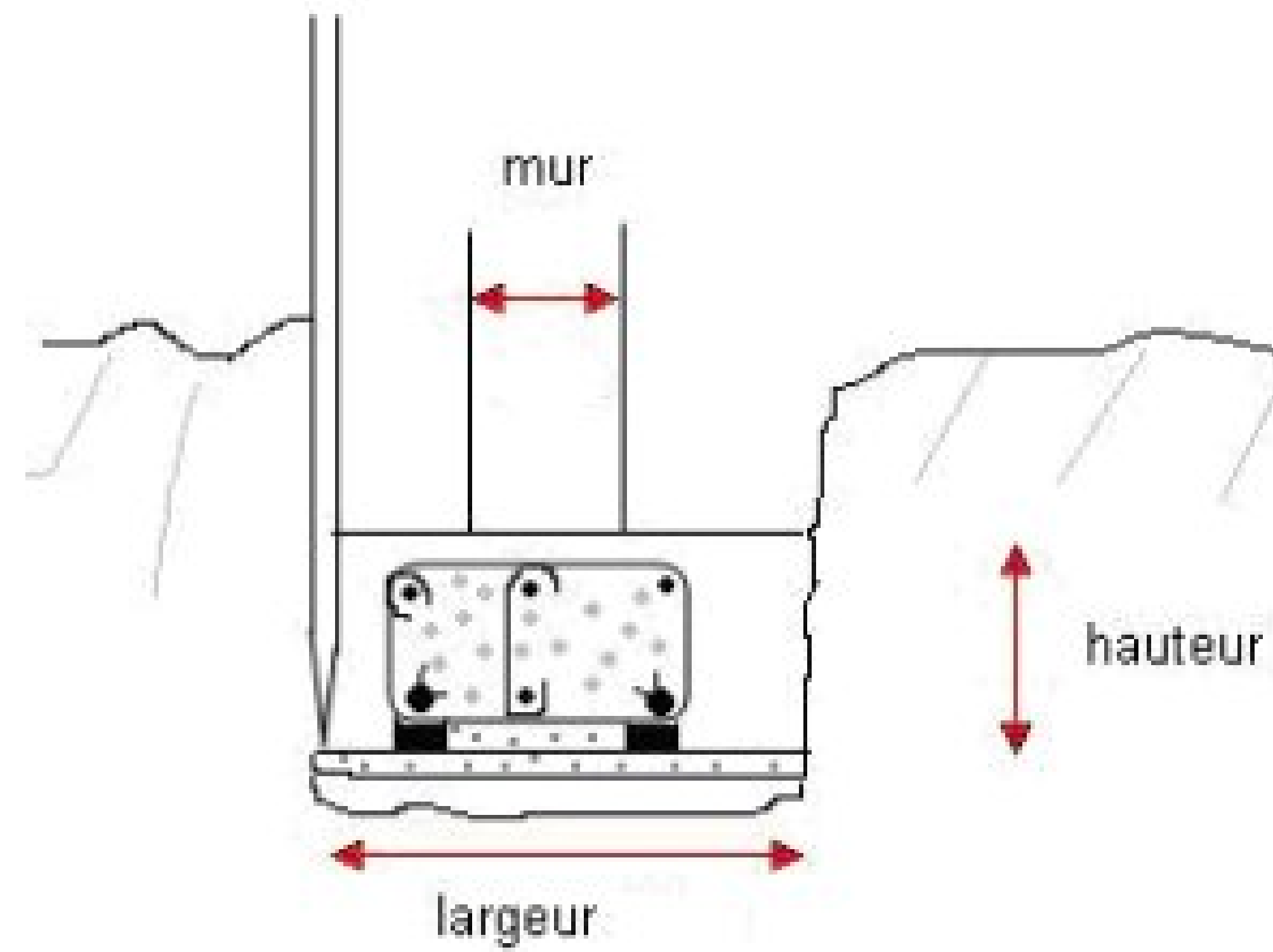


Figure 38: Semelle en béton armé.

II.3.2.2. Fondations sur petites semelles isolées

Les semelles isolées (figure 39) sont des massifs de fondation séparés les uns des autres et placés sous les poteaux du bâtiment. Elles supportent le poids de l'ensemble de la construction qui leur est transmis par les poteaux.

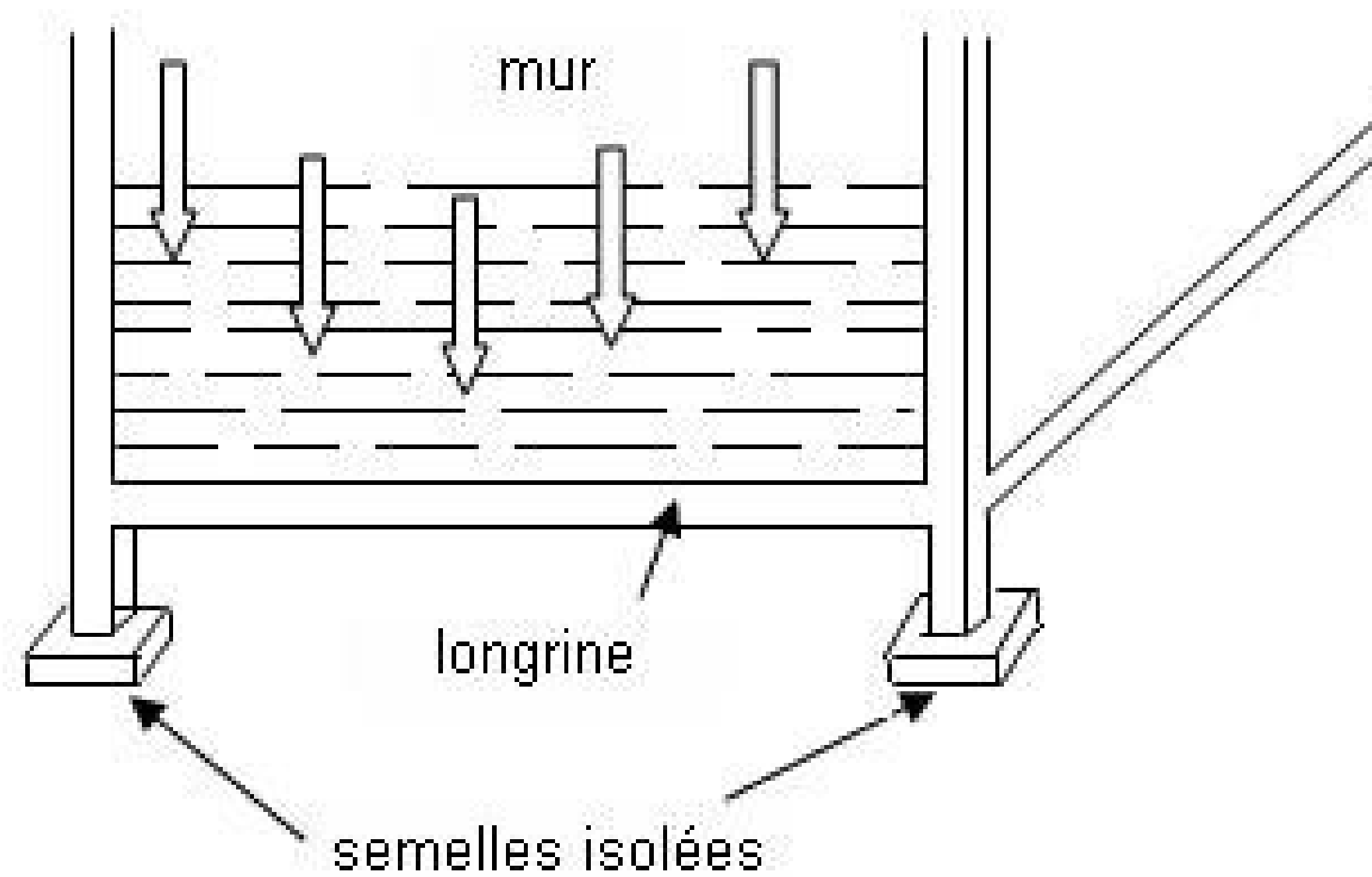


Figure 39: Semelles isolées.

Dans notre étude, les semelles isolées sont posées tous les cinq mètres.

- **Remarque : radier**

Le radier (figure 40) est une dalle en béton armé couvrant toute la zone de construction. Cette solution technique de fondation est exceptionnelle et coûteuse. Elle est choisie quand le terrain a une très faible portance, quand on craint des tassements non prévisibles c'est-à-dire des terrains très hétérogènes, enfin lorsque le sol est gonflant.

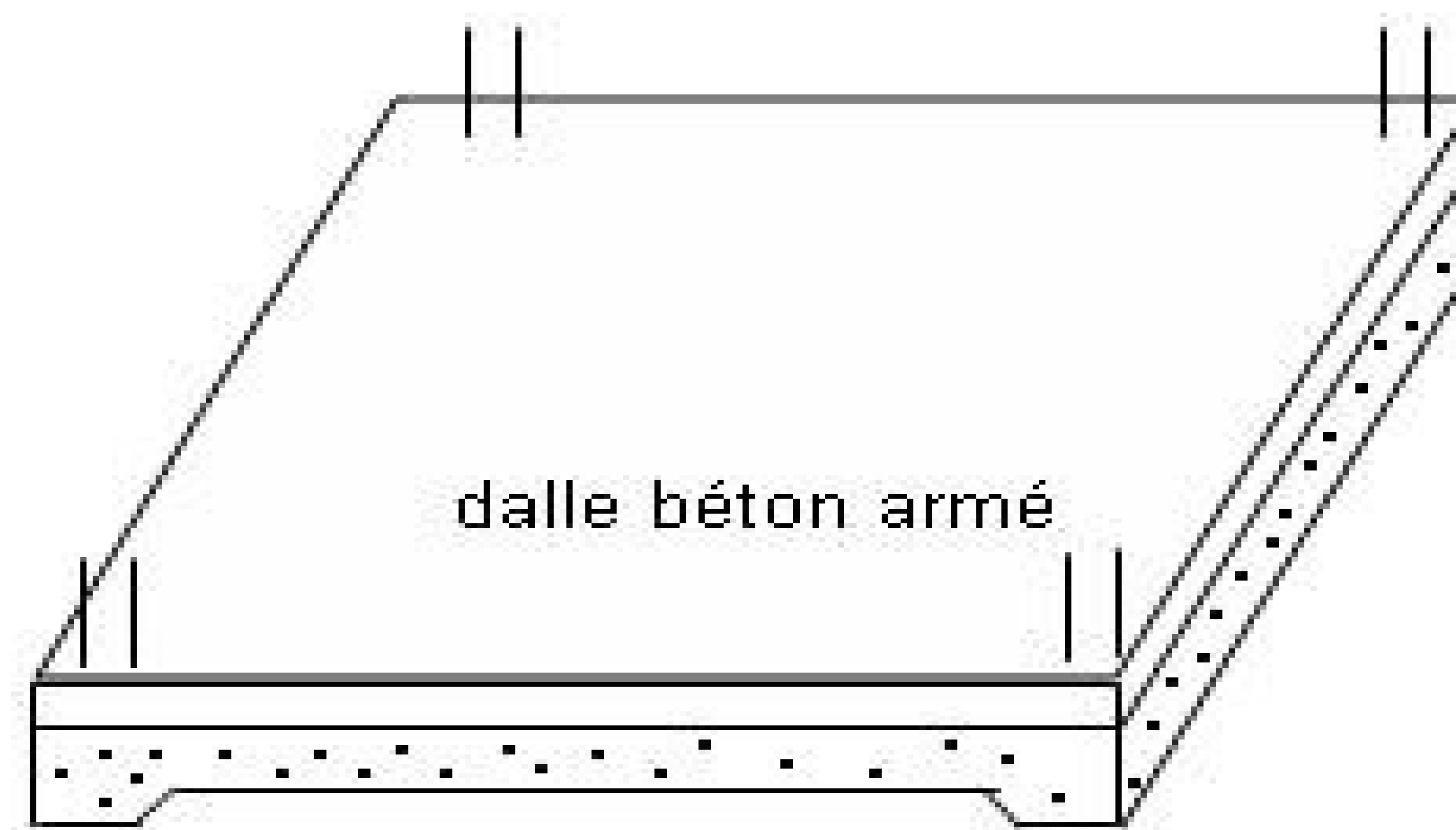


Figure 40 : Le radier en béton armé

II.3.3. Quantités de matériaux

Le [tableau 12](#) suivant représente les différents types de fondation avec leurs éléments constitutifs et leurs dimensions sont obtenues à partir des données sur la technologie de construction, des devis estimatifs [\[45\]](#) et des références bibliographiques [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#).

Tableau 12: Les types de fondation et leurs éléments constitutifs

	Dimensions courantes dans la pratique	Dimensions utilisées pour le calcul	Éléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Éléments constitutifs	1. Semelles filantes en maçonnerie de briques en terre cuite				
Semelles filantes en maçonnerie de briques	l = 40 à 80cm h = 60cm	l=60 cm h = 50cm	-Briques de terre cuite (10cmx20cmx9cm) - Mortier de ciment dosé à 300 kg de ciment/m ³ de mortier	Briques Ciment Sable Gravillons Eau	150unités 0,023t 0,080m ³ 0,026m ³ 0,011m ³

Béton de propreté	l=50 à 90 cm h = 5 à 10 cm	l=60 cm h = 5cm	- Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³		
Semelles filantes en maçonnerie de pierres					
Semelles filantes en maçonnerie de pierres	l = 40 à 80 cm h = 60cm	l = 50 cm h = 60 cm	- Moellons de dimension 20 x 20 x 20cm ³ - Mortier de ciment dosé à 250 kg de ciment/m ³	Moellons Ciment Sable Caillasses Eau	38unités 0,027t 0,092m ³ 0,026 m ³ 0,0149m ³
Béton de propreté	l=50 à 90 cm h = 5 à 10 cm	l=60 cm h = 5 cm	- Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³		
Semelles filantes en béton cyclopéen					
Semelles filantes en béton cyclopéen	l = 40 à 80 cm h = 20cm	l = 60 cm h = 20cm	- Béton cyclopéen dosé à 300 kg de ciment/m ³ - Coffrage en bois	Ciment Sable Gravillon Caillasse Eau	0,021t 0,041m ³ 0,060 m ³ 0,072m ³ 0,011m ³
Béton de propreté	l=50 à 90cm h = 5 à 10 cm	l = 70 cm h = 5 cm	- Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³	Planches Chevrons 5/5 Clous	0.001 m ³ 0,0007 m ³ 0,03x10 ⁻³ t
Semelles filantes en béton non armé					
Semelles filantes en	Largeur égale au	l = 45 cm	- Béton dosé à 300 kg de ciment/m ³	Ciment	0,031t

béton non armé	double de la largeur du mur au maximum h = 20 cm	h = 20cm	- Coffrage en bois	Sable	0,059m ³
				Gravillons	0,081m ³
				Eau	0,014m ³
				Planches	0.001 m ³
				Chevrons	0,0007 m ³
Béton de propreté	l=50 à 90cm h = 5 à 10 cm	l= 55cm h = 5 cm	- Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³	5/5 Clous	0,03x10 ⁻³ t
Semelles filantes en béton armé					
Semelles filantes en béton armé	l = 40 à 80cm h = 20 à 35cm	l = 60 cm h = 15cm	- Béton dosé à 350 kg de ciment/m ³ Acier de 45kg/m ³ de béton, pour armature - Coffrage en bois	Ciment	0,079t
				Sable	0,099m ³
				Gravillons	0,197m ³
				Eau	0,042m ³
				Acier	0,013t
Longrine	l = 20cm h=60cm	l = 20 cm h = 60 cm	- Béton dosé à 350kg de ciment/m ³ - Acier de 80kg/m ³ de béton, pour armature - Coffrage en bois	Planches	0.004 m ³
				Chevrons	0,003 m ³
				5/5	
				Clous	0,12x10 ⁻³ t
Béton de propreté	l=50 à 90cm h = 5 à 10 cm	l=70cm h = 5 cm	- Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³		
Semelles isolées en béton armé					
Semelles isolées	l= 1 à 2m	l= 1 m	- Béton armé dosé à 350kg de	Ciment	0,061t
	L = 1 à 2m	L = 1 m		Sable	0,073m ³

en béton armé	h = 25 à 80cm	h = 25 cm	ciment/m ³ - Acier de 45kg/m ³ de béton pour armature - Coffrage en bois	Gravillons	0,146m ³
				Eau	0,031m ³
Longrine	l = 20cm h=60cm	l = 20cm h=60cm	- Béton dosé à 350kg de ciment/m ³ Acier de 80kg/m ³ de béton, pour armature - Coffrage en bois	Acier	0,012t
				Planches	0.004 m ³
+ Béton de propreté	l=110 à 220 cm L=110 à 220 cm h = 5 à 10 cm	l = 110 cm L = 110 cm h = 5 cm	Béton dosé à 150 kg de ciment/m ³ de béton	Chevron	0,003 m ³
				5/5	
				Clous	0,12x10 ⁻³ t

II.3.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF fondation

Les éléments de départ et les produits finaux considérés dans le calcul, pour l'ouvrage fonctionnel « fondation » sont donc les suivants (figure 41).

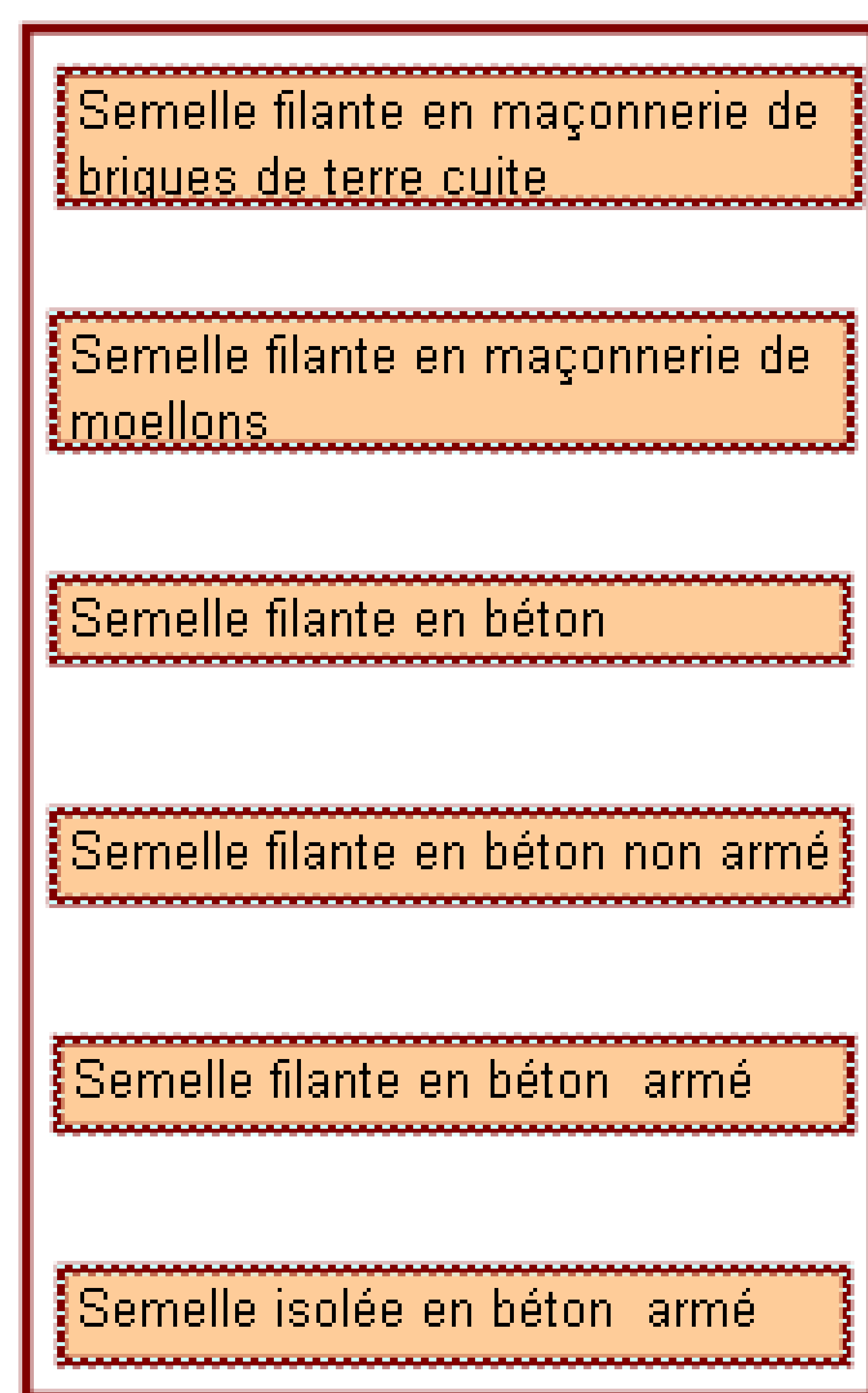
Eléments de départ**Produits finaux**

Figure 41: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel fondation.

II.4. Planchers hauts et planchers bas

II.4.1. Fonction et éléments constitutifs du plancher

Dans ce travail, nous distinguons trois types de plancher (figure 42) :

- le plancher haut ;
- le plancher bas et
- le plancher sous toiture.

Le plancher haut est une aire horizontale ou présentant une pente, qui délimite les différents niveaux du bâtiment. Le plancher haut sépare deux étages successifs.

Le plancher bas est une aire horizontale ou présentant une légère pente, qui délimite le rez- de chaussée d'un bâtiment et la fondation. Celui-ci a une fonction bien déterminée ; en premier lieu, il répartit les charges et les surcharges d'exploitation au sol de fondation et ensuite ceci permet de lutter contre les montées capillaires.

Le plancher sous toiture est aussi une aire horizontale ou présentant une pente. Celui-ci se situe en dessous de la toiture et contribue en général à l'esthétique. Certaines maisons ne disposent pas de plancher sous toiture.

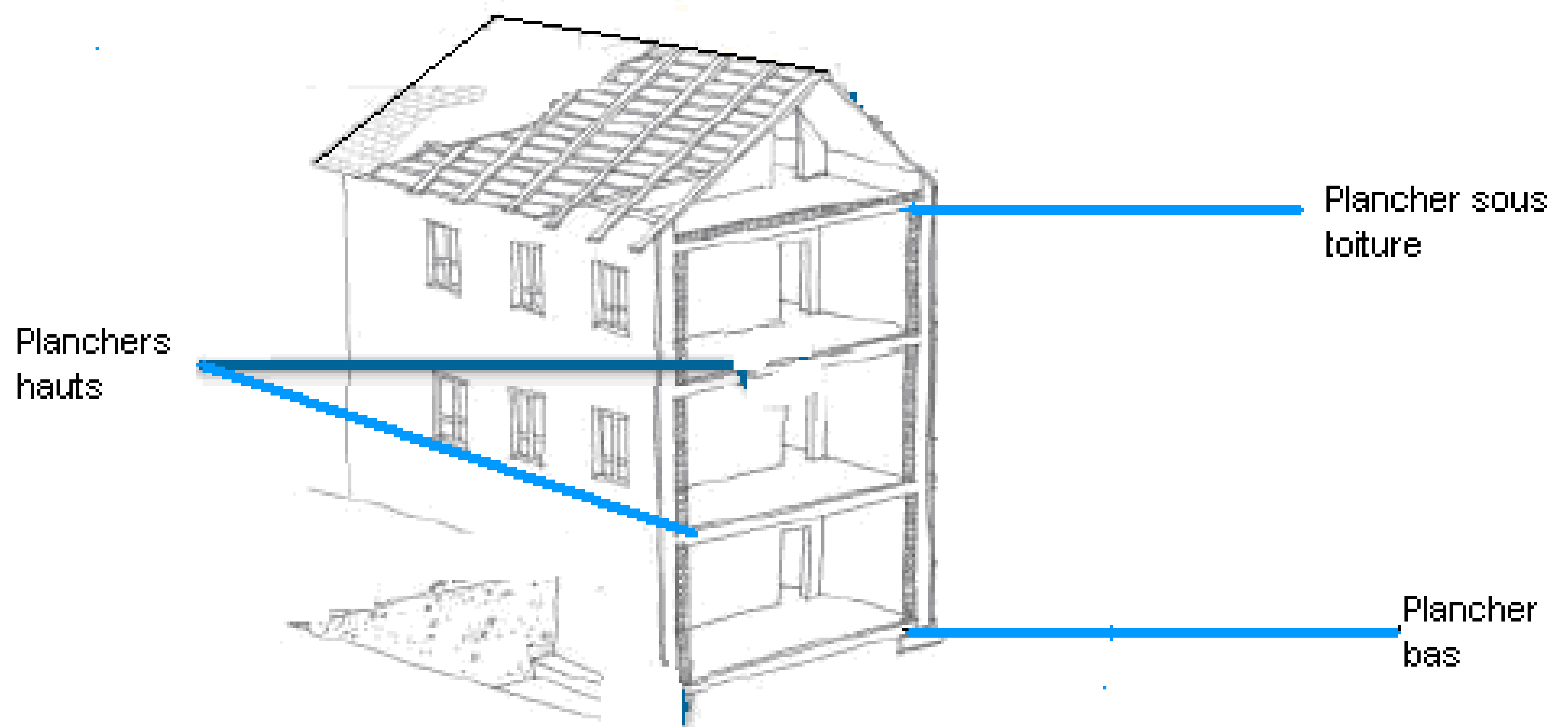


Figure 42 : Les différentes sortes de plancher d'une maison.

Le plancher haut est composé de trois parties : le support et les revêtements supérieurs et inférieurs (ou faux-plafond) (figure 43). Le plancher bas est formé par deux éléments : le support et le revêtement supérieur. La partie portante et éventuellement du revêtement inférieur sont les éléments du plancher sous toiture.

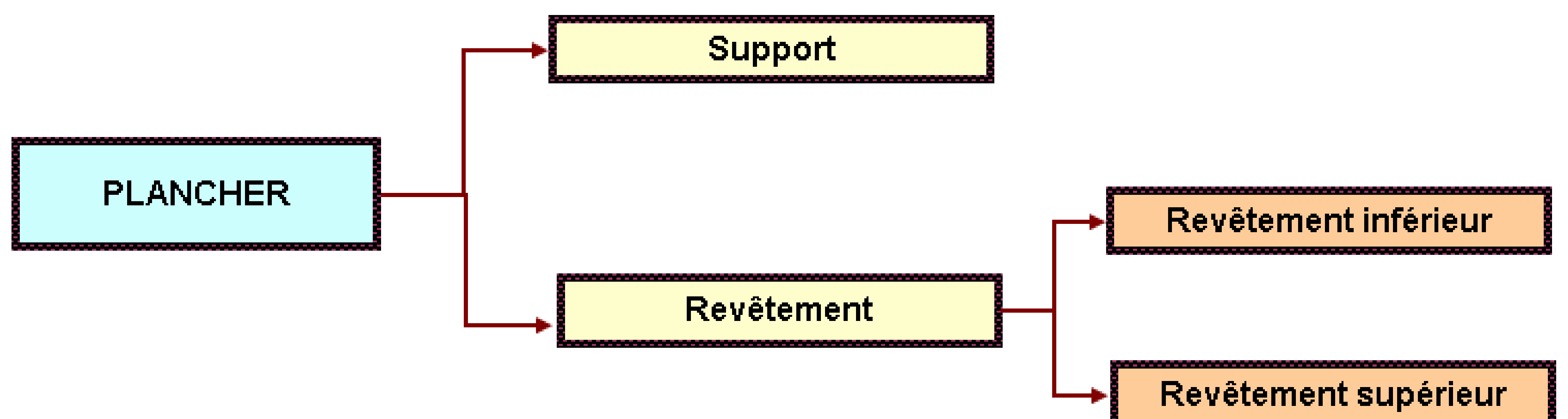


Figure 43 : Eléments constitutifs du plancher.

II.4.1.1. Le support ou la partie portante

Celui-ci peut être en bois appelé solive ou en béton armé coulé ou préfabriqué ou support en hourdis de terre cuite ou du dallage dans le cas du plancher bas ; ce support pour les planchers bas peut être en contact direct avec le sol, ou il s'appuie sur les fondations par l'intermédiaire des murs de soubassement ou des longrines, dans ce cas, on parle de vide sanitaire.

II.4.1.2. Les revêtements

Différents revêtements peuvent être mis en œuvre sur et sous les supports de plancher. Cependant il faudrait respecter certaines contraintes technologiques concernant la compatibilité des matériaux du support et ceux du revêtement. Les scénarios seront illustrés lors des calculs.

- **Le revêtement supérieur**

Appelé aussi sol fini, il est choisi en fonction de l'esthétique, de leur possibilité d'entretien : carrelage, parquet en bois, ...

- **Le revêtement inférieur ou faux-plafond**

Ce revêtement n'existe pas pour le plancher bas. Celui-ci peut être de la volige, de l'enduit ou de plâtre.

II.4.2. Les différents types de plancher

Nous classons les planchers selon le support.

II.4.2.1. Plancher en bois

C'est un plancher léger, composé d'une aire plane ou parquet, de travure simple (solive) ou composé (solive + poutre).

Les solives peuvent reposer sur les ossatures porteuses (mur, poutres) ou sur les chaînages.

Selon la norme AFNOR, les dimensions courantes des solives sont indiquées dans le [tableau 13](#).

Tableau 13: Les dimensions courantes des solives

largeur (mm)	65	70	140
hauteur (mm)	170	220	200

A Madagascar, on utilise des madriers avec $l = 17\text{cm}$ et $h = 7\text{cm}$. L'espacement des poutres en bois est compris entre 40cm et 80cm. Pour ce travail, nous prenons une distance de 50cm.

II.4.2.2. Plancher en béton

Le plancher en béton peut être de la dalle pleine ou de la dalle collaborante ou du béton en corps creux de terre cuite et en béton.

II.4.2.3. Dallage

Ceci est constitué d'une assise dite « hérissonnage » en tout venant ou en caillasse, en contact direct avec le sol et d'un béton de forme. Ce dernier peut être en béton faiblement armé ou non. Ceci ne concerne donc que le plancher bas.

II.4.3. Quantités des matériaux

Le [tableau 14](#) suivant représente les différents types de plancher avec leurs éléments constitutifs sont obtenues à partir des données sur la technologie de construction, des devis estimatifs [\[45\]](#) et des références bibliographiques [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#).

Tableau 14 : Les types de plancher et leurs éléments constitutifs

Support	Eléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Bois		Madrier	0,024m ³
		Chevrans 5/5	0,01 m ³
		Clous	0,1 x 10 ⁻³ t

Support	Eléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Dalle pleine d'épaisseur 12cm	<ul style="list-style-type: none"> - Béton dosé à 350kg de ciment - Acier d'armature de 5kg /m² de plancher - Coffrage en bois 	<ul style="list-style-type: none"> Ciment Sable Gravillons Eau Acier Planches Chevrons 5/5 Clous 	<ul style="list-style-type: none"> 0,042t 0,048m³ 0,096 m³ 0,021 m³ 0,006t 0,008 m³ 0,001 m³ 0,15 x 10⁻³t
Corps creux en terre cuite	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en terre cuite - Béton dosé à 350kg de ciment - Acier d'armature de 5kg /m² de plancher - Coffrage en bois 	<ul style="list-style-type: none"> Hourdis en terre cuite Ciment Sable Gravillons Eau Acier Planches Chevrons 5/5 Clous 	<ul style="list-style-type: none"> 9 unités 0,028t 0,032 m³ 0,064 m³ 0,014 m³ 0,005t 0,004 m³ 0,001 m³ 0,10 x 10⁻³t
Corps creux en béton	<ul style="list-style-type: none"> - Hourdis en béton - Béton dosé à 350kg de ciment - Acier d'armature de 5kg /m² de plancher - Coffrage en bois 	<ul style="list-style-type: none"> Hourdis en béton Ciment Sable Gravillons Eau Acier pour armature Planches Chevrons 5/5 	<ul style="list-style-type: none"> 8 unités 0,028t 0,032 m³ 0,064 m³ 0,014 m³ 0,005t 0,005 m³ 0,001 m³

Support	Eléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
		Clous	0,10 x 10 ⁻³ t
Dalle collaborante	- Tôle collaborante - Béton dosé à 350kg de ciment - Acier d'armature de 5,6kg /m ² de plancher	Tôle collaborante Ciment Sable Gravillons Eau Acier pour armature	1,01m ² 0,032t 0,036m ³ 0,072m ³ 0,016m ³ 3 x 10 ⁻³ t
Dallage d'épaisseur 8 cm	- Béton de forme dosé à 300kg/m ³ de ciment - Assise en caillasse de 10cm	Ciment Sable Gravillons Caillasse Eau	0,024t 0,042m ³ 0,052m ³ 0,1m ³ 0,009m ³

II.4.4. Les éléments de départ et produits finaux de l'OF plancher

Les éléments de départ et les produits finaux considérés dans le calcul, pour l'ouvrage fonctionnel «plancher» sont donc les suivants (figure 44).

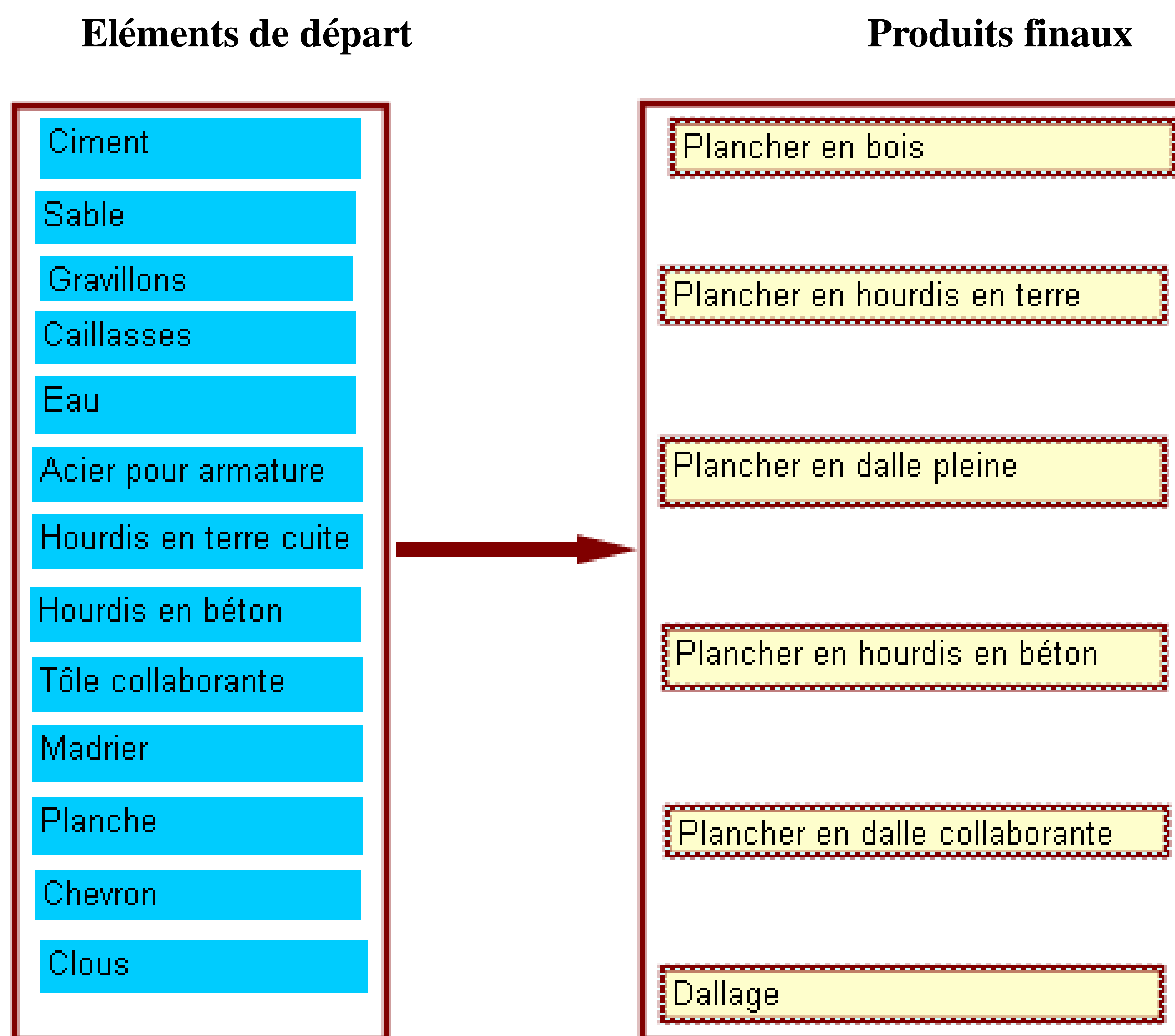


Figure 44: Les éléments de départ et produits finaux de l'ouvrage fonctionnel plancher.

II.4.5. Revêtement supérieur du plancher

II.4.5.1. Revêtement en bois

Il est à noter aussi qu'il y a les parquets à coller ou parkex, mis en œuvre sur des supports en béton ou dallage. Ceux-ci ont d'épaisseur de l'ordre de 8mm.

A Madagascar, quand la solive est en bois, on a en général du parquet comme revêtement. Les largeurs varient de 7 à 10cm et même 20cm. Les parquets sont aussi utilisables pour les autres supports (béton). Les parquets peuvent être fixés sur des lambourdes, qui à leurs tours sont enfoncés dans le béton ou raccommodés avec de la colle sur le support, et dans ce dernier cas on a le parquet à coller. Quand les parquets sont posés directement sur le madrier, on a alors des parquets sur solives.

II.4.5.2. Chape

Ce type de revêtement est placé sur des supports en béton ou dallage. Le mortier est dosé à 450 kg /m³ de ciment. Pour cette étude, nous prenons une épaisseur, couramment adaptée de 2cm.

II.4.5.3. Carreaux et moquette.

Ces deux types de revêtement sont posés sur des supports en béton et dallage. Les carreaux sont collés par du ciment-colle.

Quant aux carreaux, les dimensions et les qualités sont très variables. Les moquettes sont collées directement au support.

II.4.5.4. Quantités des matériaux

Le [tableau 15](#) suivant représente les différents types de revêtement supérieur du plancher avec leurs éléments constitutifs sont obtenues à partir des données sur la technologie de construction, des devis estimatifs [\[45\]](#) et des références bibliographiques [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#).

Tableau 15: Type de revêtement supérieur du plancher.

Type de revêtement supérieur du plancher	Eléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Parquet sur lambourde	- Parquet en bois dur du pays d'épaisseur 23mm	Parquet	0,024m ³
	- Lambourde en bois dur du pays de 3cm de haut et 5cm de large	Lambourde	0,0033m ³
		Clous	0,066 x 10 ⁻³ t
Parquet sur solive	Parquet en bois dur du pays d'épaisseur 23mm	Parquet	0,024m ³
	Solive	Clous	0,060 x 10 ⁻³ t

Parhex	Parquets à coller	Parhex	0,008m ³
		Colle	0,0002t
Chape	Mortier dosé à 450kg /m ³ de ciment (e=2cm)	Ciment	0,009t
		Sable	0,02 m ³
		Eau	0,0023 m ³
Carreau	Carreau, en grès cérame, de dimension 10cm x10cm, Mortier dosé à 500kg/ m ³ de ciment(e= 1cm) Jointoiement en ciment	Carreau	1,05m ²
		Ciment-colle	0,006t
		Eau	0,001 m ³
Moquette	Tapis moquette	Moquette	1,01m ²
	Colle	Colle	0,00015t

II.4.6.5. Les éléments de départ et produits finaux du revêtement supérieur du plancher

Les éléments de départ et les produits finaux considérés dans le calcul, pour le revêtement supérieur du plancher sont donc les suivants (figure 45).

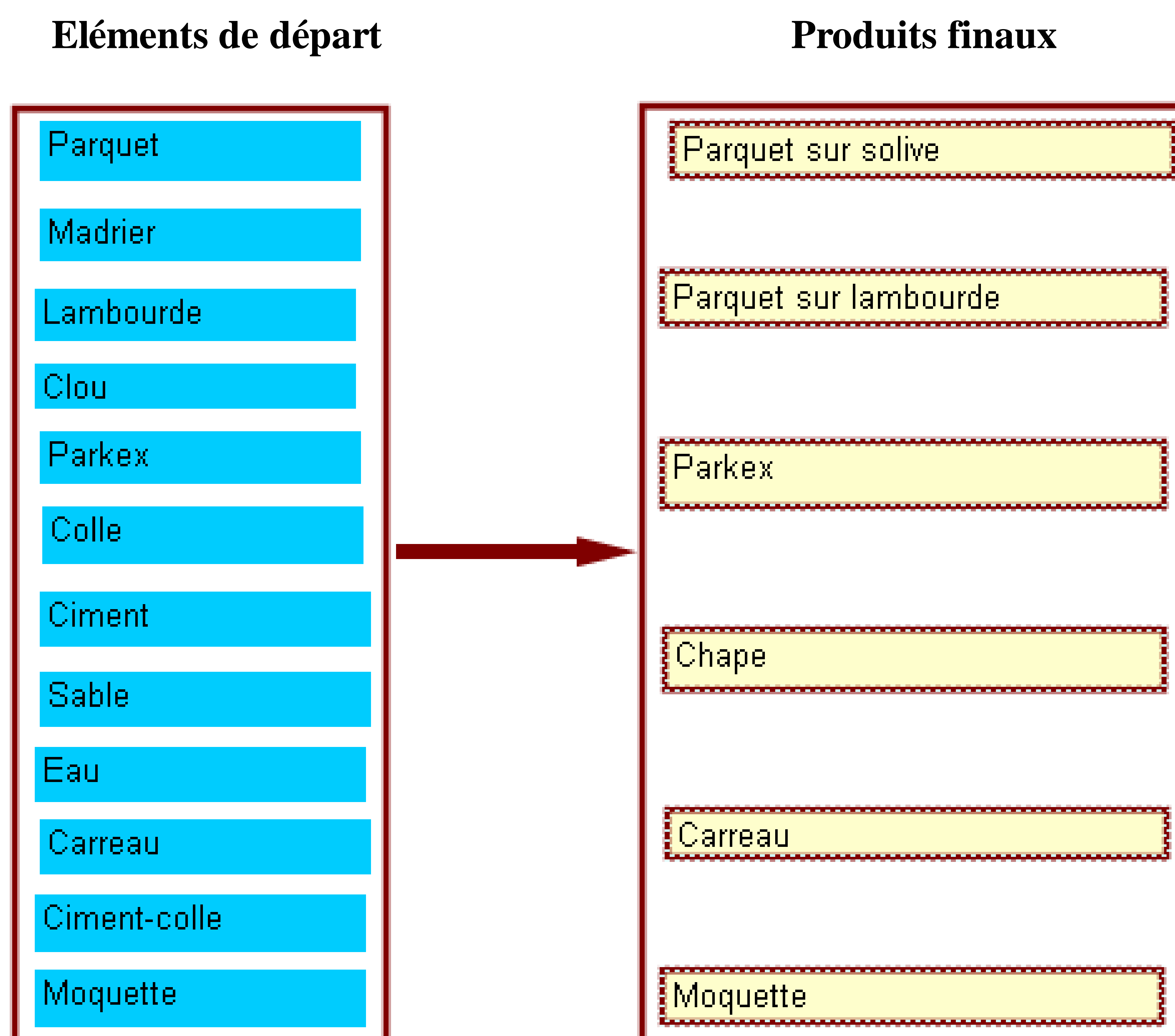


Figure 45 : Les éléments de départ et produits finaux du supérieur du plancher.

II.4.7.Revêtement inférieur ou faux-plafond

Le revêtement inférieur ou faux-plafond est classé dépend de la partie portante ou support.

II.4.8.1. Bois ou volige

Quand la solive est en bois, on a en général de la volige comme habillage. Les largeurs varient de 6 à 10cm et l'épaisseur est de l'ordre de 18mm.

II.4.8.2.Enduit de ciment

Cet enduit est du mortier dosé à 350 kg de ciment et ayant une épaisseur d'environ 2cm.

II.4.8.3. Plâtre

Les plaques de plâtre d'épaisseur 12,5mm sont fixées par une ossature en bois (ou métallique). Des vis et des fibres végétales imbibées de mortier de plâtre servent pour la fixation.

II.4.8.4. Quantité des matériaux

Le [tableau 16](#) suivant représente les différents types de revêtement supérieur du plancher avec leurs éléments constitutifs sont obtenues à partir des données sur la technologie de construction, des devis estimatifs [\[45\]](#) et des références bibliographiques [\[42\]](#), [\[43\]](#) et [\[44\]](#).

Tableau 16 : Type de faux-plafond.

Support	Eléments constitutifs	Matériaux	Quantités/UF
Bois		Volige	0,02m ³
		Clous	0,1 x 10 ⁻³ t
Enduit de ciment	Mortier dosé à 450kg /m ³ de ciment (e=2cm)	Ciment	0,009t
		Sable	0,02 m ³
		Eau	0,0023 m ³
Plâtre	Mortier de plâtre Fibres végétales Vis Plaques de plâtre	Plâtre	0,002t
		Eau	0,002m ³
		Fibres végétales	0,125 x 10 ⁻³ t
		Vis	0,05 x 10 ⁻³ t
		Plaques de plâtre	1,01m ²

II.4.8.5. Les éléments de départ et produits finaux du revêtement inférieur du plancher

Les éléments de départ et les produits finaux considérés dans le calcul, pour le revêtement inférieur du plancher donc les suivants (figure 46).

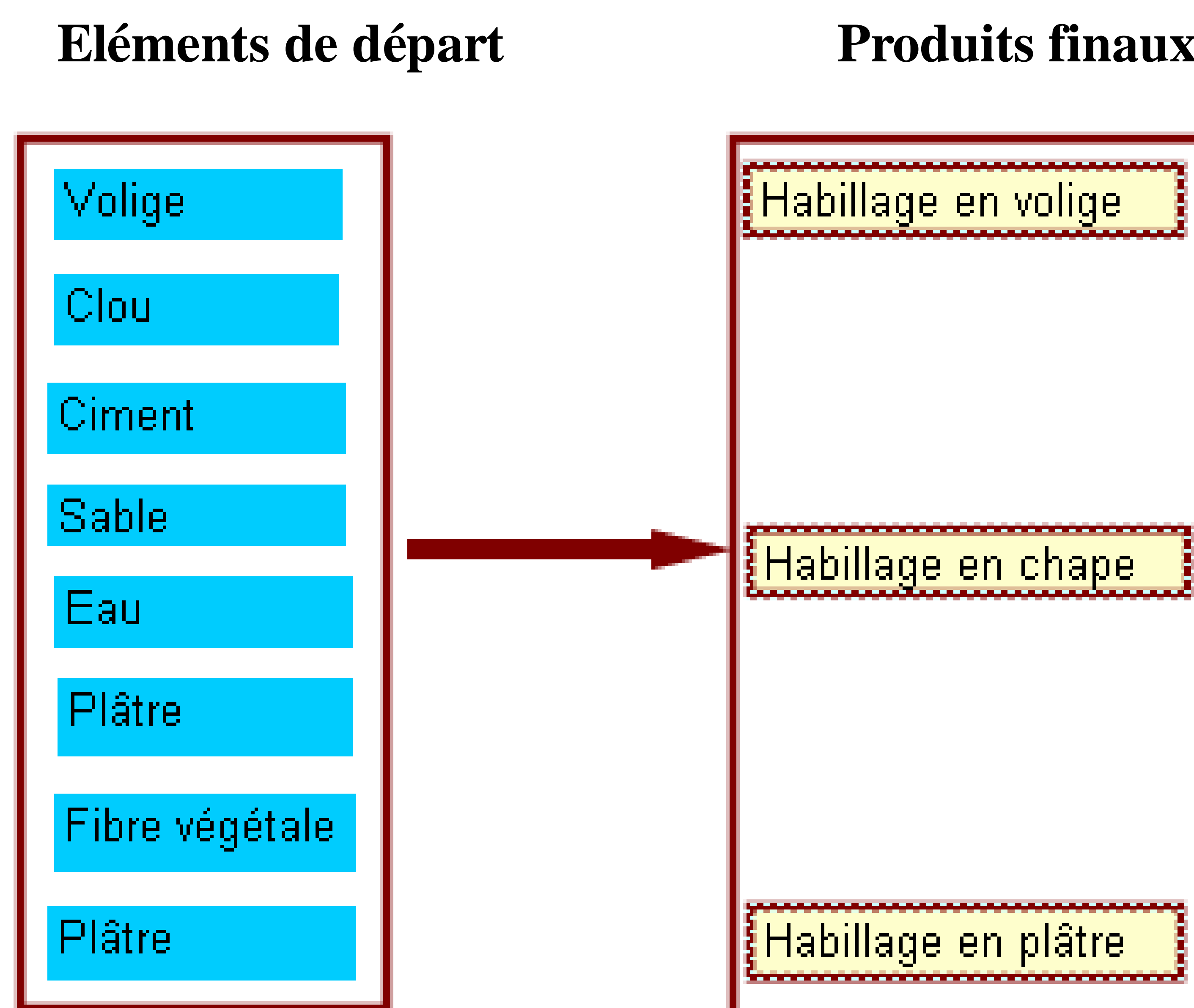


Figure 46 : Les éléments de départ et produits finaux du faux-plafond.

II.5. Ouvrages d'ouverture et de fermeture

II.5.1. Fonction et éléments constitutifs

Ce sont les portes, fenêtres et impostes. Cependant, dans la suite du travail, nous ne tenons pas compte des impostes car l'existence de ceux-ci n'est pas obligatoire dans une maison d'habitation et en plus, leurs dimensions sont très variables.

A la fois ouverture sur l'extérieur et ouvrage d'obturation, les ouvrages d'ouverture et de fermeture sont placés dans une baie. Dans ce travail, nous nous référons aux deux premières fonctions pour les portes et fenêtres.

Il est signaler que les portes et fenêtres extérieures d'une maison peut être composé d'une seule ou de deux ouvrages, complémentaires, l'un à l'extérieure de l'autre. L'ouvrage extérieur peut être du volet ou de la grille tandis que l'ouvrage intérieur est généralement vitré. Quant aux portes de communication, celles-ci sont formées généralement par des volets pleins.

Nous avons pris comme Unité Fonctionnelle une unité de fenêtre ou de porte, nous prenons alors les dimensions standards proposés par les fabricants et les ateliers de menuiserie :

Porte : 80cm x 210cm

Fenêtre : 100cm x 120cm

Chaque ouvrage est composé de :

- menuiseries et
- de quincailleries.

II.5.1.1. Menuiseries

Actuellement, on constate une évolution et une diversification des matériaux des menuiseries concernant les ouvertures : bois et/ou métalliques et/ou aluminium. On va les classer en fonction des matériaux utilisés.

- **Menuiserie en bois**

Le bois est le matériau traditionnellement des fenêtres et portes. Les menuiseries bois restent très utilisées, notamment en maison individuelle en tant que volet plein pour les portes et fenêtres et châssis pour les ouvrages vitrés. Les bois tropicaux sont les plus utilisés et même en France, 55% du marché est constitué par ces bois.



Figure 47: Ouvertures avec volets et châssis vitrés en bois.

- **Menuiserie en aluminium**



Figure 48: Ouvertures avec châssis en aluminium.

Les menuiseries en aluminium sont de plus en plus développées en raison de sa légèreté, sa malléabilité et sa résistance aux intempéries et aux chocs. Les menuiseries en aluminium se présentent en général sous forme de châssis et quelquefois de volets pleins.

- **Menuiserie en acier**

Les menuiseries en acier à base de profilés pliés sont appréciées principalement pour leurs performances esthétiques et leur solidité. Il est aussi intéressant d'employer ces profils pour réaliser des ouvrages soumis à des agressions ou des chocs. C'est le cas, par exemple, de portes de rez-de-chaussée. On les utilise souvent en tant que volets et quelquefois en châssis.

Pour les fenêtres, l'acier peut se présenter sous forme de grilles de protection, à l'intérieur desquelles se trouvent des châssis vitrés.

II.5.1.2. Quincailleries

Ce sont des pièces destinées à les fixer sur les ouvrages de fermeture ou d'ouverture (vis, boulons, rivets, etc.) et à celles qui assurent l'assemblage ou le renforcement des menuiseries (équerres, chevilles, etc.). Le nombre d'objets faisant partie de la quincaillerie de bâtiment s'élève à plusieurs milliers, chacun d'eux peut en outre exister en plusieurs types, sous diverses présentations et en de nombreuses dimensions différentes, selon les fabricants.

Les articles sont en général en métal et pour le calcul, deux valeurs moyennes en masse de la quincaillerie seront fixées pour les portes et pour les fenêtres. Nous supposons que

chaque type d'ouverture comporte 1kg de quincailleries et que dans les calculs, l'émission en gaz carbonique pour la production de 1kg de quincaillerie est la même que celle pour la production de 1kg d'acier.

Voici donc les combinaisons possibles avec les quantités de matériaux correspondants (tableau 17).

Tableau 17 : Quantités des matériaux pour chaque type de porte et fenêtre.

PORTE			V bois	V verre	M acier	M alu
			(m3)	(m3)	(kg)	(kg)
	Extérieure	Intérieure				
Type 1	Volets en bois	–	0,075	0	1	0
Type 2	Volets en bois	Châssis vitrés en bois	0,128	0,009	1	0
Type 3	Volets en bois	Châssis vitrés en acier	0,075	0,009	26,82	0
Type 4	Volets en bois	Châssis vitrés en alu	0,075	0,009	1	20,48
Type 5	Volets métal.	–	0	0	49,08	0
Type 6	Volets métal.	Châssis vitrés en bois	0,053	0,009	49,08	0
Type 7	Volets métal.	Châssis vitrés en acier	0	0,009	75,9	0
Type 8	Volets métal.	Châssis vitrés en alu	0	0,009	49,08	20,48
Type 9	Grilles métal.	Châssis vitrés en bois	0,053	0,009	22,61	0
Type 10	Grilles métal.	Châssis vitrés en acier	0	0,009	49,43	0
Type 11	Grilles métal.	Châssis vitrés en alu	0	0,009	22,61	20,48
FENETRE			V bois	V verre	M acier	M alu
			(m3)	(m3)	(kg)	(kg)
	Extérieure	Intérieure				
Type 1	Volets en bois	–	0,05	0,00	1	0
Type 2	Volets en bois	Châssis vitrés en bois	0,074	0,006	1	0

Type 3	Volets en bois	Châssis vitrés en acier	0,05	0,006	17,03	0
Type 4	Volets en bois	Châssis vitrés en alu	0,05	0,006	1	12
Type 5	Volets métalliques	–	0	0	22,97	0
Type 6	Volets métalliques	Châssis vitrés en bois	0,05	0,006	22,97	0
Type 7	Volets métalliques	Châssis vitrés en acier	0	0,006	40	0
Type 8	Volets métalliques	Châssis vitrés en alu	0	0,006	22,97	12
Type 9	Grilles métalliques	Châssis vitrés en bois	0,024	0,03	14,36	0
Type 10	Grilles métalliques	Châssis vitrés en acier	0	0,03	31,39	0
Type 11	Grilles métalliques	Châssis vitrés en alu	0	0,03	14,36	12

Le bâtiment est décomposé en ouvrages fonctionnels. Différents matériaux sont considérés pour ces derniers.

CHAPITRE 4 : FONCTIONNEMENT

Nous avons vu dans le chapitre précédent l'ACV du bâtiment. Dans ce chapitre nous nous intéressons au fonctionnement de l'habitat. Comme on a vu dans la [Partie II, Chapitre 3](#), l'étude concernant l'entretien est déjà incorporé dans l'étude de l'Analyse de Cycle de Vie de l'enveloppe du bâtiment.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à l'émission de gaz carbonique liée aux consommations d'énergie au sein d'un habitat. Une étude supplémentaire concernant la consommation en eau et la production de déchets domestiques est effectuée.

D'abord, nous développons les différents types d'énergie et leurs destinations dans un habitat. Ensuite nous allons déterminer le facteur d'émission relatif à chaque source d'énergie. Des études lourdes par ACV menées par des chercheurs [\[9\]](#), [\[23\]](#) et [\[49\]](#) sont les sources de la plupart des facteurs d'émission des différents combustibles.

Ensuite, des formules sont développées afin d'obtenir les émissions en gaz carboniques liées au fonctionnement de l'habitat. La quantité d'eau consommée ainsi que la quantité de déchets produits par le ménage seront également évaluées.

I. Les différents types d'énergie

L'écart se creuse entre les pays riches et les pays pauvres. En Afrique, la consommation énergétique par habitant a à peine augmentée au cours des années 90 et représente toujours moins de 10% de la consommation moyenne par habitant en Amérique du Nord. Pour la consommation électrique rapportée à l'habitant, il existe un rapport de 1 à 100 entre les pays les moins développés (83 KWh/hab./an.) et la moyenne dans les pays de l'OCDE (8053 KWh/hab./an) [\[39\]](#).

A Madagascar, le secteur résidentiel constitue le principal consommateur d'énergie (63,3% de l'ensemble des combustibles) mais la majorité des ménages puise plus de

86% de leurs besoins énergétiques à partir du bois [1]. Les produits pétroliers représentent une part non négligeable de la consommation énergétique. L'électricité occupe une place marginale et les autres formes d'énergie dont les Energies Nouvelles et Alternatives (ENA) sont encore mal exploitées.

Au sein d'un habitat, diverses activités résidentielles nécessitent de l'énergie et provoquent de l'émission de gaz carbonique.

Dans ce travail, nous considérons les activités suivantes :

- la cuisson,
- le transport,
- l'éclairage et
- l'alimentation des appareils électroménagers et informatiques.

Les types d'énergie utilisée [1] pour ces activités sont :

- l'électricité,
- le bois et le charbon de bois,
- les combustibles fossiles : gas-oil, essence, gaz et bougie.

Les chaînes de production d'énergie et les postes de consommation énergétique de l'habitat sont déjà exposés dans la [Partie II, Chapitre 1](#).

I.1. L'électricité

L'électricité est une forme d'énergie directement utilisable obtenue à partir de la transformation de ressources énergétiques primaires. Par ailleurs, l'alimentation en électricité d'une localité est généralement assurée un ensemble de centrales de production. Les émissions sont tributaires de la nature des sources utilisées. Le terme de mix énergétique représente la répartition des différentes sources de production d'énergie dans la production totale d'électricité d'un réseau ou d'un sous-réseau. Cette répartition varie d'un pays à l'autre, voire d'une localité à une autre dans un même pays.

- **Facteur d'émission**

Dans l'idéal, pour calculer le "contenu en CO₂" d'un kWh électrique, il serait nécessaire, de tenir compte de l'énergie primaire utilisée pour faire un kWh en sortie de centrale. Il en résulte que le "contenu moyen en gaz à effet de serre" d'un kWh en sortie de centrale est très variable d'un pays à l'autre.

Dans notre cas, nous prenons le cas du Réseau Interconnecté d'Antananarivo (RIA) avec du « mix électricité » composée de 51,86% de source hydroélectrique et 48,14% générées par des groupes [46] (annexe 6). On a alors une émission de 0,43kg de CO₂ par kWh.

I.2. Bois de chauffe et charbon de bois

Le bois de chauffe et le charbon de bois sont les plus utilisés par la population malagasy pour la cuisson [1].

- **Emission en gaz carbonique**

Quand les combustibles végétaux sont brûlés, deux cas de figure peuvent se présenter :

- la biomasse brûlée n'est pas remplacée : il y a alors lieu de compter les émissions ;
- la biomasse brûlée est remplacée l'année même ou peu de temps après : il n'y alors pas lieu de compter des émissions, car ces dernières sont compensées par la croissance de la biomasse qui prend place par ailleurs.

Le deuxième cas s'appliquera en cas d'utilisation des produits d'une culture annuelle, par exemple : le fait de brûler de la paille l'année N est compensé par la croissance de la paille l'année N+1. Même pour le bois de feu ou de produits issus du bois, ce raisonnement subsiste si la forêt est dite bien gérée, quand le prélèvement annuel sera inférieur ou égal à la biomasse produite pendant l'année, de telle sorte que l'ensemble « combustion+croissance » est au moins équilibré. Quand il est en faveur de la croissance végétale, on parle même de puits. Ce gaz carbonique « biomasse », intégré au cycle carbone des espaces forestiers et agricoles, ne contribue pas à l'effet de serre tant qu'il y a équilibre de ce cycle, c'est-à-dire que la photosynthèse compense les émissions liées à l'exploitation de cette biomasse et à sa combustion.

Les changements d'affectation des terres avec la foresterie constituent la seule activité capable de séquestrer des GES, particulièrement le CO₂. Grâce à sa végétation,

Madagascar est encore qualifié de « Puits à carbone » dont la capacité de séquestration s'élève à 216987Gg équivalent de CO₂ en 1995, et ce, malgré la vocation agricole de la majorité de sa population [48]. Pourtant, cet avantage est mis en péril à cause du phénomène de déforestation attribuable à la pratique culturale sur brûlis, au feu de brousse ainsi qu'à l'exploitation illicite de la forêt.

Malgré l'aggravation de la déforestation, le bilan d'émission de GES par les changements d'affectation des terres et de la foresterie correspondrait quand même à une fixation de carbone de l'ordre de 381402 Gg de CO₂ à l'horizon 2030 Cette valeur est due au rythme actuel de reboisement de l'ordre de 21 %, et qui sera doublé en 2030 [3].

Compte tenu de ces données, le facteur d'émission des bois de feu et charbon proviendra alors des émissions liées au transport des combustibles.

I.3. Combustibles fossiles

Les émissions amont des combustibles fossiles tels le pétrole lampant, le gas-oil et le gaz, concernent l'extraction du pétrole brut, le transport de ce dernier, soit par bateau soit par pipe-line, et le raffinage, opération qui est la plus émissive de la chaîne. Un document publié par l'IFP [49] précise les émissions "du puits au réservoir" de ces combustibles [9].

- **Bougie**

Les bougies sont fabriquées à partir des cires de paraffine. Cette dernière est séparée du pétrole brut pendant la production d'huiles de lubrification légères. Les émissions amont des bougies concernent l'extraction du pétrole brut, le transport de ce dernier, le raffinage, la fabrication de bougie.

Le facteur d'émission de la bougie est déduit des études du GIEC [23]. Celle-ci est fonction de la quantité de bougie consommée, du contenu carbonique de la cire, et du facteur OPU (oxydé pendant l'utilisation).

Le [tableau 18](#) suivant présente les émissions en dioxyde de carbone de quelques sources d'énergie, utilisée dans l'habitat.

Tableau 18 : Facteurs d'émission de quelques sources d'énergie

Combustibles	Emission en CO ₂
Bois de feu	0,64 kg de CO ₂ /m ³
Charbon de bois	0,64kg de CO ₂ / m ³
Electricité	0,43kg de CO ₂ / kWh
Gaz	2,95kg de CO ₂ /kg
Pétrole lampant	2,67kg de CO ₂ /l
Bougie	0,67kg de CO ₂ /kg
Gas-oil	2,67kg de CO ₂ /l

II. Les différentes activités résidentielles nécessitant de l'énergie

II.1. Cuisson

A Madagascar, les combustibles utilisés pour la cuisson sont les suivantes :

- bois de chauffe et charbon de bois,
- électricité,
- gaz et
- pétrole lampant.

Le choix de ces combustibles est déduit des données statistiques [1] et [54].

II.2. Eclairage

D'après les données statistiques [1], à Madagascar, la plupart de la population utilise comme source d'éclairage :

- du pétrole lampant,
- de l'électricité et
- de la bougie.

II.3. Transport

Les transports peuvent être d'une source d'émission de gaz carbonique par la combustion des carburants.

Dans notre étude nous avons considéré deux cas :

- le transport en commun et
- le transport utilisant de la voiture particulière.

- **Emission en gaz carbonique**

- **Transport particulier**

La source d'émission est liée directement, à la consommation en carburant par kilomètre des véhicules. Cependant, la prédiction des émissions engendrées dépend à la fois de caractéristiques pouvant donner lieu à mesure : puissance du moteur, combustible utilisé, date de mise en circulation, et d'autres qui sont beaucoup plus difficiles à appréhender quantitativement, par exemple le type de conduite [9].

Dans une famille, c'est l'actif qui pourra être le travailleur ou l'étudiant qui nécessite le plus de transport.

Un actif allant en voiture effectue son déplacement 220 jours travaillés par an.

Pour le calcul, nous tenons compte des déplacements pendant les week-end et les jours de congé. Le nombre de jours de déplacement retenu est donc de 365.

Concernant la consommation, nous prenons des valeurs moyennes de 6,8 litres de gas-oil aux 100km et 8,6 litres d'essence aux 100km [9].

La distance moyenne à parcourir est variable suivant le site de l'habitat.

Les résultats annuels sont donnés par voiture (tableau 19).

Tableau 19 : Emission en gaz carbonique relative au transport par des véhicules particuliers.

Type de carburant utilisé	Emission en gaz carbonique par voiture [kg CO ₂ /km]
Gas-oil	0,18
Essence	0,23

- Véhicules communs

Nous adoptons du minibus pour le transport en commun, une étude de l'ADEME [9] propose une valeur de 0,016kg de CO₂ /km par passager.

II.4. Alimentation des appareils électroménagers et informatiques.

Concernant l'alimentation des appareils électroménagers et informatiques, des consommations standards annuelles sont déduites des études réalisées par l'ADEME [9] pour certains appareils (20) et pour d'autres, des estimations sont effectuées en connaissant la puissance et la durée d'utilisation de chaque appareil (annexe 4). Il est à signaler que le temps d'utilisation des équipements résidentiels n'est pas le même dans les pays développés comme la France et dans les pays en voie de développement comme Madagascar mais dans l'impossibilité d'avoir des données appropriées à notre pays, nous utilisons les données bibliographiques [9], [23], [33] et [49].

Par ailleurs, pour en déduire les émissions au sein d'un habitat, il faut associer à chaque équipement un nombre d'appareil utilisé ainsi que le facteur d'émission liés à la mode de production d'électricité. Nous prenons toujours un facteur d'émission d'électricité de 0,43kg de CO₂ par kWh.

III. Consommation en eau

Cependant, toutes les populations du globe ne disposent pas du même confort. La consommation en eau domestique dans le monde est donc très inégale, d'autant plus importante que le niveau de vie des populations soit élevé, les pays industrialisés, qui la gaspillent sans compter, caracolant loin devant les autres nations. Bien que très difficile à évaluer du fait de la multiplicité des usages, la consommation totale en eau domestique dans le monde est estimée en moyenne à 40 litres d'eau par jour et par habitant. Mais, alors qu'en moyenne un agriculteur malgache consomme 10 litres d'eau par jour, un Parisien a besoin de 240 litres d'eau pour son usage personnel, le commerce et l'artisanat urbains, et l'entretien des rues. Quant au citoyen américain, il consomme plus de 600 litres. La norme établie par la Banque Mondiale est de 100 litres par personne par jour [48].

IV. Les déchets

IV.1. Production de déchets à Madagascar

De fortes disparités sont notables entre la production des villes des pays industrialisés et celle des villes des pays en développement. Généralement, cette moyenne pour les pays industrialisés se situe autour de 1,4 à 1,7kg/hab./j alors qu'elle est beaucoup plus faible, inférieure à 1kg/hab./j pour les P.E.D [50].

Dans la commune urbaine d'Antananarivo, la quantité de déchets collectés quotidiennement est voisine de 700t/j. La production d'ordures ménagères est estimée à 600 g/habitant/jour [51].

IV.2. Les filières d'élimination et de traitements possibles des déchets ménagers

Dans les grandes villes de Madagascar comme Antananarivo, il n'y a que le ramassage des déchets par la Commune à partir des dépôts de collecte (bacs) vers la décharge municipale. Il est à noter qu'il n'y a pas de tri des déchets. Dans cette décharge, il y a des déchets récupérés et des déchets transformés en compost.

Nous exposons ci après la mise décharge, la récupération et le compostage des déchets. Les diverses méthodes de valorisation et traitement existantes et celles qui peuvent être adoptées sont données ci-après.

- Mise en décharge

La mise en décharge est la méthode de traitement la plus répandue dans le monde (figure 49). Les P.E.D y traitent plus de 90% de leurs déchets [50]. Il existe différentes techniques de mise en décharge plus ou moins contrôlées. Cette technique est employée depuis longtemps mais sans véritable contrôle sur les impacts engendrés. Leur gestion est aussi rendue difficile par manque de données sur la nature et la composition des déchets enfouis, l'humidité ou leur évolution au cours du temps.



Photo 49: La décharge d'Antananarivo.

- Valorisation

Les différentes matières recyclables présentes dans les ordures ménagères peuvent être récupérées. Des industries de tri n'existent pas encore à Madagascar. A Antananarivo, Sur la décharge d'Antananarivo, ordures sont brûlées nuit et jour (figure 50) quand les camions bennes municipaux déposent leur collecte, pour que les récupérateurs sans protection puissent « mieux voir les déchets à ramasser ».



Figure 50 : Feu allumé pour voir les déchets

- Compostage

Le compostage est adapté aux pays en développement du fait de la proportion importante de matière organique contenue dans les déchets urbains et de la volonté de réduire le gisement entrant en décharge. De plus, ce traitement permet l'obtention d'amendements organiques indispensables au sol, mis à rude épreuve entre le lessivage en période des pluies et la saison sèche. Il n'est pas un moyen de traitement unique des déchets, il doit être complémentaire de la gestion des décharges.

Remarque : l'incinération

L'incinération est une méthode de traitement très répandue dans les P.I demandant des investissements mais aussi une surveillance et une maintenance des équipements spécifiques. Le choix de l'incinération comme filière de traitement des déchets est peu retenu dans les P.E.D, à cause de la difficulté de combustion due à la nature même des déchets, de l'investissement de départ et également des frais élevés de fonctionnement.

V. Méthode de calcul

Nous allons établir des formules permettant d'obtenir :

- la consommation en eau,
- la production de déchets,
- ainsi que les émissions en gaz carbonique, liées à la cuisson, à l'éclairage, au transport et à l'alimentation des équipements électroménagers et appareils informatiques.

V.1. Consommation en eau domestique

Nous prenons alors la moyenne mondiale, d'où le volume d'eau consommée par un ménage par an :

$$V_e = 365 \times 40 \times N \quad (8)$$

N est la taille du ménage.

V_e est exprimée en l/ménage/an.

V.2. Production de déchets ménagers

Le volume de déchets ménagers produit par un ménage par an est donné par :

$$V_{ed} = 0,6 \times 365 \times N \quad (9)$$

N est la taille du ménage.

V_{ed} est exprimée en kg/ménage/an.

V.3. Emission en gaz carbonique liée à la cuisson

La quantité de gaz carbonique émis lors de la cuisson est fonction du type et du taux d'utilisation des combustibles utilisés par le ménage :

$$E_c = (N/100).[(\alpha_b.0,64.M_b) + (\alpha_c. 0,64.M_c) + (\alpha_g.2,95.M_g) + (\alpha_p .2,67.V_p)] + (1/100).(\alpha_e.0,43.C_e)$$

(10)

α_b , α_c , α_g , α_p et α_e sont les taux d'utilisation respectifs en bois de chauffe, charbon, en gaz, en pétrole lampant et en électricité pour la cuisson [en %].

$$\alpha_b + \alpha_c + \alpha_g + \alpha_p + \alpha_e = 100 \quad (11)$$

E_c est la quantité de CO₂ émis lors de la cuisson [kg de CO₂/ ménage/an];

N est la taille du ménage ;

M_b est la consommation moyenne en bois pour la cuisson [kg/pers./an] ;

M_c est la consommation moyenne en charbon de bois pour la cuisson [kg/pers./an] ;

M_g est la consommation moyenne en gaz pour la cuisson [kg/pers./an] ;

V_p est la consommation moyenne en pétrole lampant pour la cuisson [litre/pers./an] ;

C_e est la consommation moyenne en électricité pour la cuisson [kWh/ménage/an].

Les consommations moyennes des malgaches en bois de feu et charbon de bois sont issues d'autres études [52] (annexe 6). Ces dernières évoquent des consommations annuelles moyennes de 0,75m³ de bois/hab. et 0,06m³/hab. de charbon.

Concernant la consommation moyenne en électricité, nous prenons la valeur de 681kWh/ménage [9].

D'après des petites enquêtes que nous avons menées, nous avons une moyenne de 12kg de gaz/mois pour la cuisson c'est-à-dire 144kg de gaz/an/ménage (ménage composée de 5 membres). Une famille de même taille qui utilise exclusivement du pétrole lampant pour la cuisson en consomme à peu près 260litres/an/ménage.

Nous allons prendre alors des consommations estimées à 28,8kg de gaz/an/hab. pour le gaz et 52litres/an/hab. pour le pétrole lampant.

La formule donnant la quantité de dioxyde de carbone liée à la cuisson dans un habitat devient alors :

$$E_c = (N/100) \cdot (0,48\alpha_b + 0,038\alpha_c + 84,86\alpha_g + 138,84\alpha_p) + (292,83\alpha_e)/100 \quad (12)$$

E_c est exprimée en kg de CO₂/ménage/an.

V.4. Emission de gaz carbonique liée à l'éclairage

La quantité de CO₂ émis à cause de l'éclairage est fonction du nombre de pièces de la maison et du type d'ampoule utilisée. Dans ce calcul, nous supposons il n'y a qu'une ampoule ou une bougie ou une lampe à pétrole dans une pièce. Dans le cas où on utilise de l'électricité pour l'éclairage, nous considérons l'ampoule économique de 18W et de l'ampoule incandescentes de 100W.

On suppose qu'une ampoule est allumée 4 heures par jour.

D'après nos enquêtes, l'éclairage d'une pièce nécessite une bougie de 25 grammes par jour ou 10cl de pétrole lampant par jour. Les émissions relatives à l'éclairage est présentée par le [tableau 20](#).

Tableau 20: Emissions en gaz carbonique liées à l'éclairage.

Eclairage avec	Emission en CO ₂
Ampoules économiques	11,30kg de CO ₂ / ampoule/an
Ampoules incandescentes 100W	62,78kg de CO ₂ / ampoule/an
Bougie	6,11kg de CO ₂ /pièce /an
Pétrole lampant	97,46kg de CO ₂ /pièce/an

Les facteurs d'émission associés à l'éclairage d'un habitat sont donnés par les formules suivantes :

- à l'électricité :

$$E_e = 11,30 \cdot N_p \quad (13)$$

si on a une ampoule de 18W.

$$E_e = 62,78 \cdot N_p \quad (14)$$

si on a une ampoule de 100W.

- avec de la bougie :

$$E_e = 6,11. N_p \quad (15)$$

- avec du pétrole lampant :

$$E_e = 97,46. N_p \quad (16)$$

E_e est exprimée en kg de CO₂/ménage/an.

V.5. Emission de gaz carbonique liée au transport

• Véhicules particuliers

Concernant les voitures particulières, l'émission est estimée par nombre de véhicule et est fonction de la distance entre à parcourir.

$$E_{tpd} = 65,7. d. N_{vd} \quad (17)$$

si on a une voiture à diesel.

$$E_{tpe} = 83,95. d. N_{ve} \quad (18)$$

si on a une voiture à essence.

E_{tpd} et E_{tpe} sont exprimées en kg CO₂/voiture/an.

N_{vd} est le nombre de véhicules particuliers à diesel appartenant au ménage.

N_{ve} est le nombre de véhicules particuliers à essence appartenant au ménage.

d est la distance à parcourir par jour par la voiture particulière.

• Transport commun

L'émission en dioxyde de carbone pour le transport commun est fonction de la distance entre l'habitat et le lieu de travail et est exprimée en kg de CO₂/passager/an et est donnée par :

$$E_{tc} = 5,84 .d. N_{tc} \quad (19)$$

N_{tc} est le nombre de personne utilisant le transport en commun.

d est la distance à parcourir par jour par le minibus commun.

V.6. Emission liée à l'alimentation des appareils électroménagers et informatiques

Les émissions causées par l'utilisation des équipements ménagers sont données par :

$$E_{em} = 0,43 \cdot \sum n_i C_{ai} \quad (20)$$

C_{ai} est la consommation moyenne annuelle de chaque équipement résidentiel [kWh].

n_i : nombre de l'appareil ou équipement informatique i ,

E_{em} est exprimée en kg de CO₂/ménage.

D'où l'émission de gaz carbonique liée au fonctionnement d'un habitat est donc :

$$E_h = E_c + E_e + E_{tp} + E_{tc} + E_{em} \quad (21)$$

Ces formules permettent d'obtenir les émissions liées aux activités domestiques. Les résultats obtenus sont par kg de CO₂/ménage par an. La consommation en eau est donnée par litre d'eau /individu par an et la production de déchets en kg de déchet/individu par an.

PARTIE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET OUTIL

D'après l'étude par Analyse de Cycle de Vie effectuée dans la [Partie II](#), nos résultats sont divisés en deux grandes parties.

En premier lieu, il y a les émissions de gaz carbonique relatives à l'enveloppe du bâtiment c'est-à-dire pour chaque ouvrage fonctionnel du bâtiment et par Unité Fonctionnelle : émission depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la destruction ainsi que les émissions correspondantes au fonctionnement de l'habitat.

Comme il est signalé auparavant, nous déterminons également la consommation en eau de ainsi que la quantité de déchets produits au sein d'un habitat.

En second lieu, nous exposons l'outil ECO2H que nous avons développé.

CHAPITRE 1 : RESULTATS RELATIFS A L'ENVELOPPE DU BATIMENT ET AU FONCTIONNEMENT

Les distances entre le lieu de production des matériaux locaux sont variables, les résultats présentés ci-après correspondent aux distances suivantes :

- la distance entre le lieu de production des produits moulés (briques, tuiles, hourdis) et le chantier égale à 20km,
- la distance entre le lieu de production des granulats (gravillons, sable) et le chantier égale à 20km,
- la distance entre le lieu d'extraction des bois (bois pour obtenir des planches, madrier, etc...) et le chantier égale à 50km.

I. Enveloppe du bâtiment

I.1. Toiture

Différents types de toiture sont considérés ([Partie II, Chapitre 3, §2](#)). Les quantités de gaz carbonique émises sont présentées sur les [figures 51 et 52](#).

I.1.1. Résultats

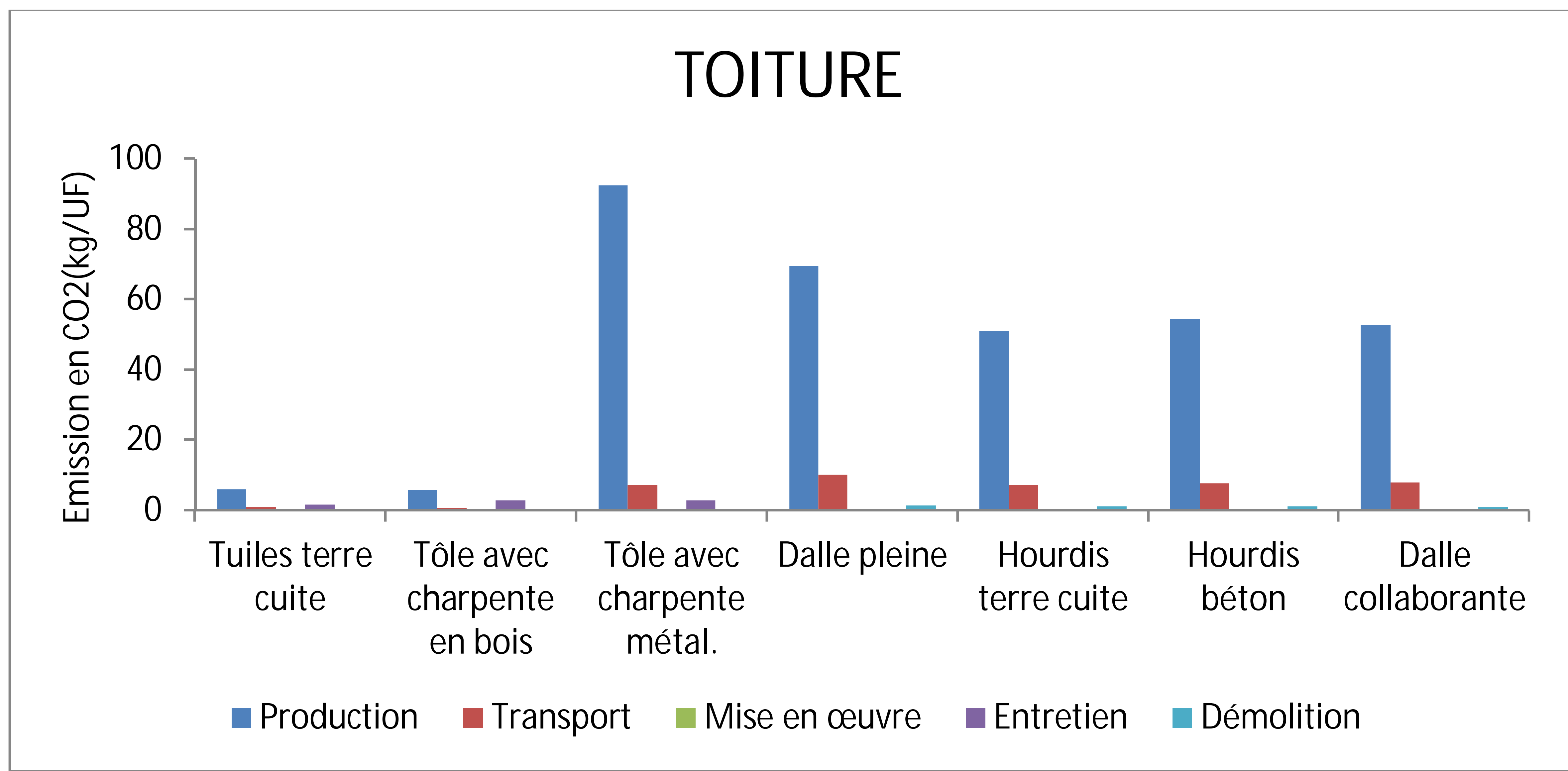


Figure 51: Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de toiture, sur une période de 50 ans.

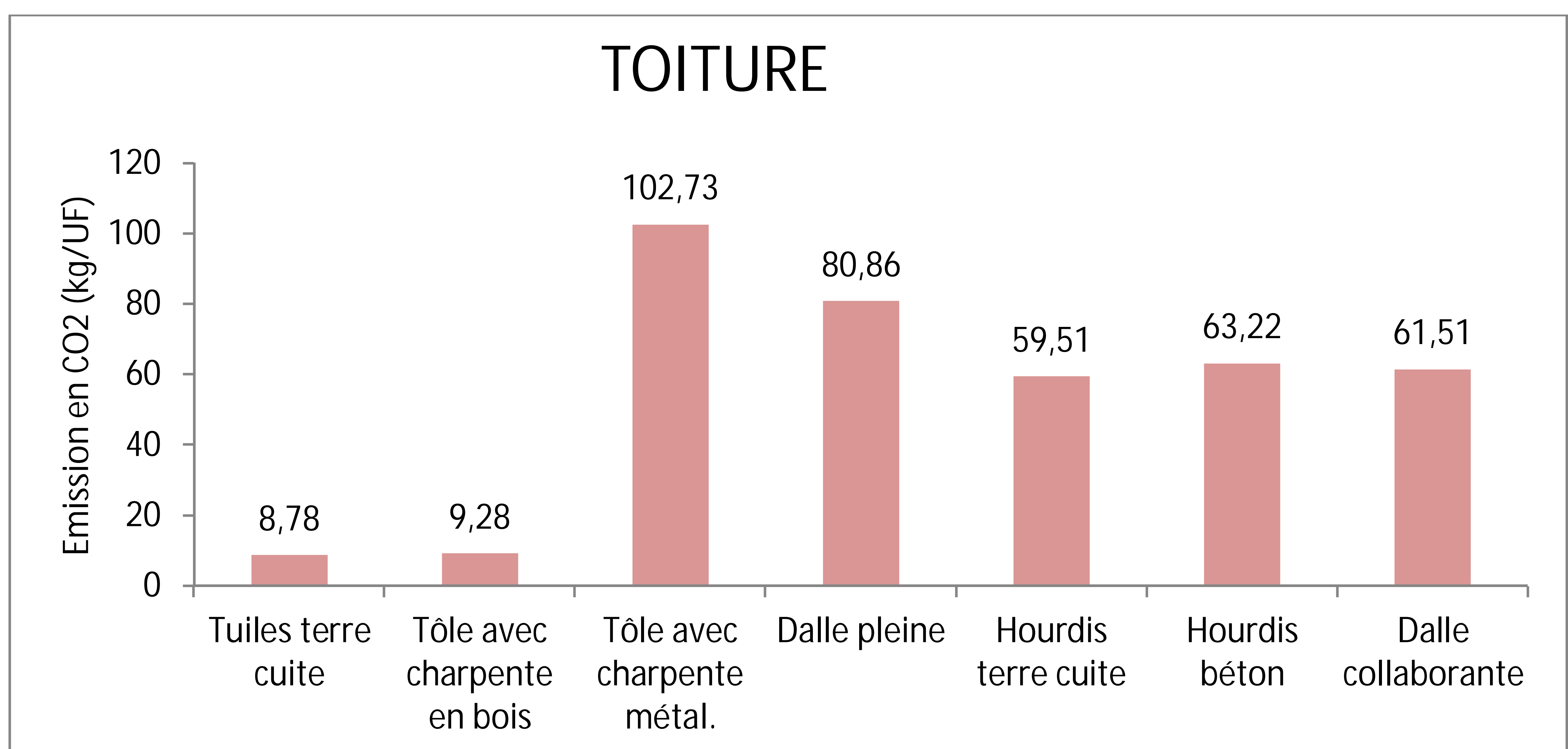


Figure 52 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de toiture, sur une période de 50 ans.

I.1.2. Interprétation

La toiture avec couverture en tôle et charpente métallique est le plus émissif en gaz carbonique. Ceci est dû principalement à l'utilisation de l'acier, un matériau incorporant beaucoup d'énergie lors de sa production à l'usine. Il est à signaler qu'il y a une émission de 2,18t de gaz carbonique pour la production de 1t d'acier, d'où l'émission de 102,73 kg de dioxyde de carbone par UF de toiture.

Concernant les toitures en béton armé, l'émission est due principalement à la présence notable de ciment et d'acier. La production d'une tonne de ciment engendre 669kg de dioxyde de carbone.

Malgré l'existence des industries cimentières à Madagascar, les productions n'arrivent pas à satisfaire le besoin local. Nous importons 150 000 tonnes de ciment par an pour un besoin de 400 000tonnes. Notons aussi que l'acier utilisé pour la construction à Madagascar est importé car notre pays n'a pas encore d'industrie métallurgique. La distance entre l'usine de production et le chantier est alors très importante. 10% de l'émission totale est lié au transport des matériaux pour les toitures en béton

La toiture avec charpente en bois est le moins émissif de gaz carbonique malgré le fait celle-ci nécessitent plus d'entretien au cours de son cycle de vie [41]. Les bois sont exploités et débités localement. L'émission est due principalement au débitage de bois et au transport.

Les tuiles en terre cuite considérées dans notre étude sont produites artisanalement donc n'incorporent pas d'énergie fossile, d'où une faible émission de gaz carbonique de 8,78 kg/UF.

La toiture avec charpente en bois est le moins émissif de gaz carbonique malgré le fait celle-ci nécessitent plus d'entretien au cours de son cycle de vie [41]. Les bois sont exploités et débités localement. L'émission est due principalement au débitage de bois et au transport.

Quelque soit le type de toiture, on note que la part en émission de gaz carbonique lors de la phase de production des matériaux et lors de leurs transports.

I.2. Mur

Les résultats ci-après (figures 53 et 54) concernent la comparaison des murs extérieurs.

I.2.1. Résultats

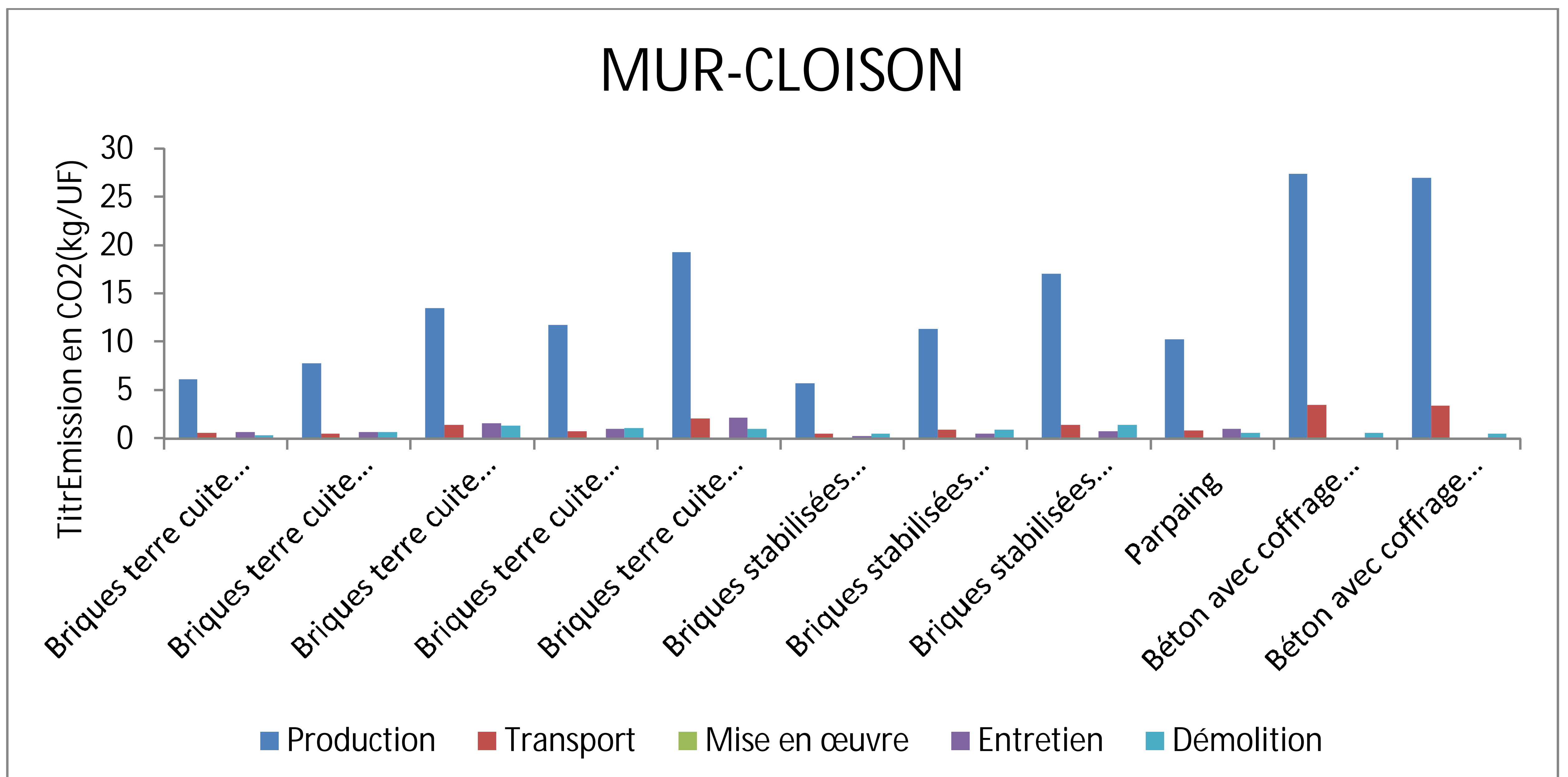


Figure 53 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de mur sur une période de 50 ans

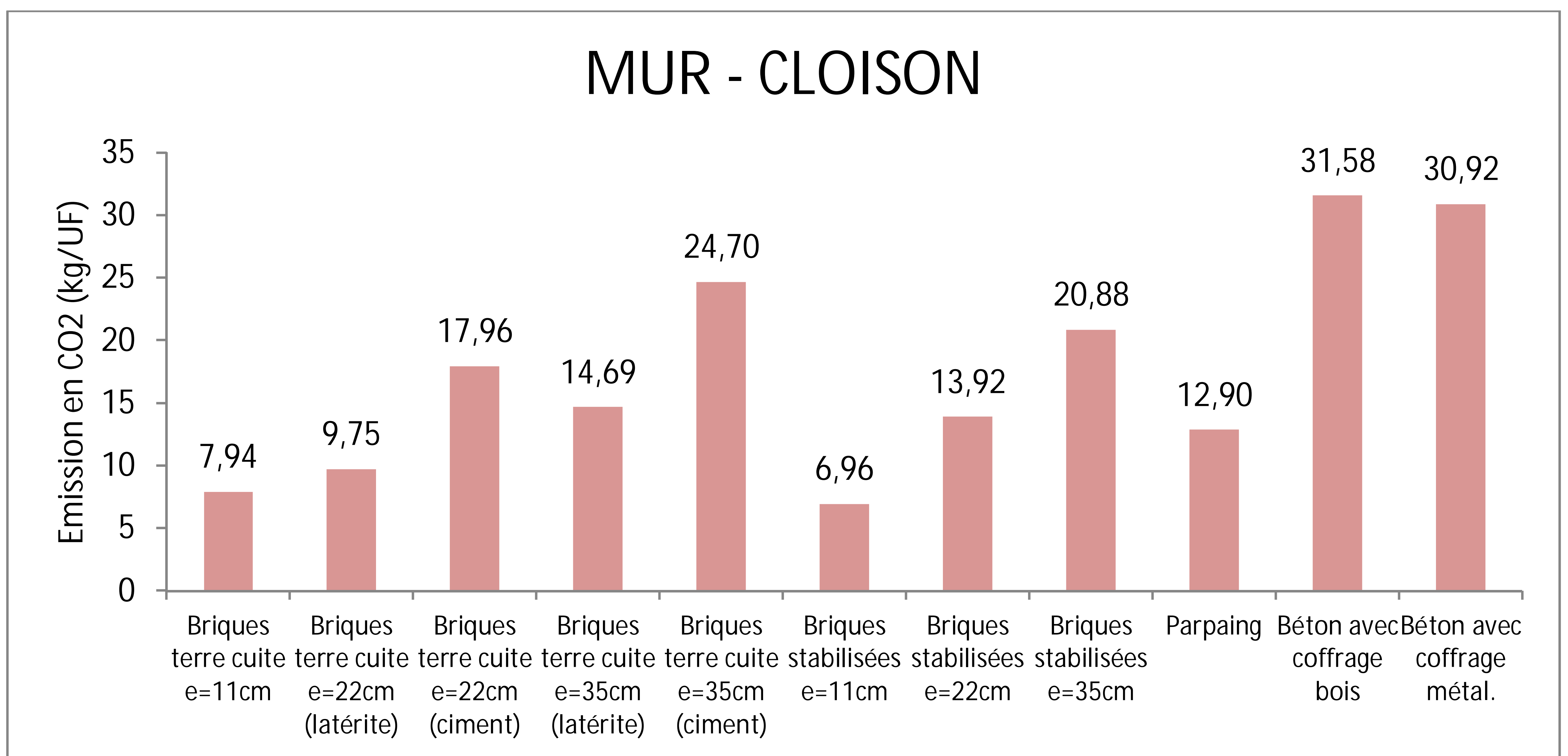


Figure 54: Emission totale en gaz carbonique des différents types de mur sur une période de 50 ans.

I.2.2. Interprétation

Malgré le fait que le mur en béton qui nécessite le moins d'entretien, comparé aux murs en briques et en parpaing celui-ci est le plus émissif en dioxyde de carbone, au cours de

son cycle de vie du fait de l'utilisation de ciment et de l'acier, 31,58kg de CO₂/UF si on utilise du coffrage en bois et 30,92kg de CO₂/UF si on a du coffrage métallique. Les valeurs sont presque égales du fait qu'on a pas comptabiliser l'émission liée au coffrage métallique car ce dernier peut être réutilisable jusqu'à 100 fois. C'est la phase de production et les transports des matériaux qui engendrent la plus grande partie de l'émission. 1/10 de l'émission totale des murs en béton est lié au transport.

Les murs en briques stabilisées sont parmi les moins émissifs du fait que la production de ces briques ne nécessite pas de cuisson donc pas de combustible. Les émissions en dioxyde de carbone correspondent à celles des liants.

I.3. Fondation

Les quantités de gaz carbonique émis pour les 5 types de fondation sont les suivantes (figures 55 et 56).

I.3.1. Résultats

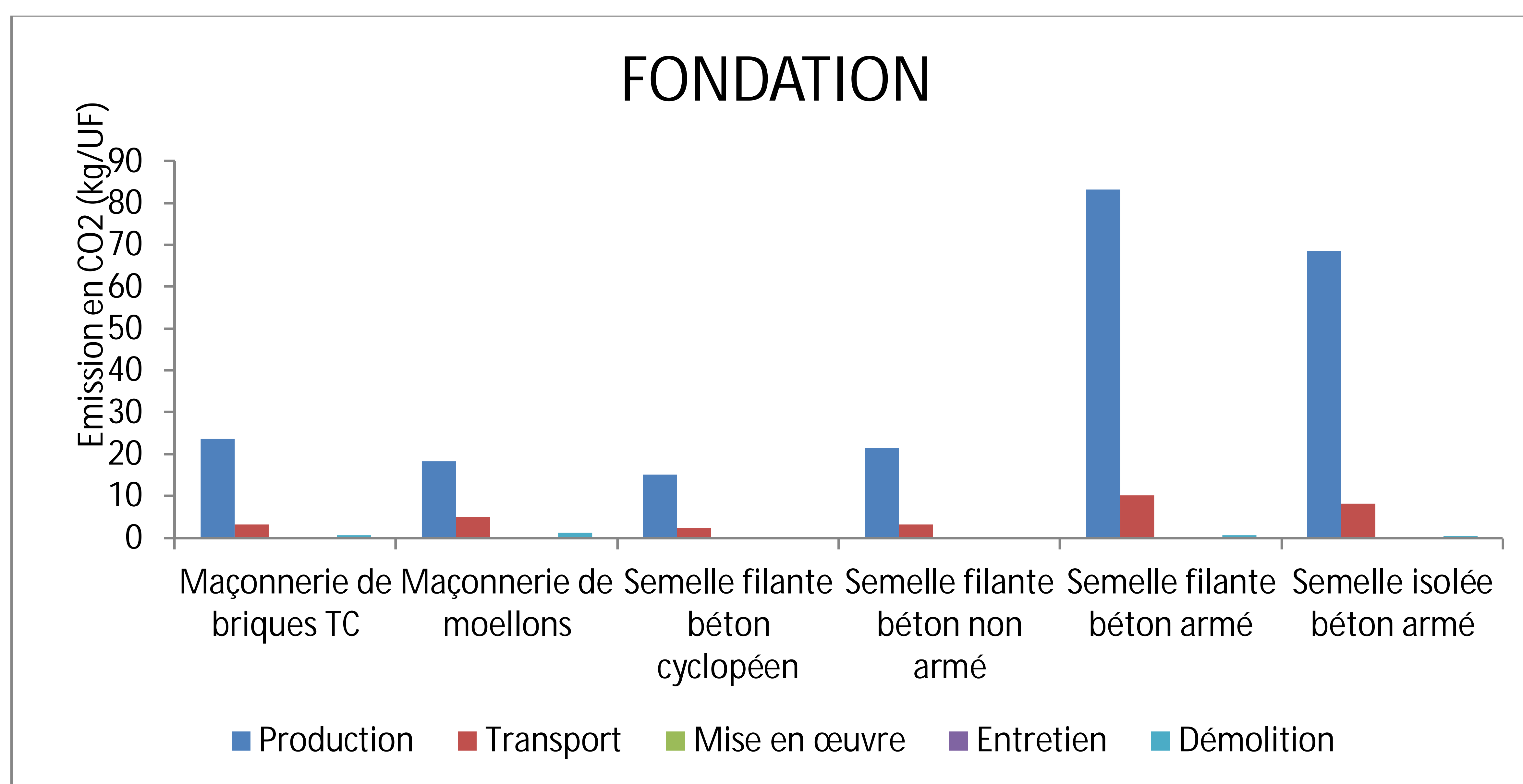


Figure 55 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fondation, sur une période de 50 ans.

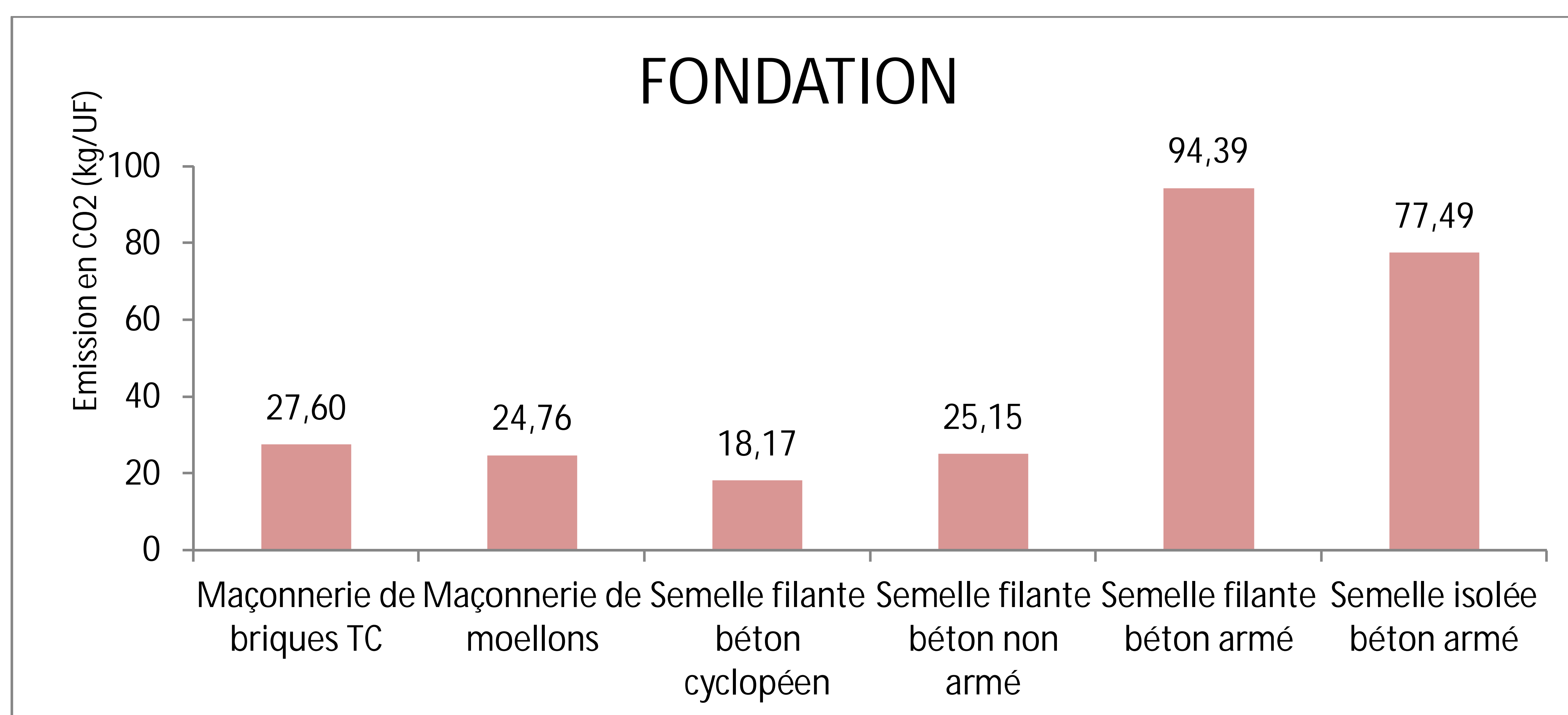


Figure 56 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de fondation sur une période de 50 ans.

I.3.2. Interprétation

Les fondations en béton armé qui dégagent le plus de gaz carbonique au cours de son cycle de vie, à cause de l'utilisation de ciment et acier, principaux matériaux émissifs en dioxyde de carbone lors de leurs productions. Les semelles filantes et isolées en béton armé dégagent respectivement 94,39kg de et 77,49kg de dioxyde de carbone par UF. Le dégagement en CO₂ des fondations en béton non armé est le quart de ceux en béton armé.

La fondation en moellon dégage 24,76kg de CO₂. Cette émission est due à l'utilisation de mortier de ciment pour l'assemblage. Les moellons sont produits manuellement par des artisans.

Quant à la fondation en briques de terre cuite, on a 27,60kg de gaz carbonique par UF. Les briques sont maçonnées avec du mortier du ciment. Il est à signaler le choix d'adopter ce type de fondation est limité car dans certains cas il est conseillé par les techniciens d'avoir de la fondation en béton.

I.4. Plancher

Pour le plancher, six types de « partie portante » sont considérés : bois, dalle pleine, hourdis en terre cuite, hourdis en béton, dalle collaborante et le dallage (figures 57 et 58).

I.4.1. Résultats

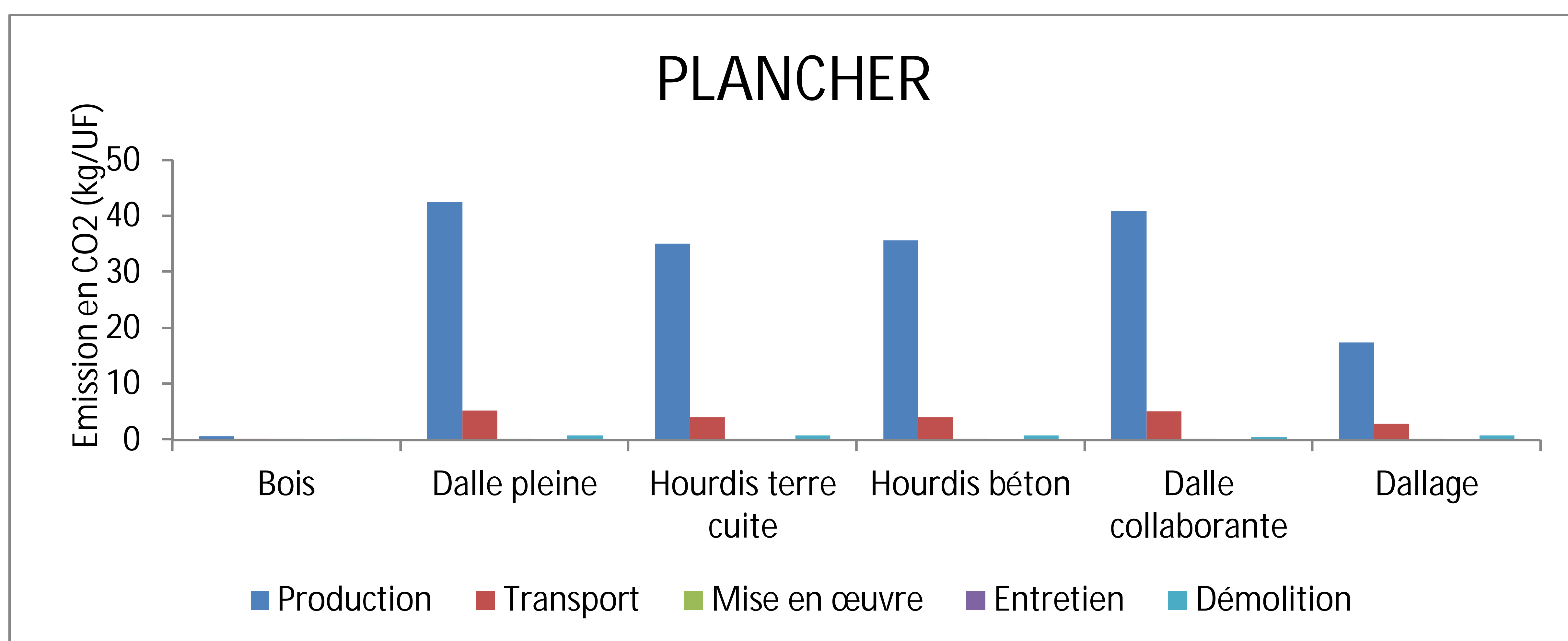


Figure 57 : Emission totale en gaz carbonique des différents types de plancher sur une période de 50 ans.

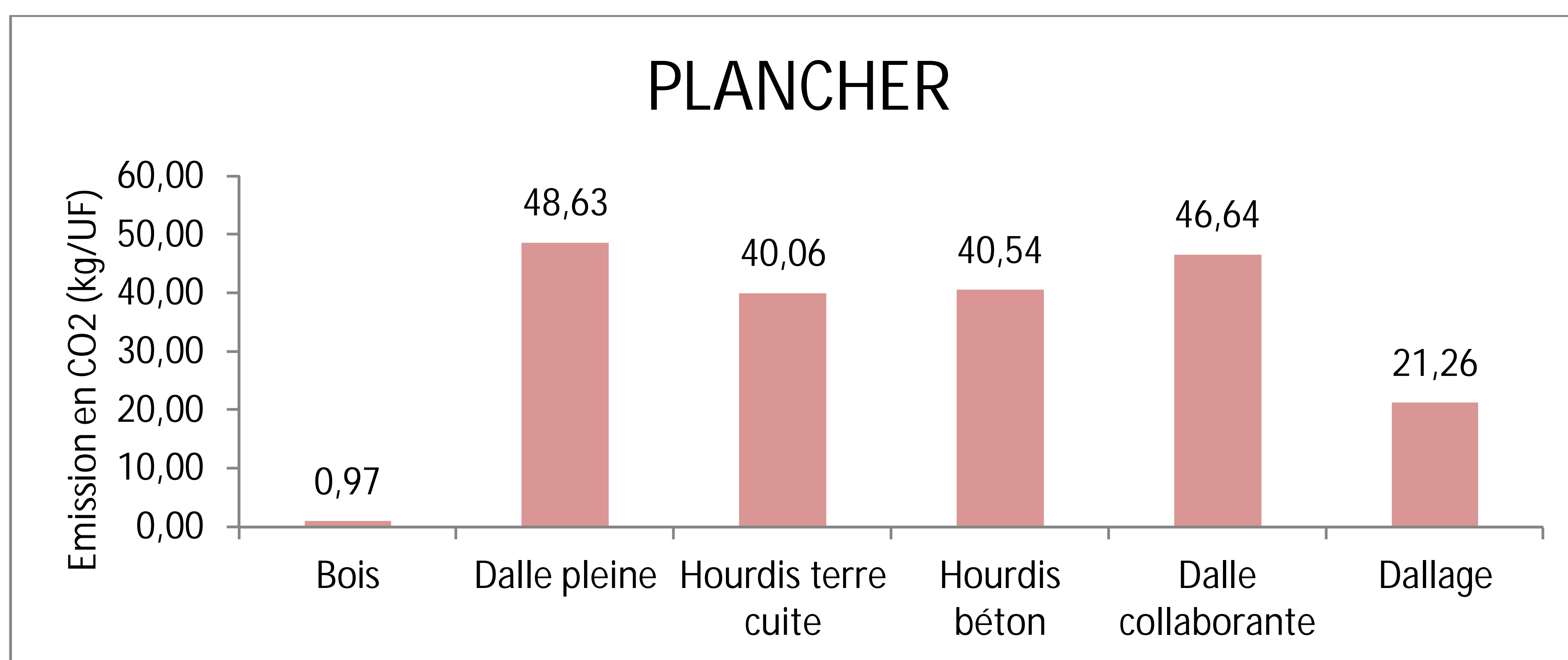


Figure 58 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de plancher sur une période de 50 ans.

I.4.2. Interprétation

Les émissions varient de 0,97kg à 48,63kg de CO₂ par UF. Dans le cas de Madagascar, en prenant l'hypothèse qu'il y a de la gestion des forêts c'est-à-dire qu'il y a de remplacement des bois utilisés, c'est à dire du reboisement régulier pour que cet aspect écologique puisse être conservé. Le bois est le matériau plus écologique en émission de

dioxyde de carbone tandis que les planchers en béton sont les plus émissifs en gaz carbonique.

I.5. Revêtement supérieur du plancher

Les figures 59 et 60 montrent les émissions en gaz carbonique correspondantes aux différents types.

I.5.1. Résultats

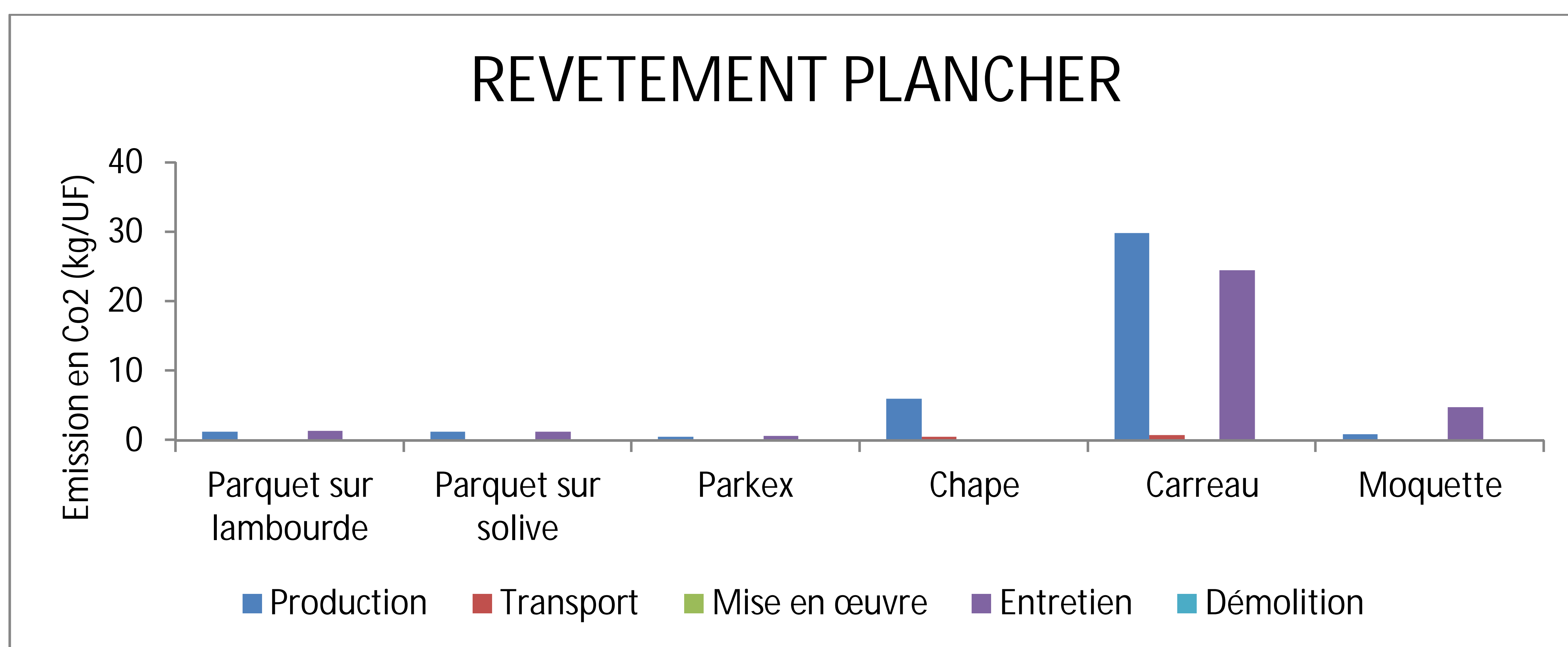


Figure 59: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de revêtement de plancher, sur une période de 50 ans.

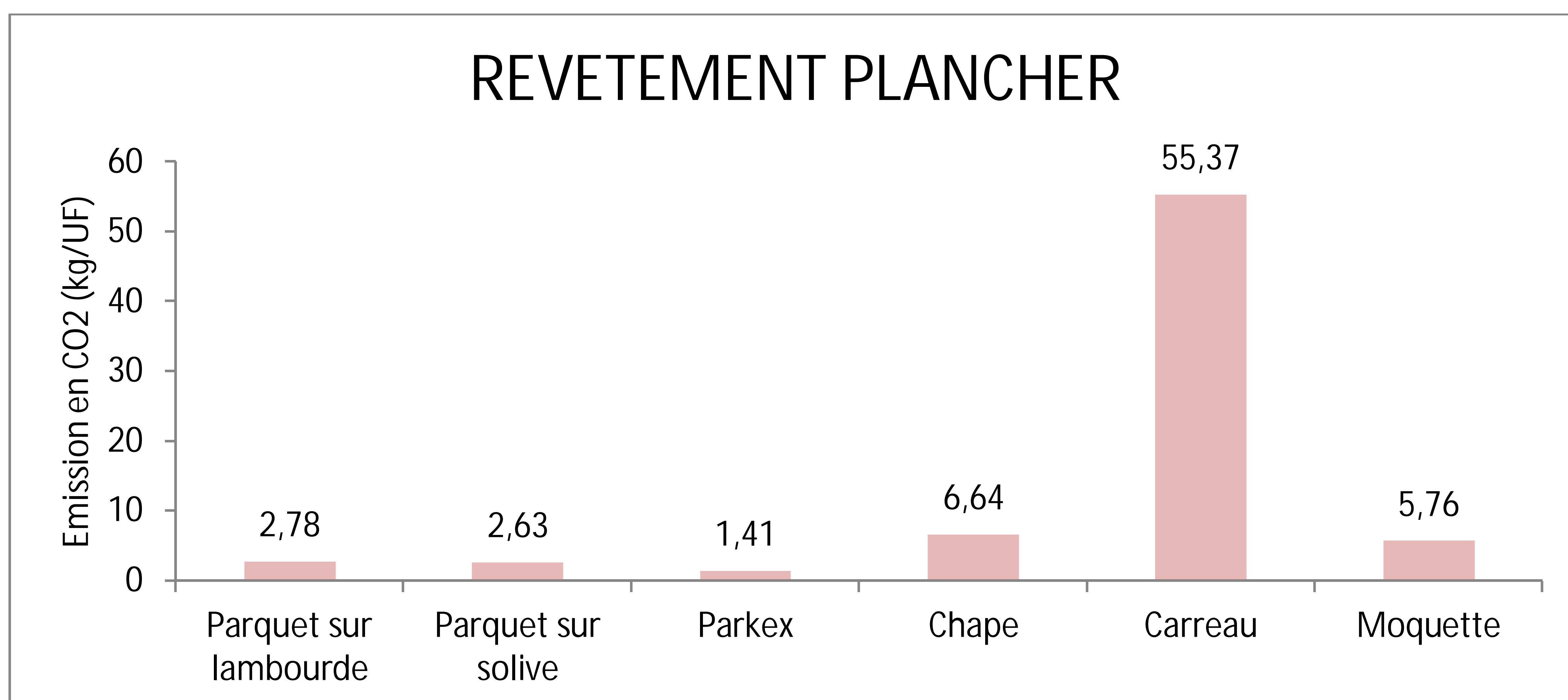


Figure 60 : Émission totale en gaz carbonique des différents types de revêtement de plancher, sur une période de 50 ans.

I.5.2. Interprétation

Les carreaux dégagent 55,37 kg de gaz carbonique par mètre carré de plancher. La production de 1tonne de carreaux engendre 1,4 tonne de dioxyde de carbone. Les produits céramiques nécessitent beaucoup d'énergie lors de productions car il faut une température de plus de 1200°C pour la cuisson.

Les autres revêtements en bois dégagent 2,78kg, 2,63kg, et 1,41kg de CO₂ par UF. La chape a un dégagement de 6,64kg et le revêtement en moquette a une émission de 5,76 kg de CO₂. Pour ces deux derniers types de revêtement, les émissions liées à l'entretien pendant son cycle de vie sont importantes. Nous avons supposé que le revêtement en moquette nécessite un remplacement tous les 10 ans tandis que les carrelages sont remplacés à 80% au bout de 50 ans.

I.6. Revêtement du faux plafond

Concernant le revêtement du faux plafond, les émissions en carbonique sont les suivantes (figures 61et 62).

I.6.1. Résultats

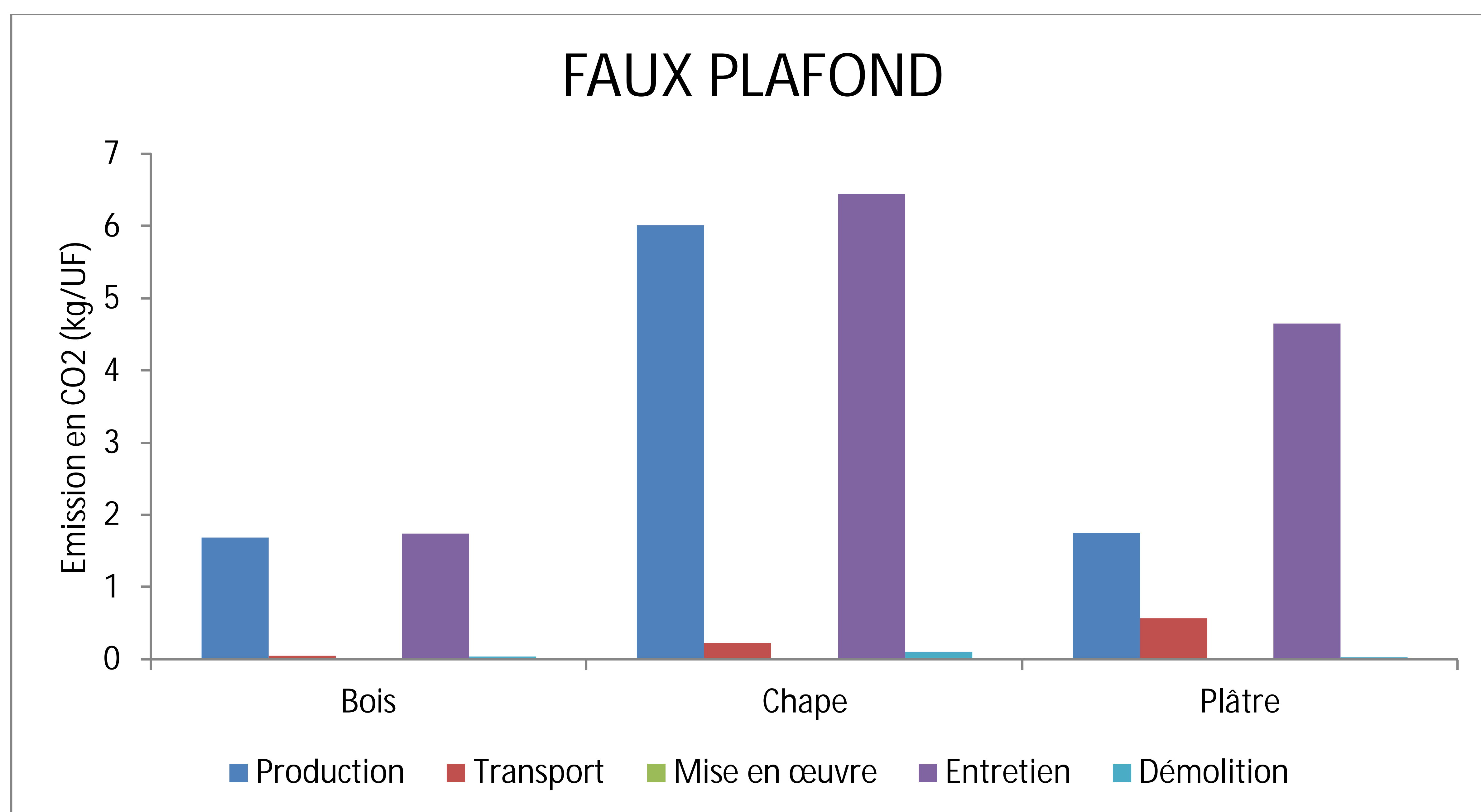


Figure 61: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de faux plafond, sur une période de 50 ans.

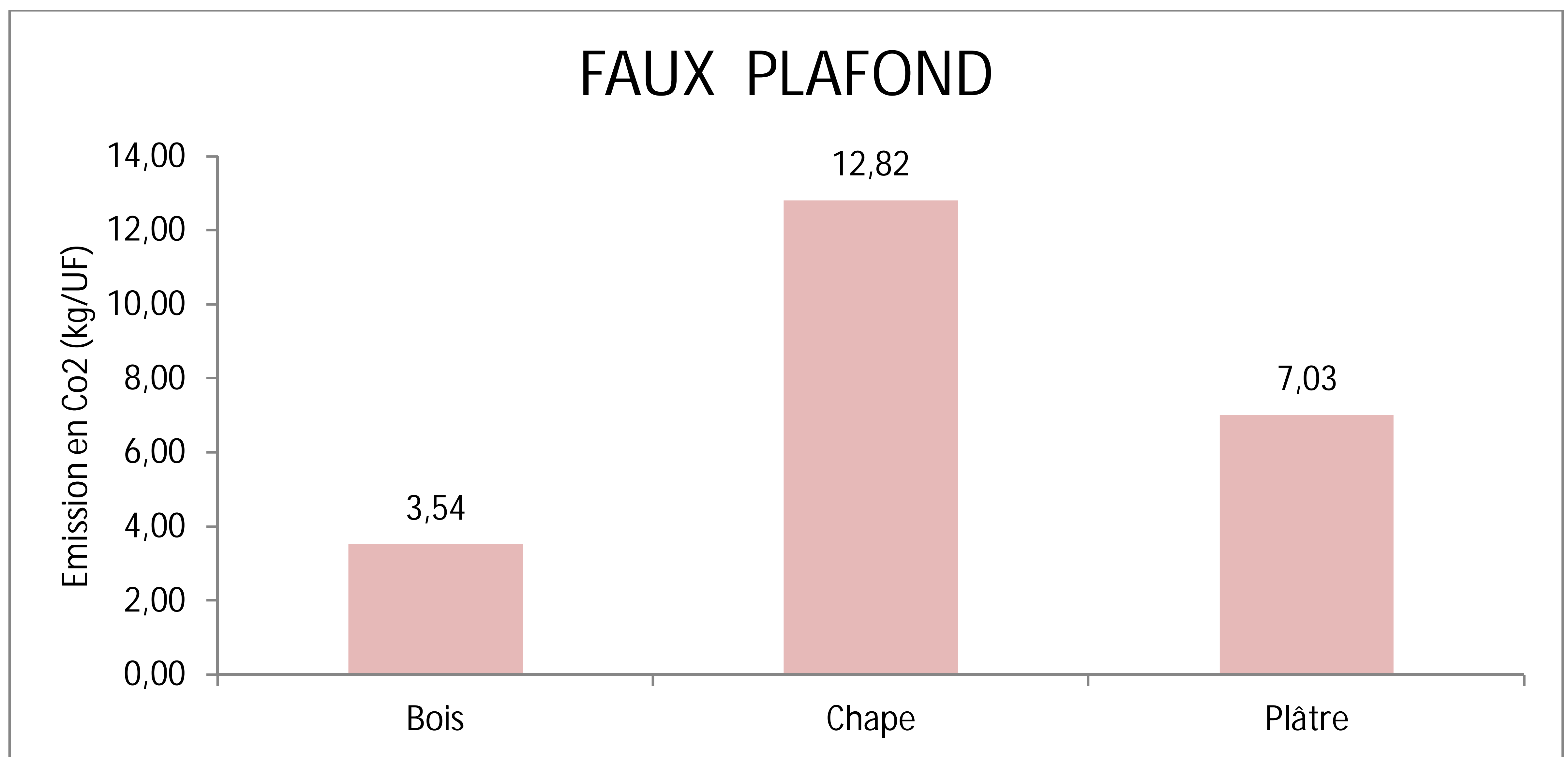


Figure 62 : Émission totale en gaz carbonique des différents types de faux plafond, sur une période de 50 ans.

I.6.2. Interprétation

Concernant le revêtement du plancher, l'entretien occupe une place importante en émission en gaz carbonique. Pendant une période de 50ans, les plaques de plâtre nécessitent deux renouvellements. Pour le revêtement en bois, les voliges doivent être remplacées à 100% pour une durée de 50 ans, cependant il n'y a qu'une émission en gaz carbonique de 3,54kg/m² de plancher pendant cette période. La chape émet 12,8 kg de dioxyde de carbone par unité fonctionnelle, un dégagement dû principalement à la production et au transport du ciment.

I.7. Les Ouvertures

Nous présentons par les figures 63 à 66 suivantes les émissions en gaz carboniques correspondants aux 11 types de porte et 11 types de fenêtre.

I.7.1. Résultats

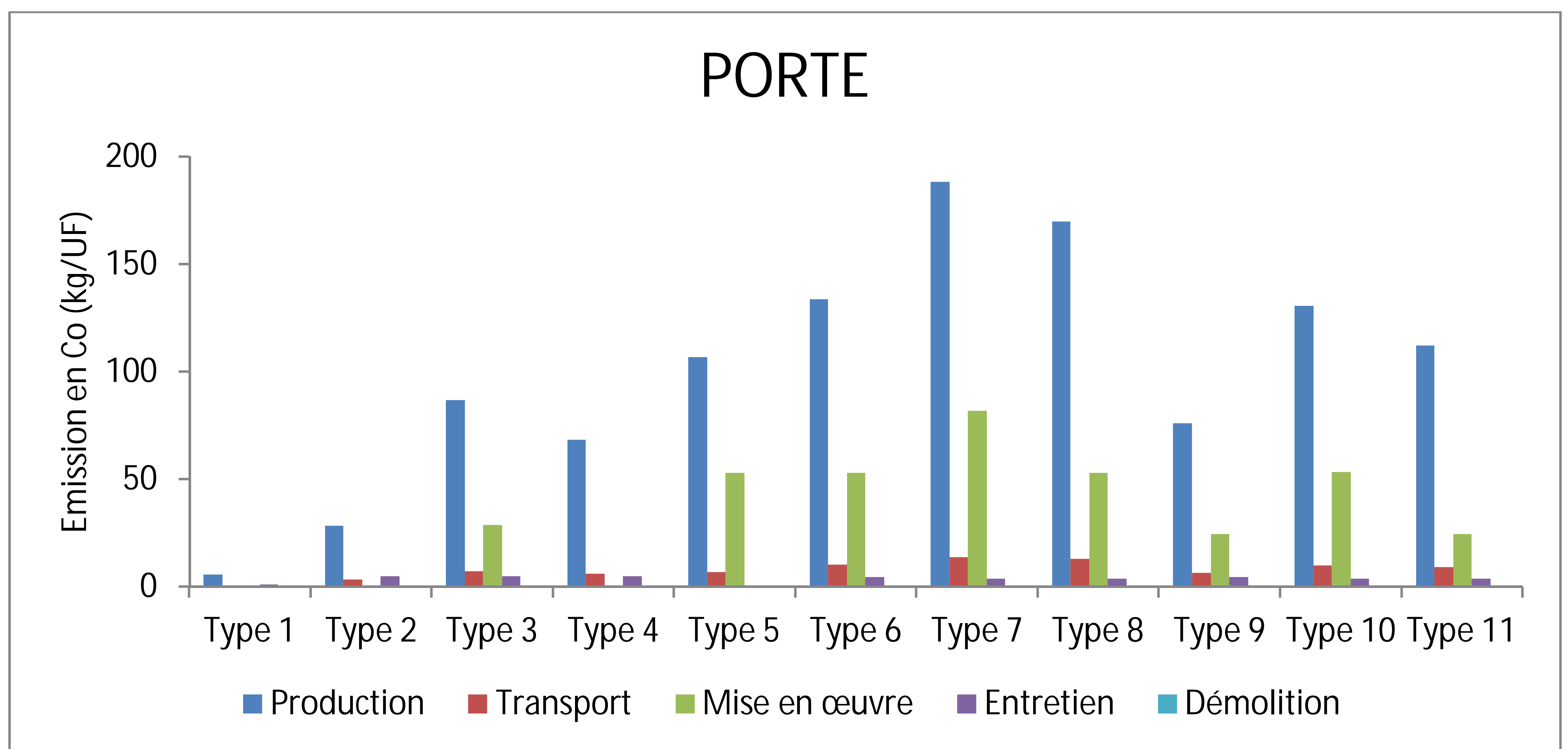
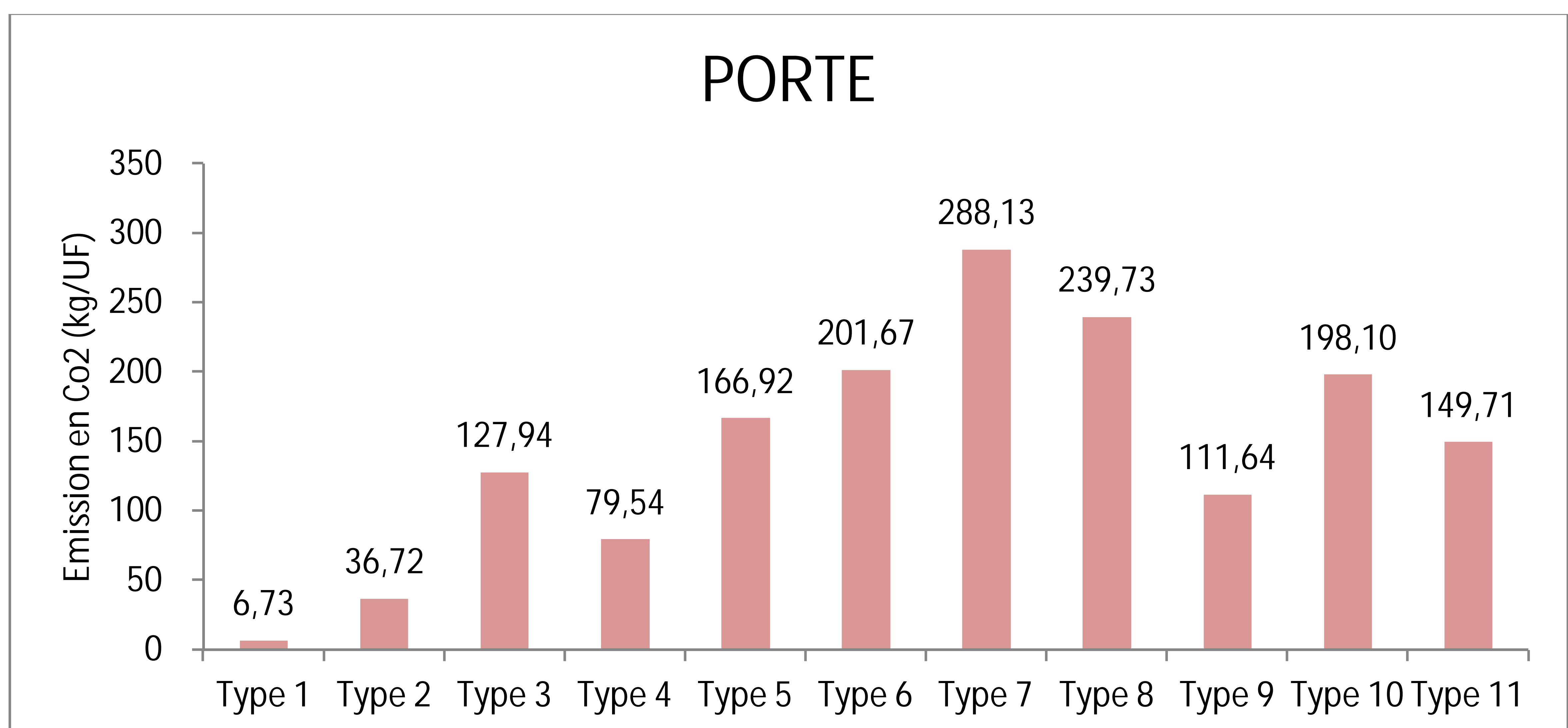


Figure 63 : Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de porte, sur une période de 50 ans.



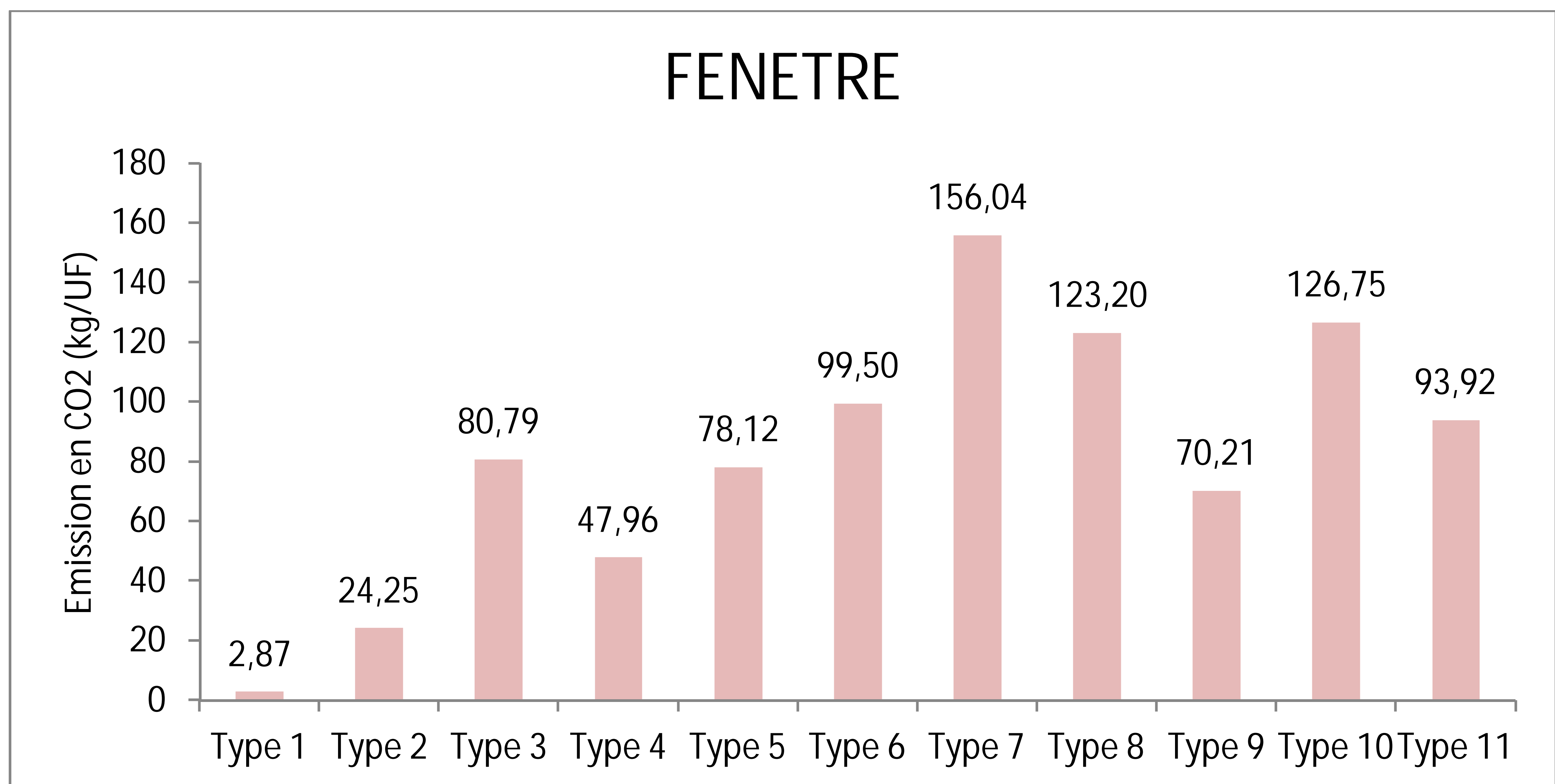


Figure 64: Émission totale en gaz carbonique des différents types de porte, sur une période de 50 ans.

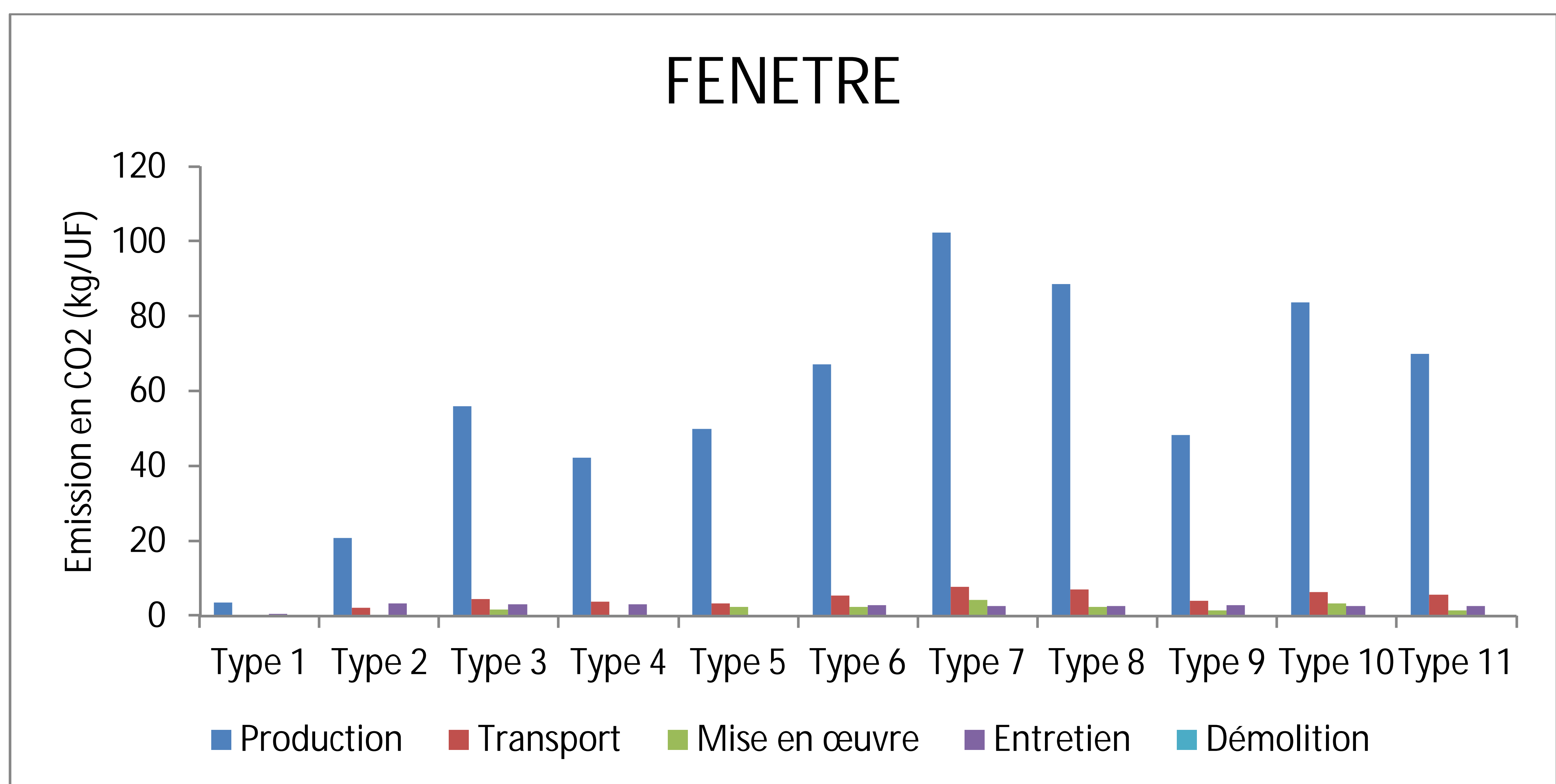


Figure 65: Émission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fenêtre, pour une période de 50 ans.

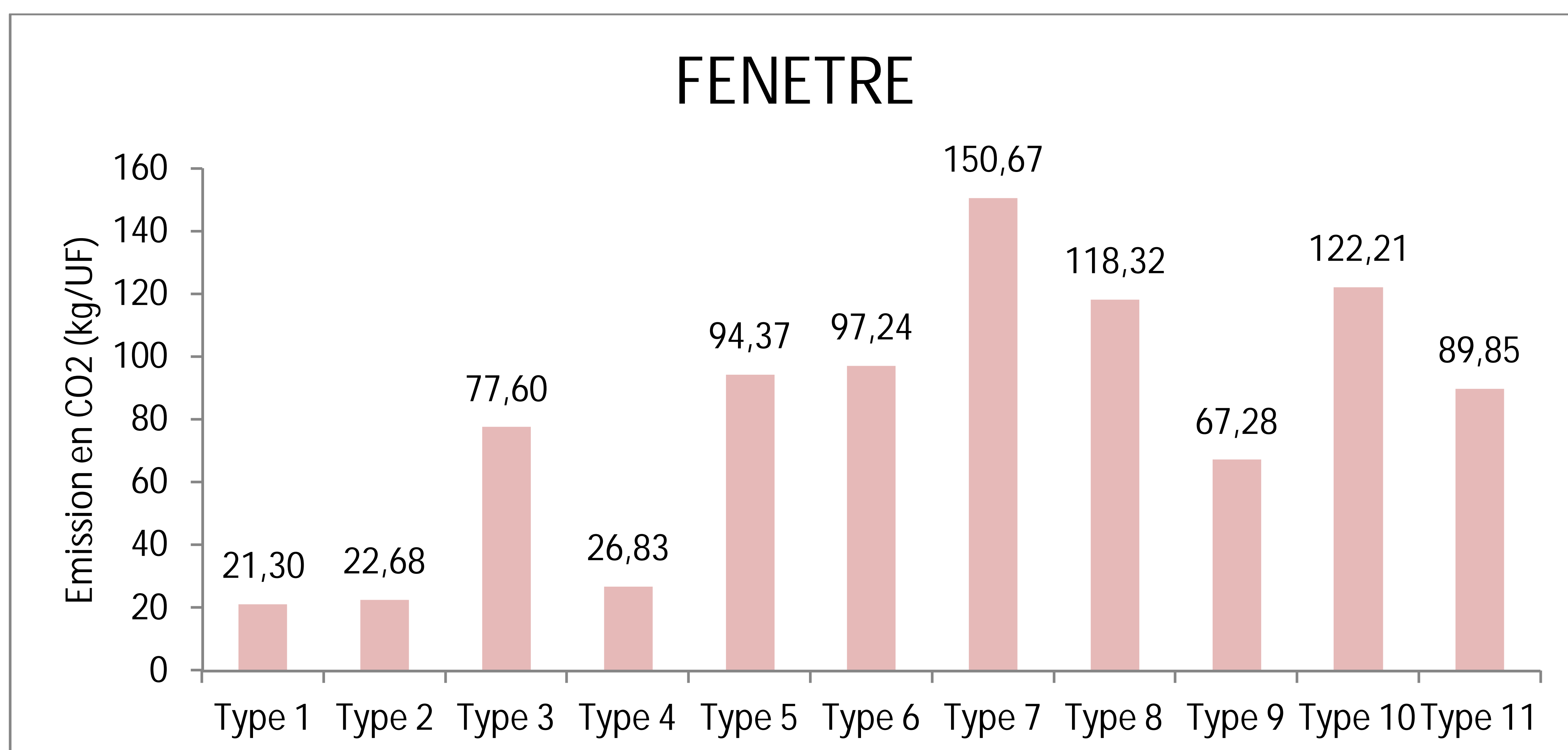


Figure 66 : Émission totale en gaz carbonique des différents types de fenêtre, sur une période de 50 ans.

Tableau 21 : les différents types d'ouvertures

Porte et fenêtre	Extérieure	Intérieure
Type 1	Volets en bois	–
Type 2	Volets en bois	Châssis vitrés en bois
Type 3	Volets en bois	Châssis vitrés en acier
Type 4	Volets en bois	Châssis vitrés en alu
Type 5	Volets métalliques	–
Type 6	Volets métalliques	Châssis vitrés en bois
Type 7	Volets métalliques	Châssis vitrés en acier
Type 8	Volets métalliques	Châssis vitrés en alu
Type 9	Grilles métalliques	Châssis vitrés en bois
Type 10	Grilles métalliques	Châssis vitrés en acier
Type 11	Grilles métalliques	Châssis vitrés en alu

I.7.2. Interprétation

Les émissions relatives aux ouvertures façonnées avec de l'acier et l'aluminium sont les élevés du fait que la fabrication de ces matériaux sont très énergétivores et utilisant des combustibles fossiles. Il est évident que les ouvertures en bois sont le moins émissives

en gaz carbonique, du fait que nous n'avons tenu compte que les émissions venant des transports et des débitages des bois.

Il est à remarquer que les ouvrages fonctionnels façonnés avec du ciment et de l'acier sont les plus émissifs en gaz carbonique. C'est la production des matériaux de construction qui est la source de l'émission en gaz carbonique. Le transport des matériaux ne constituent en général que la 1/10ème de l'émission totale.

Comme il est signalé auparavant, l'émission de gaz carbonique relatif au fonctionnement de l'habitat dépend des caractéristiques de l'habitat (nombre des occupants, sources d'énergie utilisée, nombre de pièces à éclairer, type de transport adopté, etc.). L'émission en gaz carbonique varie alors d'un habitat à un autre.

D'après [1], le ménage malgache est composé en moyenne de 4,9 personnes.

Nous donnons alors les résultats relatifs à la cuisson, pour une famille composée de 5 membres. Pour l'éclairage, les quantités de gaz carbonique sont données par pièce à éclairer.

Concernant le transport utilisant des véhicules particuliers, la quantité de l'émission en CO₂ est évaluée par voiture, tandis que pour le transport en commun, la masse de dioxyde de carbone est quantifiée par nombre de personne utilisant ce mode transport.

Les résultats correspondants au fonctionnement de l'habitat sont donnés par an, du fait que les caractéristiques d'un ménage peuvent changer chaque année. Par exemple : taille du ménage, nombre et type d'appareils électroménagers, source d'énergie utilisée, etc.

II. Fonctionnement

II.1. Cuisson

II.1.1. Résultats

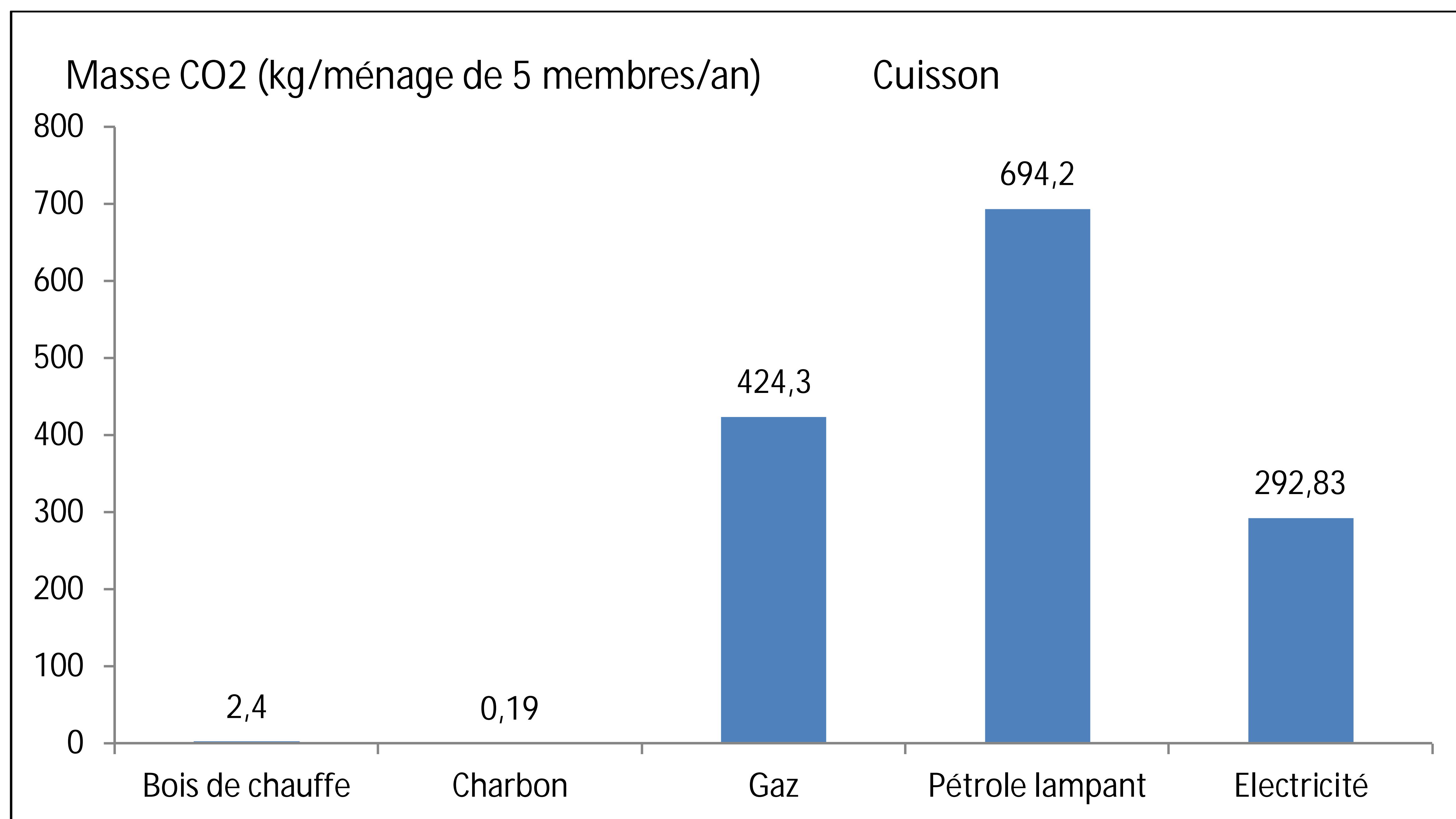


Figure 67: Emission en gaz carbonique liée à la cuisson.

II.1.2. Interprétation

D'après la [figure 68](#), l'utilisation de combustible fossile comme le pétrole lampant et le gaz qui dégage le plus de gaz carbonique du fait que 1 litre de pétrole lampant engendre 2,67 kg de CO₂ et 1kg de gaz provoque 2,95 kg de dioxyde de carbone. La cuisson avec de l'électricité occupe la troisième place du fait que cette étude est basée sur les données du Réseau Interconnecté d'Antananarivo dont l'électricité est issue de deux sources différentes : thermique et hydraulique ([annexe 6](#)).

Les émissions relatives à la production des bois de chauffe et charbon de bois sont nulles compte tenu de notre hypothèse que Madagascar est un puits d'oxygène. Les très faibles valeurs ici présentées ne correspondent alors qu'à leurs transports.

II.2. Eclairage

II.2.1. Résultats

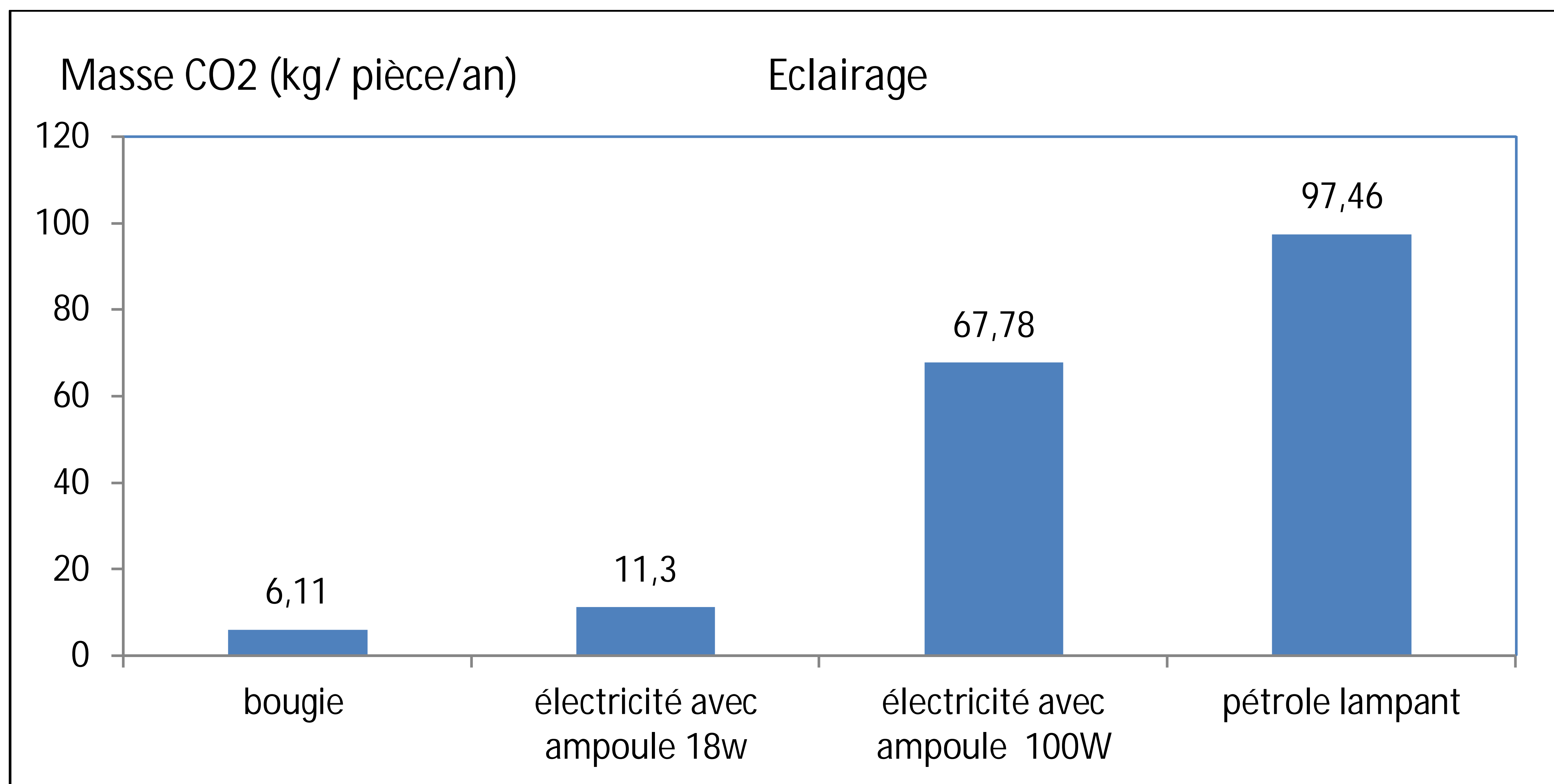


Figure 68: Emission en gaz carbonique liée à l'éclairage.

II.2.2. Interprétation

Si on utilise de l'ampoule non économique, il est évident que l'émission 11,30 kg de CO₂ par pièce qui sont émis par an (figure 69). Le pétrole lampant est très émissive en gaz carbonique. Cependant, les familles sont contraintes d'utiliser de la bougie et du pétrole lampant si leurs habitats ne sont pas encore connectés à l'électricité.

II.3. Transport

II.3.1. Résultats

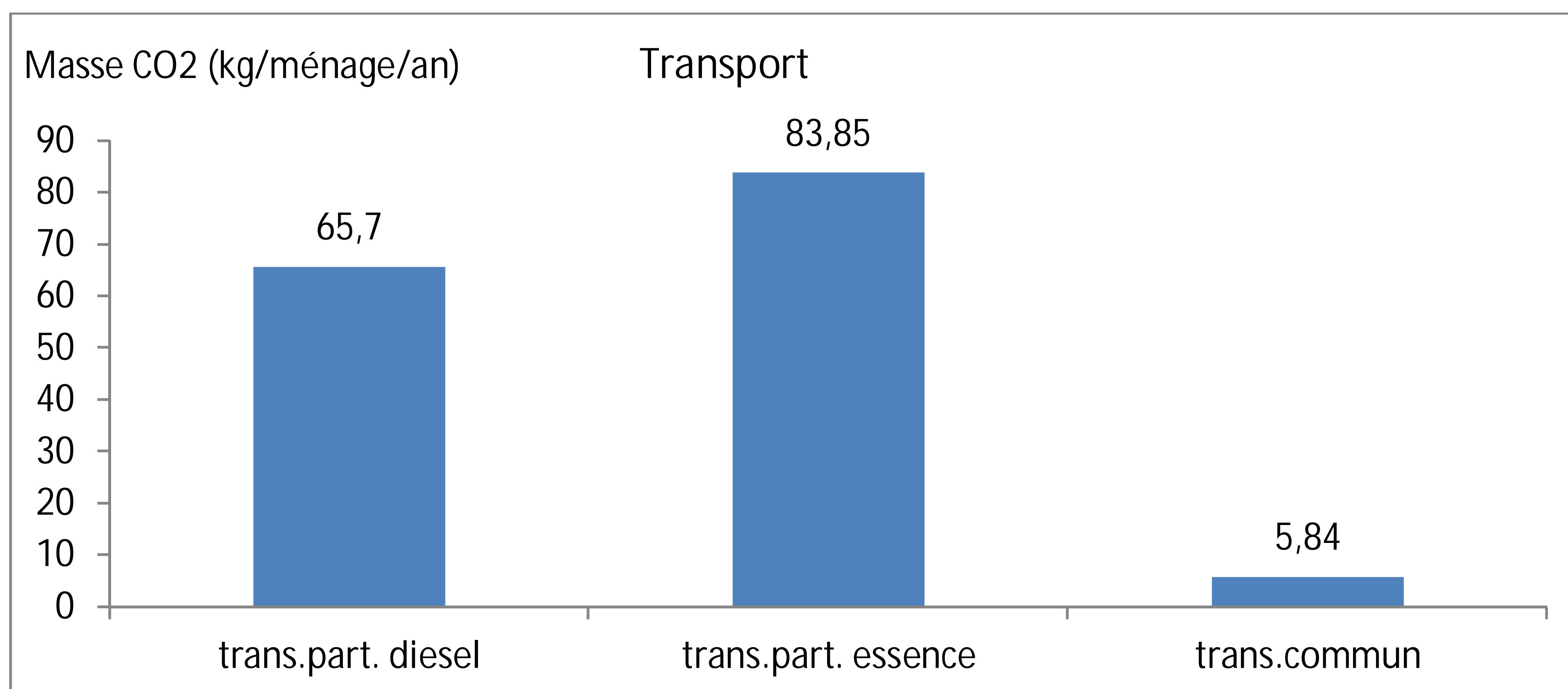


Figure 69: Emission en gaz carbonique liée au transport (pour $d=1\text{km}$).

II.3.2. Interprétation

L'émission en gaz carbonique relative au transport dépend d'abord du mode transport : en commun ou utilisant des véhicules particuliers et du type de carburant utilisé. Si le ménage adopte le transport en commun, l'émission est divisée par 13 (figure 70).

Pour un ménage composé seulement d'un seul individu et si on prend une distance de 10km par jour à parcourir, il n'y a que 5,84 kg de CO₂ /an si on adopte le transport en commun contre 65,7kg de CO₂ /an si on prend une voiture particulière à diesel.

II.4. Consommation en eau et production de déchet

La consommation en eau ainsi que la quantité de déchets produits par un ménage dépend de la taille de celui-ci. Pour cette fois, nous donnons alors les résultats par personne.

II.4.1. Résultats

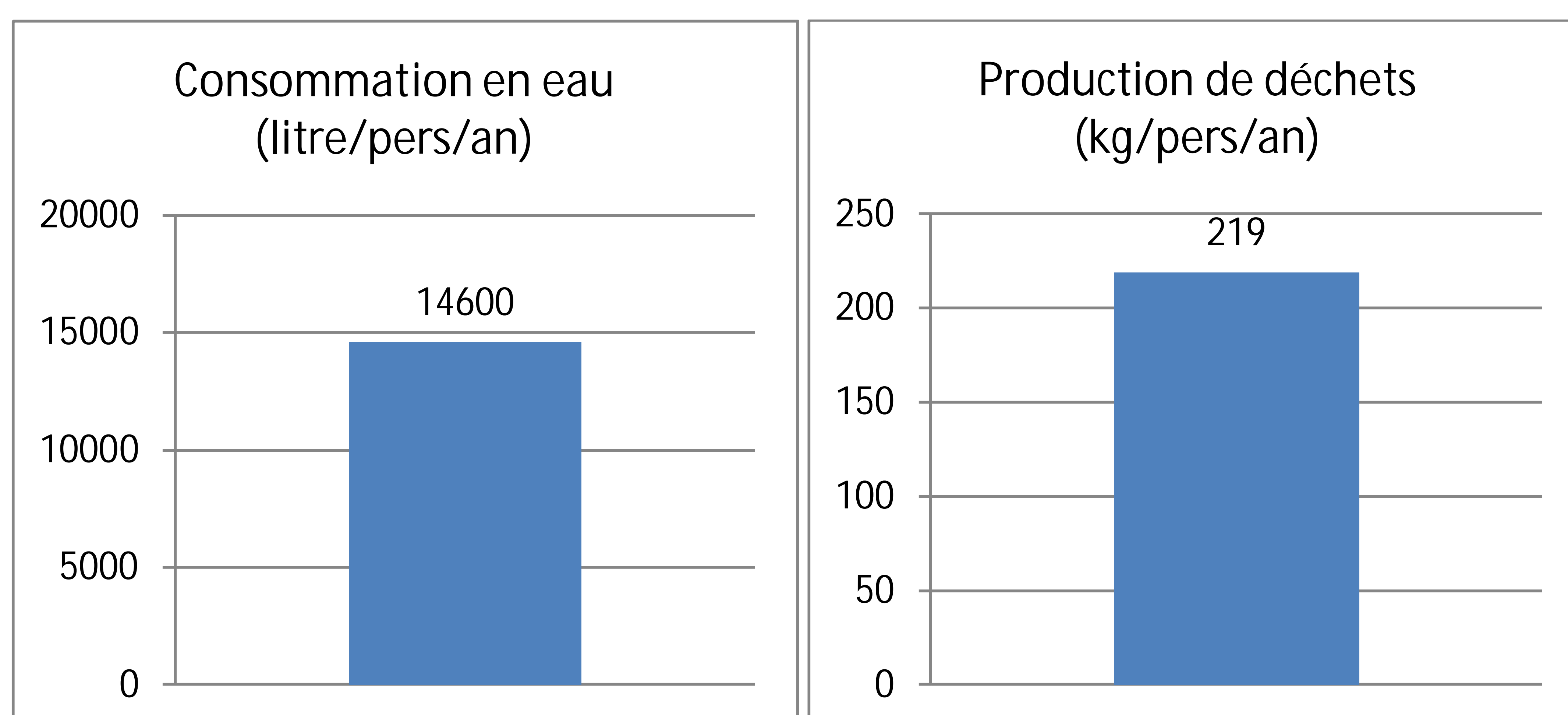


Figure 70: Consommation en eau (litre/pers/an) et quantité de déchet produit (par pers/an).

Pour la population malgache, un individu consomme 14600 litres d'eau par an et produit 219 kg de déchet par an (figure 71). La consommation en eau est déduite de la consommation moyenne mondiale. Cependant, cette valeur peut être diminuée jusqu'à 3650 litres/personne/an car en moyenne un agriculteur malgache consomme seulement 10 litres d'eau par jour [48].

Pour la production de déchets, la valeur de 219kg/pers/an qui correspond bien à la quantité moyenne de déchet produit par individu dans les pays en développement (< 365kg/pers/jour) [50].

Nous avons présenté dans la première de ce chapitre nous a permis d'abord d'obtenir les résultats concernant l'émission de gaz carbonique de chaque ouvrage fonctionnel pendant le cycle de vie de l'enveloppe du bâtiment, et ceci par unité fonctionnelle selon le protocole défini par ISO 14044 et suivant des hypothèses quant aux distances pour les transports.

Pour ce qui est de la phase utilisation, les émissions sont dues aux consommations énergétiques des ménages. Les valeurs des émissions sauf celles attribuées à l'éclairage, ainsi que les quantités d'eau et de déchets sont présentées soit par ménage suivant l'hypothèse qu'une famille malgache est composée en moyenne de 5 personnes [1], soit par personne, et dans tous les cas par an. Dans le cas particulier de l'éclairage, les résultats sont donnés par pièce et par an.

Pour avoir des résultats relatifs au corps du bâtiment dans sa globalité et/ou par ménage de différentes tailles, nous avons conçu un outil dénommé ECO2H.

CHAPITRE 3 : ECO2H

Les résultats que nous venons de présenter dans [Partie II, Chapitre 1](#) sont limités aux UF pour des OF pris séparément.

Il est à signaler que l'application du cadre méthodologique de l'analyse de cycle de vie conduit souvent à traiter une multitude de données et par conséquent nécessite l'utilisation d'un logiciel ACV ; il existe actuellement une soixantaine de logiciels.

Quand les calculs sont nombreux et répétitifs pour l'accomplissement d'une tâche, le recours à un programme informatique permet de gagner du temps en évitant les efforts répétés et les erreurs de calcul. En effet, le grand volume de données à compiler et la répétition des tâches ont motivé les praticiens à mettre en place depuis les années 1980 des logiciels ACV de plus complexes permettant à l'utilisateur de faire des calculs nécessaires dans une ACV.

C'est pourquoi, nous avons développé ECO2H « Emission en CO2 d'un habitat ». Ce logiciel est un outil d'aide à la décision pour toute personne soucieuse, en premier lieu d'optimiser le choix des matériaux de construction des maisons d'habitation. C'est un outil approprié pour Madagascar.

C'est un outil permettant d'évaluer les performances environnementales d'un habitat quelconque c'est-à-dire les émissions en gaz carbonique liée à son enveloppe d'une part et liée à son fonctionnement d'autre part.

I. Présentation de ECO2H

ECO2H est développé sous matlab, celui-ci intègre des données traite les données sur les caractéristiques de l'habitat, à savoir les transports pour les matériaux de construction d'importation à Madagascar et pour les matériaux fabriqués localement ainsi que sur celles du ménage.

II. Réalisation d'ECO2H

II.1. Démarche

Nous avons utilisé le logiciel Matlab 6.5 pour les calculs et pour la création des interfaces (figure 71).



Figure 71 : Page d'accueil de ECO2H.

Des modélisations mathématiques et calculs effectués dans les parties précédentes nous permettent d'élaborer ECO2H. L'utilisateur pourra à tout moment saisir et faire varier :

- type de matériaux utilisés et
- quantité de chaque OF

pour le bâtiment et

- taille du ménage,
- nombre de pièces à éclairer,
- type d'énergie utilisé pour la cuisson et l'éclairage,
- nombre et type d'appareils électroménagers et matériels informatiques,
- type de transport adopté,
- nombre de véhicules particuliers appartenant au ménage,
- distance à parcourir par les occupants et

- type de carburant pour les véhicules particuliers

pour le fonctionnement.

II.2. Modélisation de ECO2H

Dans ECO2H, il y a deux grands éléments :

- l'enveloppe du bâtiment ainsi que
- son fonctionnement.

Le corps ou l'enveloppe du bâtiment est composé d'ouvrages fonctionnels (OF) à savoir :

- la fondation (figure 72) ;
- le mur et la cloison (figure 73) avec les revêtements (figure 74) ;
- le plancher avec les différents types de revêtements (figures 75 et 76) ;
- la toiture (figure 77);
- les ouvertures et les autres ouvrages en béton (figure 78).

Distances : lieu de production-chantier des mat. locaux(km)	
Produits moulés : briques, parpaings, hourdis	0
Granulats et sable	0
Exploitation forestière	0

1. FONDATION	
TYPE DE FONDATION	LONGUEUR DE LA FONDATION (m)
Maçonnerie de briques de terre cuite	0
Maçonnerie de moellons	0
Semelle filante en béton cyclopéen	0
Semelle filante en béton non armé	0
Semelle filante en béton armé	0
Semelles isolées en béton armé	0

Continuer	Fermer	Précédent
-----------	--------	-----------

Figure 72 : Interface relative à l'OF « fondation ».

2. MUR - CLOISON

Type de mur et cloison	Surface du mur (m2)
BRIQUES DE TERRE CUITE (e=11cm)	0
BRIQUES DE TERRE CUITE e=22cm (mortier de latérite)	0
BRIQUES DE TERRE CUITE e=22cm (mortier de ciment)	0
BRIQUES DE TERRE CUITE e=35cm (mortier de latérite)	0
BRIQUES DE TERRE CUITE e=35cm (mortier de ciment)	0
BRIQUES STABILISEES (e=11cm)	0
BRIQUES STABILISEES (e=22cm)	0
BRIQUES STABILISEES (e=35cm)	0
PARPAING (e=20cm)	0
BETON : avec coffrage et échafaudage en bois	0
BETON : avec coffrage et échafaudage en métal	0

Figure 73 : Interface relative à l'OF « mur ».

3. REVETEMENT MUR ET CLOISON

TYPE DE REVETEMENT	SURFACE DU MUR (m2)
Enduit de ciment	0
Enduit batard (ciment+latérite)	0
Jointoiement	0

Figure 74 : Interface relative aux revêtements de l'OF mur.

4. PLANCHER

Type de plancher	Surface du plancher (m ²)
BOIS	0
BETON : dalle pleine	0
BETON avec hourdis en terre cuite	0
BETON avec hourdis en béton	0
BETON avec dalle collaborante	0
Dallage	0

Figure 75 : Interface relative à l'OF « plancher ».

5. REVETEMENT DU PLANCHER

Type de revêtement SUPERIEUR	Surface du plancher (m ²)
BOIS : parquet sur solive	0
BOIS : parquet sur lambourde	0
BOIS : parquet à coller	0
Chape	0
Carreau	0
Moquette	0

Type de revêtement : faux-plafond	Surface du plancher (m ²)
BOIS : volige	0
Chape	0
Platre	0

Figure 76 : Interface relative aux revêtements du plancher.

6. TOITURE

TYPE DE TOITURE	Surface à couvrir (m2)
TUILES : avec charpente en bois	0
TOLES : avec charpente en bois	0
TOLES : avec charpente métallique	0
BETON : dalle pleine	0
BETON avec hourdis en terre cuite	0
BETON avec hourdis en béton	0
BETON avec dalle collaborante	0

Figure 77 : Interface relative à l'OF « toiture ».

7. OUVERTURE

EXTERIEUR / INTERIEUR	NOMBRE	
TYPE	PORTE	FENETRE
Volet en bois / -	0	0
Volet en bois / Chassis vitrés en bois	0	0
Volet en bois / Chassis vitrés en acier	0	0
Volet en bois / Chassis vitrés en alu	0	0
Volet métallique / -	0	0
Volet métallique / Chassis vitrés en bois	0	0
Volet métallique / Chassis vitrés en acier	0	0
Volet métallique / Chassis vitrés en alu	0	0
Grille métallique/Chassis vités en bois	0	0
Grille métallique/Chassis vitrés en acier	0	0
Grille métallique/Chassis vitrés en alu	0	0

8. AUTRE BETON : linteau, chainage,...
 Quantité (m3)

Figure 78 : Interface relative à l'OF « ouverture ».

Il est à noter que nous présentons aussi l'émission relative aux autres ouvrages en béton, comme le linteau, le chaînage ou l'escalier. Nous indiquons par « autre béton » ces ouvrages. Les résultats obtenus sont en kg de gaz carbonique par mètre cube de béton.

Concernant le fonctionnement de l'habitat, les émissions à évaluer concernent :

- la cuisson ;
- l'éclairage ;
- l'utilisation des équipements résidentiels et
- le transport.

Les résultats dépendent de quelques paramètres (figure 79) :

FONCTIONNEMENT D'UN HABITAT : CUISSON - ECLAIRAGE - TRANSPORT - ALIMENTATION EQUIPTS RESIDENTIELS									
Taille du ménage	<input type="text" value="0"/>	Nombre de pièces à éclairer	<input type="text" value="0"/>						
Taux d'utilisation de combustible (en %) : CUISSON					Taux d'utilisation (en %) : SOURCE D ECLAIRAGE				
Bois de chauffe	<input type="text" value="0"/>	Bougie	<input type="text" value="0"/>						
Charbon de bois	<input type="text" value="0"/>	Pétrole lampant	<input type="text" value="0"/>						
Gaz	<input type="text" value="0"/>	Electricité avec ampoules économiques	<input type="text" value="0"/>						
Pétrole lampant	<input type="text" value="0"/>	Electricité avec lampes non économiques	<input type="text" value="0"/>						
Electricité	<input type="text" value="0"/>								
EQUIPEMENTS ELECTRIQUES UTILISES (en unité)									
Télévision	<input type="text" value="0"/>	Ordinateur PC	<input type="text" value="0"/>	Four électrique	<input type="text" value="0"/>	Lave-linge	<input type="text" value="0"/>		
Décodeur canal	<input type="text" value="0"/>	Onduleur	<input type="text" value="0"/>	Micro-onde	<input type="text" value="0"/>	Fer à repasser	<input type="text" value="0"/>		
HIFI	<input type="text" value="0"/>	Imprimante laser	<input type="text" value="0"/>	Friteuse	<input type="text" value="0"/>	Tondeuse	<input type="text" value="0"/>		
Magnétoscope	<input type="text" value="0"/>	Imprimante jet d	<input type="text" value="0"/>	Bouilloire	<input type="text" value="0"/>	Machine à coudre	<input type="text" value="0"/>		
Lecteur CD, DVD	<input type="text" value="0"/>	Réfrigérateur	<input type="text" value="0"/>	Cafetière	<input type="text" value="0"/>	Téléphone	<input type="text" value="0"/>		
Ordinateur portable	<input type="text" value="0"/>	Congélateur	<input type="text" value="0"/>	Ventilateur	<input type="text" value="0"/>	Téléphone sans fil	<input type="text" value="0"/>		
Nbr de voitures particulières à diesel	<input type="text" value="0"/>	Distance à parcourir/jour (km)	<input type="text" value="0"/>						
Nbr de voitures particulières à essence	<input type="text" value="0"/>	Distance à parcourir/jour (km)	<input type="text" value="0"/>						
Nbr pers utilisant transport en commun	<input type="text" value="0"/>	Distance à parcourir/jour (km)	<input type="text" value="0"/>	Calculer	Fermer	Précédent			

Figure 79 : Fenêtre présentant le fonctionnement d'un habitat.

III. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont :

- les émissions correspondant à chaque ouvrage fonctionnel et l'émission totale liée à l'enveloppe du bâtiment et
- les émissions liées au fonctionnement c'est dire les émissions relatives à :
 - la cuisson,
 - l'éclairage,
 - le transport,

- l'alimentation des équipements électroménagers et informatiques.

Nous avons quantifié aussi :

- le volume d'eau consommée (par ménage, par an) et
- la quantité de déchets produits (par ménage, par an) .

Les résultats sont présentés sous forme de tableau et de graphes (figure 80).

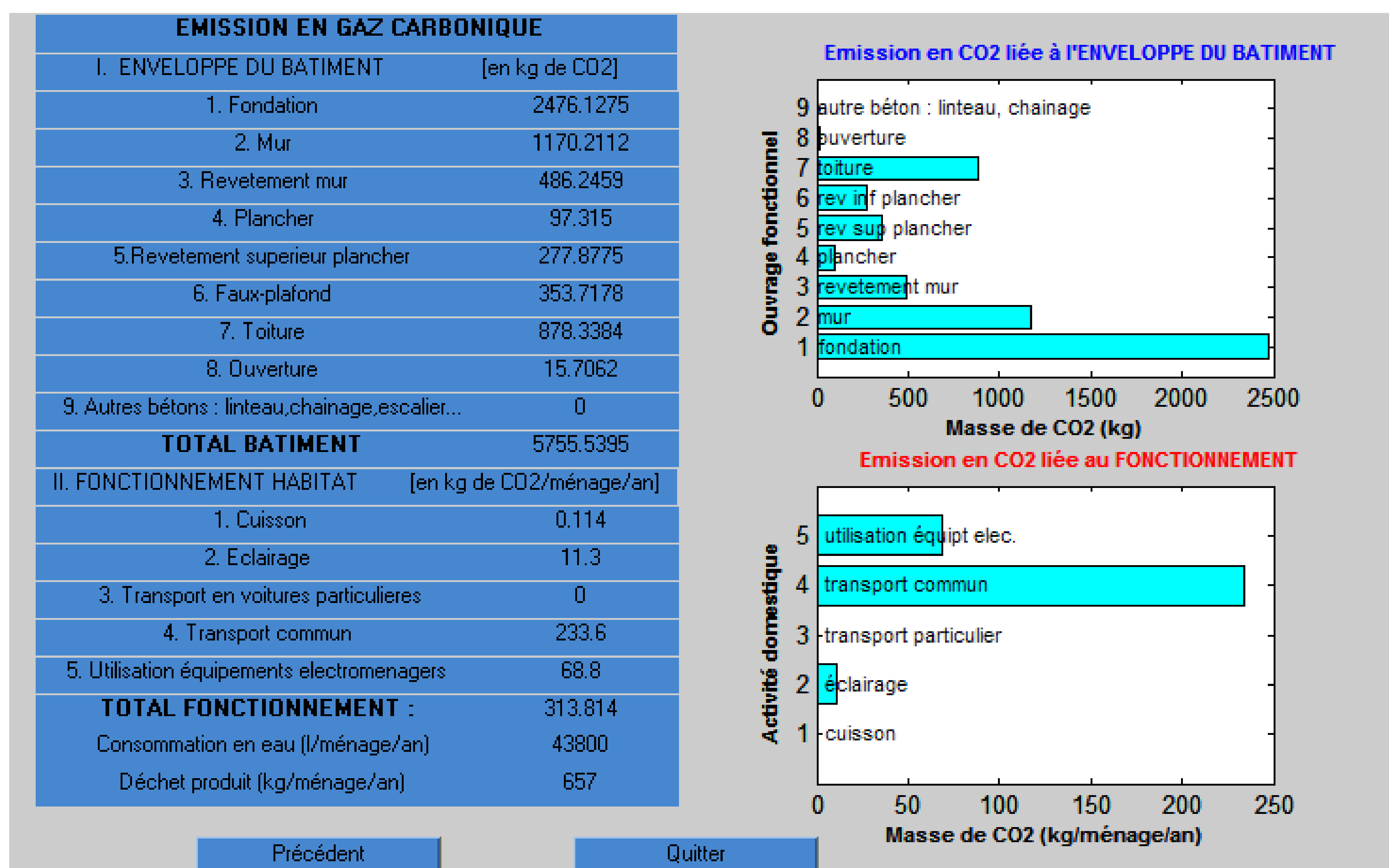


Figure 80 : Les résultats obtenus par ECO2H.

Cet outil de travail est une première étape concernant l'ACV de l'habitat à Madagascar. Comme tout autre outil, il y a des points faibles et des points forts.

III.1. Points faibles

Il y a des paramètres imposés et l'utilisateur n'est pas censé de modifier. Par exemple : distance entre le chantier et la décharge, les facteurs d'émission, etc.

Par manque de données statistiques, nous sommes contraints de prendre des données concernant le temps d'utilisation des équipements électriques.

Malgré ces points faibles, cet outil possède des points forts très importants.

III.2. Points forts

Par rapport aux études antérieures, les points forts de cette étude sont :

- l'adaptabilité des calculs et du logiciel développé ECO2H, aux réalités malgaches et aux pays en développement utilisant beaucoup d'énergies humaines pour la construction des maisons d'habitation ;
- la possibilité d'utilisation du logiciel pour plusieurs types de bâtiment d'habitation individuelle.
- une large gamme de combinaisons d'OF est possible,
- les résultats ne sont pas contraints de s'appliquer à l'UF, les quantités d'OF peuvent être variables,
- l'utilisateur pourra avoir une vision globale concernant l'émission en CO₂ d'un habitat : enveloppe du bâtiment et fonctionnement,
- on pourra obtenir les émissions correspondantes à chaque ouvrage fonctionnel. Pour cela, on pourra avoir l'OF le plus émissif en gaz carbonique.
- les émissions liées à chaque activité sont présentées.
- ECO2H est en outre un outil d'aide à la prise de décision car l'utilisateur pourra effectuer plusieurs scénarios.

Cette partie a regroupé tous les résultats. ECO2H sera alors un outil permettant d'effectuer d'innombrables scénarios, pour l'enveloppe du bâtiment ainsi que pour le fonctionnement de l'habitat. Une multitude de choix concernant les types de matériaux et les caractéristiques de l'habitat sont exposées.

Dans la suite, les impacts à évaluer pourront être diversifiés, des études approfondies seront en perspectives :

- élargissement et mise à jour des bases de données ainsi que
- validation du logiciel.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons évalué les rejets en CO₂ des habitats à Madagascar, par la mise en œuvre d'une méthode et d'un outil de calculs qui prennent en compte le cycle de vie d'un habitat.

Nous avons effectué en premier lieu l'ACV de l'enveloppe du bâtiment. En second lieu, une étude relative au fonctionnement de l'habitat est réalisée et enfin nous avons développé ECO2H, un outil d'évaluation de l'émission en gaz carbonique.

Dans la première partie, des analyses bibliographiques sont exposés. Il s'agit des théories portant sur l'Habitat Haute Environnementale, sur l'Analyse de Cycle de Vie, sur les études procédées en Inde et au Japon ainsi que sur BEES et EQUER, des outils d'évaluation des impacts environnementaux développés aux Etats-Unis et en France.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté dans le premier chapitre la méthodologie que nous avons adoptée.

Il s'agit de procéder en premier lieu à l'ACV de l'enveloppe du bâtiment ensuite à son fonctionnement.

Un ACV des matériaux de construction est nécessaire avant d'entamer celui du bâtiment.

Nous avons exposé les processus de fabrication des matériaux de construction.

Les facteurs d'émission correspondant à chaque matériau sont déterminés dans le deuxième chapitre de la deuxième partie. Celles-ci sont obtenues d'un côté, par des recherches bibliographiques et d'autre côté, par notre estimation à partir des mesures directes, des enquêtes menées sur terrain auprès des unités de fabrication locale. A titre d'exemple, le facteur d'émission de briques de terre cuite fabriquées artisanalement est de 27 kg de CO₂/tonne de produit. Pour le ciment, le facteur d'émission varie de 257 à 917 kg de CO₂/t de ciment [9] [36] [37].

Dans la [Partie II, Chapitre 3](#), nous avons effectué l'ACV de l'enveloppe du bâtiment. Ce dernier est décomposé en ouvrages fonctionnels .Il s'agit de la toiture, du mur, du plancher, du plafond, de la fondation ainsi que les ouvertures.

Des calculs par unité fonctionnelle permettant d'obtenir les émissions en gaz carbonique, , relatives aux OF, pendant son cycle de vie sont établis. La phase de

production des matériaux émet la majeure partie de l'émission. Les matériaux tels le ciment, l'acier, la chaux et l'aluminium sont les plus émissifs en CO₂. Les émissions proviennent principalement de l'utilisation d'énergie lors de leurs fabrications.

La [Partie II, Chapitre 4](#), a traité le fonctionnement de l'habitat. Les émissions en dioxyde carbone, relatives au fonctionnement sont dues aux dépenses énergétiques. Des postes d'activités sont considérés : la cuisson, l'éclairage, l'alimentation des équipements électroménagers et matériels informatiques et le transport. Des formules sont établies afin d'évaluer les émissions relatives à ces postes, la consommation en eau et la quantité de déchets domestiques produits.

L'émission en CO₂ correspondant au fonctionnement d'un habitat dépend principalement des caractéristiques du ménage : taille, nombre de pièces à éclairer, type de combustible utilisé pour la cuisson, type et nombre d'équipements électroménagers appartenant à l'habitat, etc.

La [Partie III](#) est consacrée aux résultats obtenus.

Pour les ouvrages fonctionnels, ce sont en général les ouvrages fonctionnels construits avec de l'acier et ciment qui sont les plus émissives en dioxyde de carbone. A titre d'exemple : toiture en tôle avec charpente métallique : 102,73 kg de CO₂/m² contre 8,78kg de CO₂/m² pour la toiture en tuile. De même, on a une émission en gaz carbonique de 48,63 kg/m² de plancher en dalle pleine contre 0,97 kg/m² de plancher en bois.

Concernant le fonctionnement de l'habitat, l'émission en gaz carbonique dépend de la source d'énergie utilisée aux activités domestiques.

Pour l'éclairage, le pétrole lampant est le plus émissif en gaz carbonique (97,46 kg de CO₂/pièce/an) suivi de l'électricité si le ménage utilise de l'ampoule de 100W (67,78 kg de CO₂/pièce/an). Si la bougie et l'électricité avec de l'ampoule économique de 18W est adoptée, il y a respectivement des émissions de 6,11 kg et 11,3 kg de CO₂/pièce/an.

Concernant la cuisson, l'utilisation d'énergie venant des combustibles fossiles qui engendre le plus de CO₂. Avec le pétrole lampant, on a 694,2 kg de CO₂/ménage/an. Les émissions relatives à l'utilisation de bois de chauffe et charbon de bois sont faibles (2,4 kg de CO₂/ménage/an et 0,19 kg de CO₂/ménage/an) compte tenu de notre hypothèse qu'il y a régénération des bois coupés.

L'émission en gaz carbonique relative au transport dépend principalement du mode transport adopté. Pour un ménage composé seulement d'un seul individu et si on prend une distance de 10km par jour à parcourir, il n'y a que 58,4 kg de CO₂ /an alors qu'en

adoptant le transport en commun, il y a une émission de 657kg de CO₂ /an avec une voiture particulière à diesel.

Pour la population malgache, un individu consomme 14600 litres d'eau par an et produit 219 kg de déchet par an.

Afin d'obtenir des résultats plus complets d'un habitat entier : son enveloppe ainsi que son fonctionnement, nous avons développé l'outil ECO2H. On peut utiliser ce logiciel pour plusieurs types de bâtiment d'habitation individuelle, une large gamme de combinaisons d'OF est possible, les résultats ne sont pas contraints de s'appliquer à l'UF, les quantités d'OF peuvent être variables. L'utilisateur pourra avoir alors une vision globale concernant l'émission en CO₂ d'un habitat c'est-à-dire en ce qui concerne l'enveloppe du bâtiment et son fonctionnement.

Notre travail est alors un outil d'aide à la décision concernant l'émission de gaz carbonique dans le domaine de la « construction » ainsi qu'à son fonctionnement.

Ce travail pourra être amélioré en évaluant d'autres impacts environnementaux. Un élargissement et mise à jour des bases de données sont aussi envisageables et la validation du logiciel sera un travail supplémentaire très utile.

ANNEXE 1: LES AUTRES IMPACTS (AUTRES QUE LE CO₂) DE L'ACV

I. Épuisement des réserves naturelles

Cet impact dépend d'une part de l'état des réserves et d'autre part de la quantité de matière utilisée. Si les réserves diminuent, ou si la consommation excède le taux de renouvellement de la ressource considérée, alors il y a menace d'épuisement. Ainsi trois paramètres doivent être pris en compte lorsque l'on s'intéresse à cet impact.

- **Quantité de toutes les matières consommées par le système** : plus cette quantité est grande, plus le système est pénalisé.
- **État des réserves** : il est important de distinguer les réserves et les ressources ; les **réserves** sont constituées par l'ensemble des sites connus et exploitables de matières alors que les **ressources** comprennent les réserves mais aussi d'autres gisements qui ne sont pas aujourd'hui exploitables économiquement ou technologiquement.
- **Renouvelabilité des ressources** : la distinction entre ressources renouvelables et non renouvelables n'est pas toujours facile à appréhender car elle dépend de l'échelle spatio-temporelle dans laquelle on se place. Toute ressource dépendant d'un stock fini et non reproductible à l'échelle humaine n'est pas renouvelable, combustibles fossiles, fissiles, matières premières à usage dispersif, engrais phosphatés par exemple. Toute ressource reproductible est dite renouvelable ; c'est le cas des ressources issues de la biomasse. Les énergies solaire, éolienne et hydraulique constituent un cas particulier ; on peut les assimiler, en effet, à des ressources renouvelables dans la mesure où les *gisements* solaire, éolien et hydraulique sont inépuisables dans un avenir prévisible.

II. Changement climatique

II.1. Effet de serre

L'équilibre radiatif naturel à la surface de la terre est déterminé pour une part importante par la présence de gaz qui ont la propriété d'intercepter les rayonnements émis par la Terre, puis de les renvoyer vers l'Univers. Au contact du

rayonnement reçu, la Terre s'échauffe et renvoie vers l'atmosphère cette énergie, sous forme de chaleur (l'infrarouge).

Pourtant une partie de ce rayonnement est intercepté, absorbé et re-émis par certains gaz particuliers, naturellement présents dans l'atmosphère. Ce qui engendre le réchauffement de la basse atmosphère.

Etant comparable à ce qui se passe dans une serre, ce phénomène a été baptisé « effet de serre » car, comme la vitre de la serre, l'atmosphère laisse entrer les rayonnements solaires mais elle emprisonne la chaleur grâce à ces gaz à effet de serre (GES).

Afin de pouvoir faire des comparaisons, on a la possibilité de calculer, pour chacun des gaz à effet de serre, un "pouvoir de réchauffement global" ou PRG, qui permet de savoir de combien on augmente l'effet de serre lorsque l'on émet un kg du gaz considéré.

On a aussi coutume de tout ramener au gaz carbonique, et de parler alors de PRG relatif. Par définition le PRG relatif du gaz carbonique vaut 1, et on regarde ce qu'il vaut pour les autres gaz (tableau 1).

Tableau 1 : PRG relatif par rapport à celui du CO₂, de chaque gaz à effet de serre

Gaz	Formule	PRG relatif / CO ₂
Gaz carbonique	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	21
Protoxyde d'azote	N ₂ O	310
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	6500 à 8700
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	140 à 11700
Hexafluorure de soufre	SF ₆	23900

Ce que signifie le tableau ci-dessus, c'est donc que si on met 1 kg de méthane dans l'atmosphère, on fait 21 fois plus d'effet de serre que si on met 1 kg de gaz carbonique.

Si on met 1 kg d'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère, on fait 23,9 fois plus d'effet de serre que si on met un kg de gaz carbonique : pour l'effet de serre un kg de ce gaz "vaut" 23,9 tonnes de CO₂.

II.2. Dégradation de la couche d'ozone

Une diminution de la quantité totale d'ozone stratosphérique entraîne une augmentation du rayonnement ultraviolet (UV) atteignant la surface terrestre, avec des effets sur la santé humaine, les écosystèmes terrestres et aquatiques, etc.

Tout composé chloré ou bromé peut avoir un effet sur la couche d'ozone s'il est volatil et assez stable pour traverser la stratosphère. De plus, d'autres substances telles le CH₄ et NO₂ interviennent dans la dégradation de l'ozone stratosphérique, mais leur contribution s'avère très délicate à évaluer actuellement à cause des phénomènes de synergie.

III. Toxicité et écotoxicité

Il s'agit là d'une notion générale qui englobe tout ce qui peut se révéler toxique pour l'environnement (comprenant l'homme, la faune, la flore et l'écosystème). Selon les toxicologues, l'évaluation de la toxicité d'une substance doit reposer à la fois sur des paramètres d'exposition et des paramètres d'effet.

Le facteur d'exposition dépend :

- de la quantité et de la concentration du rejet ;
- des caractéristiques du milieu dans lequel a lieu l'émission considérée ;
- de la dispersion de la substance (évaporation, dissolution, adsorption, etc.) ;
- de la dégradation biologique ou par photolyse de la substance dans le milieu ;
- des voies d'exposition par ingestion, respiratoire, cutanée.

Le facteur d'effet est basé sur :

- la toxicité aiguë ;
- la toxicité chronique ;
- la cancérogenèse et la mutagenèse ;
- la toxicité sur la reproduction et la tératogenèse ;
- les effets allergènes ;
- les irritations de la peau, des yeux.

En théorie, toute substance peut être toxique pour l'environnement car c'est la dose qui fait le poison. Toutefois, afin de faciliter la classification des substances susceptibles d'être toxiques, on pourrait s'appuyer sur des listes de substances considérées comme dangereuses, comme par exemple, les listes I et II des substances dangereuses de la CEE ou la liste de classification des substances dangereuses réalisée par l'EPA ou Environmental Protection Agency, Etats-Unis [53].

IV. Altérations physiques des écosystèmes

Il s'agit des grandes catastrophes écologiques comme la désertification, la dégradation des écosystèmes et des paysages, etc. Comme pour l'épuisement des réserves naturelles, on doit tenir compte :

- de la quantité d'espace consommée ;
- de la rareté des différentes catégories d'écosystèmes ;
- de la valeur écologique relative de l'écosystème.

ANNEXE 2 : LES DIFFERENTS TYPES DE MAISONS D'HABITATION A MADAGASCAR

Les bâtiments d'habitation sont les bâtiments ou parties de bâtiment abritant un ou plusieurs logements, et un logement ou habitation comprend, d'une part, des pièces principales destinées au séjour ou au sommeil, éventuellement des chambres isolées et, d'autre part, des pièces de service, telles que cuisines, salles d'eau, cabinets d'aisance, buanderies, débarras, séchoirs, ainsi que, le cas échéant, des dégagements et des dépendances

I. Classification de l'habitat selon l'architecture malgache

Plusieurs classifications sont valables en ce qui concerne l'habitat. La notre concernant les maisons d'habitation à Madagascar est déduite de celle de L'Institut National de la Statistique [1]. On constate que les matériaux, les techniques utilisés sont très diversifiés et les architectures sont très typiques d'une région à l'autre, c'est pourquoi pour cette étude, on classe l'habitat malgache en deux grandes catégories :

- les habitats traditionnels et ;
- les habitats modernes

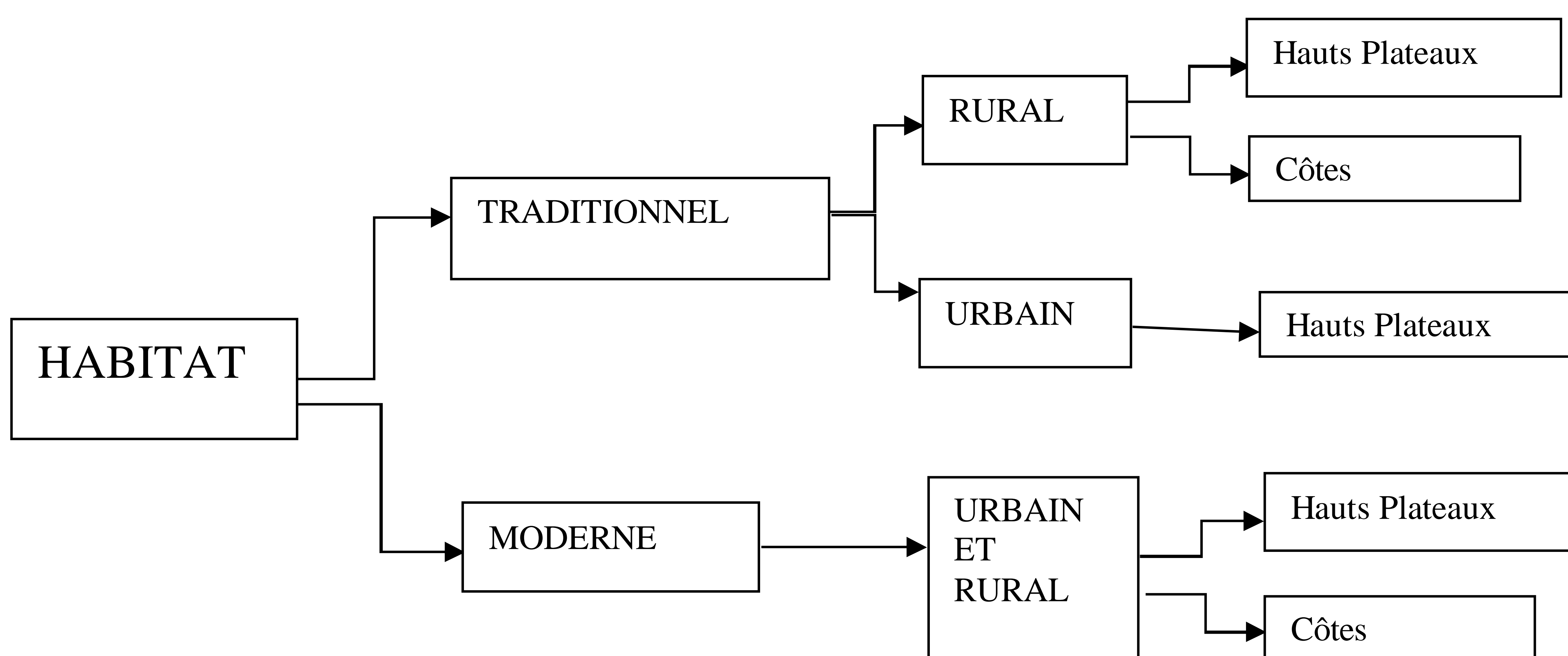


Figure 1 : Les différents types d'habitat.

I.1. Habitats Traditionnels

A Madagascar, la construction des maisons traditionnelles dépend principalement des matériaux et des végétations disponibles dans le milieu. Les maisons traditionnelles sont en général des maisons individuelles. Le style de construction est un peu ancien. C'est le type d'habitat le plus dominant à Madagascar. Selon « *Enquête auprès des ménages 2002* » effectuée par l'INSTAT en 2002 [54] ; 82,4% des ménages malgaches y vivent dont :

- 86,8% des ménages ruraux ;
- 82,2% des ménages des Centres Urbains Secondaires (CUS) et ;
- 48,2% des ménages des Grands Centres Urbains (GCU)

I.1.1. En milieu rural

Dans les Hauts Plateaux c'est-à-dire dans les provinces d'Antananarivo et de Fianarantsoa, la caractéristique typique est l'existence des murs et parois en terre et en briques [54]. Ce sont :

- le **torchis** ou **Ritso peta** (boue projetée) et qui est plaqué sur une cloison de roseaux. La latérite, mêlée à la paille de riz hachée constitue une pâte, qui est projetée des deux côtés de la cloison afin d'en assurer l'étanchéité ;

- le **pisé** s'agit de la boue malaxée qui est étendue par couches successives entrecoupées de périodes de séchage, afin de consolider l'ensemble ;

- l'**adobe** ou briques en terre crue, celles-ci sont **élaborées et moulées** à partir de pâte de terre. Les **briques séchées** sont utilisées comme des parpaings, et assemblées entre elles à l'aide d'un mortier de terre.

Pour ces maisons, les toits sont en chaume et les planchers en bois ou en terre et couverts de natte, fabriquées par des roseaux. En général, les maisons sont sans plafond.



Figure 2 : Maisons en terre crue



Figure 3 : Maisons en adobe

A Ambositra, on rencontre les maisons de bois des « **Zafimaniry** » avec leurs ouvertures richement sculptées [56].

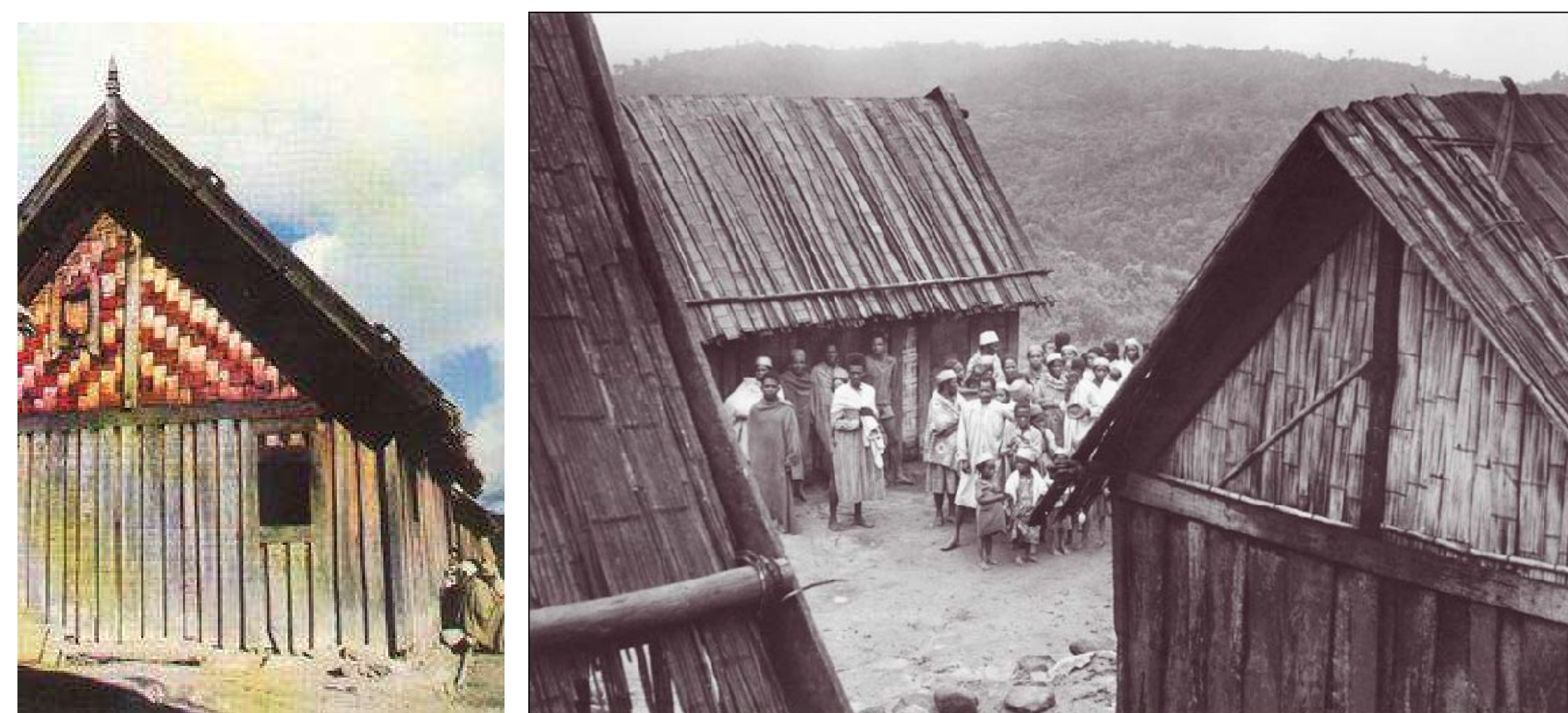


Figure 4: Maisons Zafimaniry

Dans les zones côtières

Un modèle d'habitation rectangulaire à pièce unique s'est répandu pratiquement dans les côtes de Madagascar, mais avec des variantes quant aux matériaux utilisés, lesquels proviennent de la végétation du lieu d'implantation. [55].

- Dans le Nord, on utilise souvent les nervures de raphia pour le plancher, les murs et les portes



Figure 5 : Maisons en raphia, dans le Nord de Madagascar

- Dans la région Tanala, le bambou, un matériau pratique, léger et souple est dans un premier temps aplani, écrasé ou fendu, afin d'obtenir des **planchettes**, mises à sécher avant leur utilisation. Les parois tressées sont faites de planchettes entrecroisées. Le toit est constitué de couches successives de bambous empilés et pour le plancher, on réservera à sa construction, les plus gros bambou [55].

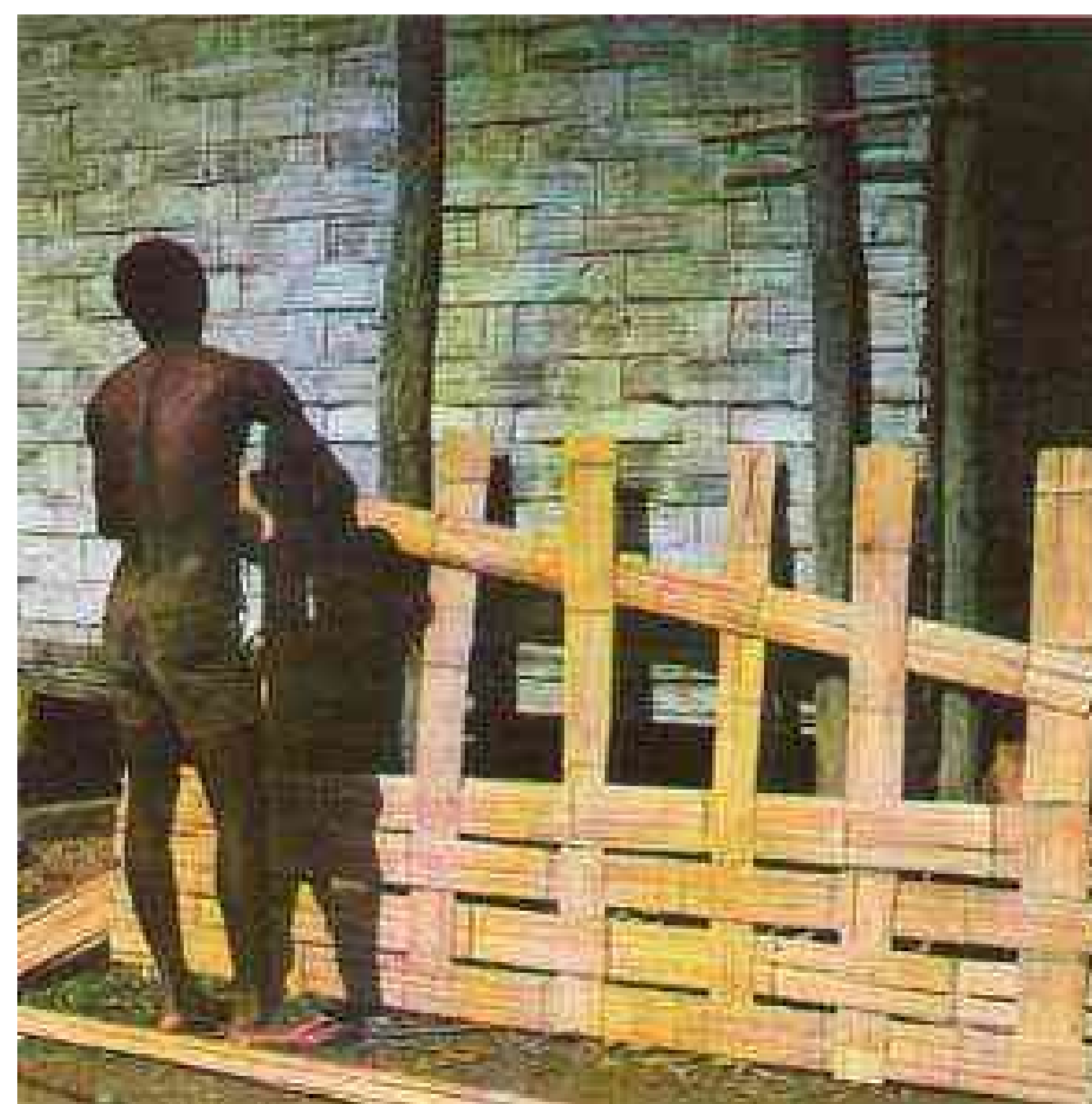


Figure 6 : Maison Tanala

- Dans l'Androy (au sud), le bois des épineux est tout naturellement le matériau communément utilisé. Les planches verticales des murs sont en **raotse** (bois léger et tendre). L'assemblage de l'habitation est réalisé sans aucun clou, sans aucune cheville, mais uniquement par emboîtements. Le toit est le plus souvent fait de chaume, quoique l'utilisation du bois ou raotse soit de plus en plus répandue et les portes sont en bois, à un ou deux battants s'ouvrent vers l'intérieur. Pour les Mahafaly du Sud-Ouest, ils privilégient le sisal en colmatant les interstices des parois avec de la bouse de zébu [55].



Figure 7 : Maisons en raotse

- Au contraire des pêcheurs vezo du Sud-Ouest qui érigent des cases légères de jonc (ou vondro) ligaturé par des roseaux. Ce type de maison est facile à construire. **Le jonc ou vondro**, abondant dans le milieu salé, à proximité des mangroves de la côte, est un matériau très utilisé car peu coûteux et très adapté au climat chaud et sec du Sud-Ouest malgache.



Figure 8 : maison en Vondro

- Dans la côte Est de l'île, on rencontre les maisons typiques appelées « trano falafa », ce sont des maisons végétales fabriquées à partir du *ravinala* ou l'arbre du voyageur. Cet arbre permet à lui tout seul de construire une maison traditionnelle. Du tronc, sont tirées des planches souples et légères ou *rapaka* avec lesquelles est fabriqué le plancher. Une fois séchées, les grosses tiges des feuilles ou *falafa* sont assemblées pour constituer les murs et les cloisons. La structure est ensuite recouverte de manière étanche par les larges feuilles, tissées entre elles une fois sèches, appelées *raty* [55].



Figure 9 : « Trano falafa »

- Dans la région du Lac Alaotra l'utilisation du **papyrus** subsiste encore, ailleurs il fut remplacé par les architectures en terre et surtout depuis quelques décennies, par le déferlement de la brique cuite.



Figure 10 : Maison en papyrus

I.1.2. En milieu urbain

Dans les Hauts Plateaux

L'architecture en bois fut longtemps le privilège de l'aristocratie comme en témoignent les cases royales et les différents palais de l'ancien Palais de la Reine d'Antananarivo. Ces vieilles demeures nobles étaient très belles avec leur véranda et leurs colonnes. C'est en **1831**, que fut introduite à Madagascar par **Jean Laborde**, la technique de cuisson des briques et des tuiles et à partir de 1868, on vulgarisa les matériaux non combustibles par crainte des incendies contre lesquels pratiquement rien n'était prévu. Dès lors se généralisa l'emploi de la tuile et de la brique non seulement dans la capitale mais aussi presque dans tous les centres urbains des Hautes Terres où elles concurrencèrent le pisé et le chaume. Ces maisons traditionnelles sont d'inspiration anglaise [57].



Figure 11 : Maisons traditionnelles en briques de terre cuite

I.2. Habitats Modernes

Les habitats modernes peuvent être individuels ou collectifs. On les rencontre surtout dans les Grands Centres Urbains et Centres Urbains Secondaires.

Le style de construction est moderne c'est-à-dire que les maisons sont en dur. Le dur est représenté de nos jours par le béton, le parpaing, la pierre, les briques, les tôles etc., et assortis éventuellement des toilettes modernes. Les maisons sont en général électrifiées et raccordées à l'eau potable.

Selon les enquêtes effectuées par l'INSTAT en 2002 [54], 16,4% des ménages malgaches y vivent dont :

- 12,3% des ménages ruraux ;
- 17% des ménages des Centres Urbains Secondaires (CUS) ;
- 47,7% des ménages des Grands Centres Urbains (GCU).

Les habitats modernes sont presque les mêmes dans les Hauts Plateaux que dans les zones côtières. La seule différence c'est que pour les murs, l'utilisation des briques en terre cuite est favorisée dans les Hautes Terres alors que du béton dans les côtes à cause de l'inexistence de l'argile.



Figure 12 : Maison moderne

On constate donc que des maisons en dur faits avec de la brique ou de la pierre caractérisent le milieu urbain tandis qu'en milieu rural, des matériaux plus légers pour des constructions plus précaires sont plus courantes.

II. Caractéristiques de l'habitat

II.1. Superficie moyenne

Les maisons individuelles sont le type de logement le plus courant. En moyenne, un ménage malgache occupe un logement de 32 mètres carrés [54].

II.2. Matériaux de construction utilisés

Le type de matériaux utilisés indique le degré de confort que peut procurer le logement. Il permet d'apprécier son luxe et le coût de sa possession. L'enquête effectuée par l'INSTAT a retenu les matériaux facilement observables et qui permettent de différencier les ménages malgaches. Ces matériaux sont repérés sur les murs et parois, ou sur le sol ou au plafond ou au plancher [54].

II.2.1. Pour les murs et parois

La terre battue, les écorces et les briques sont les plus utilisées par les ménages malgaches pour construire les parois de leurs habitations avec des taux respectifs de 31,4% ; 30%.et 24,7% Les tôles ondulées et les bois sont de 2,7% et 7,3% [1]. Cependant la durée de vie d'une maison avec parois en écorce ne dépasse pas les 5 ans car les toits sont en général en matières végétales et il n'y a pas de fondations. Ces maisons ne résistent pas aux cyclones et aux dépressions tropicales.

Les maisons avec les murs en terre battue peuvent durer plusieurs années. La terre peut être argileuse ou de la latérite. La terre peut être utilisée directement ou transformée en briques crues. Cependant, la construction avec ce type de matériau est limitée. La compatibilité entre les matériaux étant essentielle, par exemple tout enduit de ciment sur un mur en pisé conduirait à des désordres : blocage d'humidité dans le mur, décollage d'enduit. A Madagascar, la construction de ce type de mur est encore très traditionnelle.

II.2.2. Pour le plancher

On utilise les matériaux suivants pour construire le plancher :

- la terre battue ;
- le bois ;
- les briques et pierres et
- le ciment / béton.

Pour le plancher, la terre battue (42,8% des maisons), le bois (33,8% des maisons) et le ciment (16,5% des maisons) sont les matériaux les plus utilisés. Mais d'autres maisons ont pour plancher en briques (0,3%) ou d'autres matériaux (6,6%) [54].

. En général, les planchers en terre battue sont rencontrés dans les régions rurales, les paysans mettent sur le sol des nattes fabriquées à l'aide du roseau. Le degré d'humidité venant du ce type de plancher n'est vérifié car les gens n'utilisent pas d'isolant .Les planchers en ciment sont ceux construits avec du béton c'est-à-dire de la dalle pleine ou avec des corps creux.

II.2.3. Pour le plafond

Pour le plafond, on a :

- le bois et plus précisément les voliges (13%) ;
- l'écorce, feuille et tige (9,3%) adaptées pour les maisons dans les zones côtières ;
- la terre battue et torchis (13,6%), dans les Hauts-Plateaux ;
- ciment, parpaing, béton (1,1%), pour les maisons modernes ;
- la natte (0,8%) dans les maisons rurales ;
- et entre autres la majorité des maisons sont sans plafond, c'est-à-dire 60% des maisons.

II.2.4. Pour le toit

Presque les trois quarts des toitures sont confectionnés à partir des matières végétales disponibles localement. Au niveau national, le chaume (43 %) est utilisé par la majorité

de population, suivi par les tiges, écorces et feuilles (29 %). Dans les régions rurales des Hauts-Plateaux, de très nombreuses maisons sont recouvertes de chaume. La paille est facile à trouver localement. De même pour les autres couvertures végétales des zones côtières. Mais, dans les régions urbaines avec l'arrivée des autres types de couvertures, la paille a peu à peu été remplacée par d'autres couvertures. Les toitures en tôle (21 %) ne sont pas négligeables. Les couvertures en tuiles d'argiles cuites se rencontrent principalement dans les régions des Hauts- Plateaux (7,3 % dans la province d'Antananarivo et 2,1 % dans la province de Fianarantsoa) où l'on trouve des terres argileuses. Dans les Grands Centres Urbains (GCU), ces chiffres deviennent plus importants (15,8 % à Antananarivo, 17,7 % à Antsirabe et 12,6 % à Fianarantsoa) [54]. Celles en béton sont en petite proportion par rapport à l'ensemble malgré la longue durée de vie des toitures en béton. Ce fait est dû au prix élevé de ce dernier par rapport à d'autres matériaux. Les autres couvertures comme les bardeaux en bois, ceux en feutres et ardoises sont très rares.

II.2.5.Fondations

Le choix des matériaux est déterminé par les caractéristiques du terrain : nature des roches, résistance mécanique, niveau d'assiette du sol, points singuliers (points durs, poches, excavations, ...), niveau de la nappe phréatique. A Madagascar, les gens utilisent des briques, des moellons ou du béton pour construire leurs maisons d'habitation.

ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES DES MENAGES MALGACHES

Le ménage malgache est composé en moyenne de 4,9 personnes. Les maisons individuelles sont le type de logement le plus courant. En moyenne, un ménage malgache occupe un logement de 32 mètres carrés. Cependant, les maisons individuelles sont, en général, plus exiguës (28 mètres carrés) que les villas de type moderne (72 mètres carrés) [1].

I. Dépense énergétique des ménages

Au niveau d'un ménage, la consommation d'énergie est due :

- à la cuisson ;
- à l'éclairage ;
- à l'utilisation des appareils électroménagers.

I.1. Type de combustible

A Madagascar, les bois de chauffe représentent la source d'énergie la plus utilisée par les ménages et certaines industries agro-alimentaires. La consommation du charbon est plutôt plus importante en milieu urbain. 95% des ménages utilisent quotidiennement des combustibles ligneux dans la Capitale Antananarivo dont 76% sont des consommateurs de charbon de bois.

Les combustibles ligneux constituent la principale source d'énergie à Madagascar. La consommation des ménages en énergie est principalement sous forme de bois énergie (bois de feu et charbon de bois) et ils les utilisent surtout pour la cuisson. Si la plupart des ménages ruraux utilisent les bois de feu, les ménages urbains se servent généralement des charbons de bois.

C'est le bois ramassé qui surtout est alors le plus utilisé par les malgaches pour préparer la cuisine et se réchauffer. 76,1% des ménages y recourent, 17,1% utilisent le charbon et 5,8% achètent du bois. Seulement 0,42% des ménages utilisent du gaz et 0,18% du pétrole. L'usage du charbon est le plus marqué dans la province d'Antananarivo avec un taux d'utilisation de 31,6% contre 14,4% à Mahajanga et 8,1% à Toamasina [1]. Le tableau ci après représente réparti les ménages (en pourcentage) par types de combustibles.

Tableau 2: Répartition des ménages (en pourcentage) par types de combustibles

	1997	2010	2020	2030
Milieu urbain				
Bois de feu	41,8%	30%	20%	5%
Charbon	54,3%	50%	40%	20%
Pétrole lampant	0,7%	8%	20%	30%
Gaz	2,3%	10%	15%	35%
Electricité	0,8%	2%	5%	10%
Milieu rural				
Bois de feu	94,2%	70%	50%	30%
Charbon	5,1%	20%	30%	40%
Pétrole lampant	0,3%	5%	10%	15%
Gaz	0,3%	4%	8%	12%
Electricité	0,1%	1%	2%	3%

Le pétrole lampant est la seule source de lumière pour la plupart des ménages vivant en dessous du seuil de pauvreté. L'usage de l'électricité ou de la bougie ne se rencontre surtout qu'en milieu urbain.

Tableau 3 : Consommation de bois d'énergie (bois de feu et charbon de bois) en m³ EBR - Equivalent Bois Rond - par habitant à Madagascar.

Année	Population rurale	Population urbaine	Moyenne population
1980	1,77	0,47	0,86
2000	1,59	0,47	0,71

I.3. Taux de possession de certains biens, par milieu (en %)**Tableau 4 : Taux de possession de certains biens, par milieu (en %)**

	GCU	CUS	Rural	Ensemble
Maisons	48,7	71,9	86	80,1
Chaises	92,4	63,4	48,5	55,2
Tables	93,9	68,7	54,7	60,8
Lits	96,1	77,9	71	74,6
Natte	23,3	69,2	80	72,4
Autres meubles	52	25,3	15,7	20,9
Lampe à pétrole artisanale	17,2	67,1	85,7	75,9
Lampe à pétrole moderne	0,9	3,6	4,1	3,7
Machines à coudre	30,8	16,7	12,4	14,9
Cuisinière à gaz	13,7	1,9	0,8	2,3
Réfrigérateur	13,7	2,3	1	2,6
Congélateur	2,3	2	0,4	0,8
Radios	29,6	35,7	35,9	35,2
Radio-cassette	51,9	31,6	23,2	27,4
Chaînes HIFI	18,8	5,9	1,5	3,9
Appareils TV	66,2	19,6	4,9	13,5
Voitures privées	4,5	1,5	0,6	1,1
Cyclomoteurs/véломoteurs	2,1	0,8	0,4	0,6
Bicyclette	22,1	21,3	16,4	17,7
Appareil photo	10,3	2,4	1,6	2,7
Instruments de musique	5,6	0,6	0,6	1,1
Téléphones fixes	3,3	0,3	0	0,4
Téléphones portables	25,2	2,9	1	3,9
Ordinateurs	3,9	0,2	0,1	0,5
Vidéo	9,7	4,1	1,2	2,5
Caméra	1,0	0,2	0,1	0,2

Sept regroupements de biens sont considérés par l'INSTAT [1] :

- les biens immobiliers (terrains, plage, lac, maison)

- les meubles (tables, chaises, lits et autres meubles)
- les appareils électroménagers (cuisinière à gaz, réfrigérateur et congélateur)
- les appareils audiovisuels (radio, radiocassette, chaîne HIFI, appareil TV, téléphone, appareil photo, instrument de musique, ordinateur, vidéo et caméra)
- les voitures
- les cyclomoteurs et vélomoteurs et,
- les équipements agricoles (bêche, charrette, charrue, sarcleuses, herse, motoculteur et brouette).

En moyenne dans un ménage, la production de froid (réfrigérateur-congélateur, etc.) consomme environ 1100 kWh par an, l'audiovisuel (téléviseur, magnétoscope, antenne parabolique, etc.) 600 kWh/an, l'éclairage 500 kWh/an et le sèche-linge 400 kWh/an. Le lave-vaisselle et le lave-linge consomment chacun environ 300 kWh/an (pour fixer les idées, 500 kWh est l'énergie contenue dans 40 litres d'essence).

Tableau 5 : Consommation standard en électricité d'un ménage des appareils électroménagers et informatiques [9].

Appareil	Consommation annuelle moyenne (kWh)
Réfrigérateur	365
Congélateur	615
Lave-linge	250
Lave vaisselle	265
Sèche-linge	430
Télévision	160
Magnétoscope	122
Décodeur canal	96
Démodulateur d'antenne parabolique	80
HIFI	35
Répondeur téléphonique	25
Téléphone répondeur	45
Téléphone sans fil	23

Aspirateur	18
Fer à repasser	40
Four de cuisine	224
Cuisinière	457
Plaques-fonte	198
Plaques vitro	281
Micro-ondes	60
Mini-four	99
Cafetière	31
Bouilloire	58
Friteuse	11
Grille pain	14
Cuiseur à vapeur	15

Tableau 6 : Consommation standard en électricité d'un ménage, obtenue par estimation des différents appareils électroménagers et informatiques.

Appareil	Puissance (W)	Durée d'utilisation (heure/semaine)	Consommation annuelle moyenne (kWh)
Ordinateur PC	150	12	94
Ordinateur portable	45	12	28
Imprimante jet d'encre	30	1	2
Imprimante laser	850	1	44
Onduleur	10	12	6
Ventilateur	35	3	6
Machine à coudre	100	4	21
Tondeuse	15	1	1

I.4. Approvisionnement en potable

L'accès des ménages à l'eau potable se limite à 23,6% en 1999 tandis que le pourcentage de ménages branchés au réseau de distribution de l'électricité n'est que 15,20%, avec une grande différence entre milieu urbain et milieu rural.

Tableau 7 : Approvisionnement en potable

Secteur social	Ensemble	Urbain	Rural
Accès à l'eau potable	23,60%	70,40%	10,40%
Ménage électrifié	15,20%	47,70%	5,20%

Source : *Enquête auprès des ménages 2004*. INSTAT/DSM/EPM 2004 [1].

I.5. Mode d'évacuation des ordures ménagères

En effet, la majorité des foyers malgaches se chargent eux-mêmes d'éliminer les ordures ménagères. Le ramassage d'ordures n'existe pas à la campagne. Les déchets sont brûlés ou réutilisés comme engrais pour la culture [1].

ANNEXE 4 : PROCESSUS DE FABRICATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

I. Les industries autour de la construction

Avec l'industrie textile, celle de la construction (Bâtiments et Travaux et Publics B.T.P.) est parmi les plus dynamiques actuellement à Madagascar. Grâce à sa bonne tenue, les industries autour de la construction sont en plein essor.

Malgré ce net développement du secteur, la production locale est loin de satisfaire les besoins, en qualité et en quantité et les matériaux locaux sont de plus en plus concurrencés par les matériaux importés. En outre Madagascar ne dispose pas d'industries lourdes (sidérurgiques ou métallurgiques). Les matériaux métalliques ferreux sont donc importés. Il en est de même de la quasi-totalité des produits d'équipement, des vitrages et carrelages [54].

I. 1. L'industrie du bois

Des entreprises formelles et informelles formé de micro-entreprises opèrent ensemble dans l'industrie du bois. Leurs activités se limitent aux opérations de coupe, transport, et débitage en madriers, planches, bois carrés, ... [54].

I.2. Les industries métalliques

Les industries métalliques locales sont modestes et se limitent aux transformations des produits importés et profilage : profilage de tôles, fabrication de clous, ouvrages métalliques.

La production locale de tôles se limite au profilage.

I.3. Fabrication de ciment

Il y a trois types de ciment :

- entièrement fabriqués à Madagascar,
- importés et
- semi-importés c'est-à-dire qu'une partie des étapes de fabrication est effectuée dans les pays producteurs et qu'une autre partie est réalisée à Madagascar .

Concernant le ciment, Madagascar produit localement 15 000 tonnes en 2007 [54]. Ensuite il y a les ciments importés venant de Chine, Afrique du Sud, de l'Égypte et de la Turquie et enfin les ciments semi-importés venant de Chine et des Philippines (figure 13).

Le ciment semi-importé de Philippines nécessite de l'emballage à Madagascar. Pour celui venant de Chine, le clinker est broyé et emballé à Madagascar par la Société MALOCI (Antananarivo).

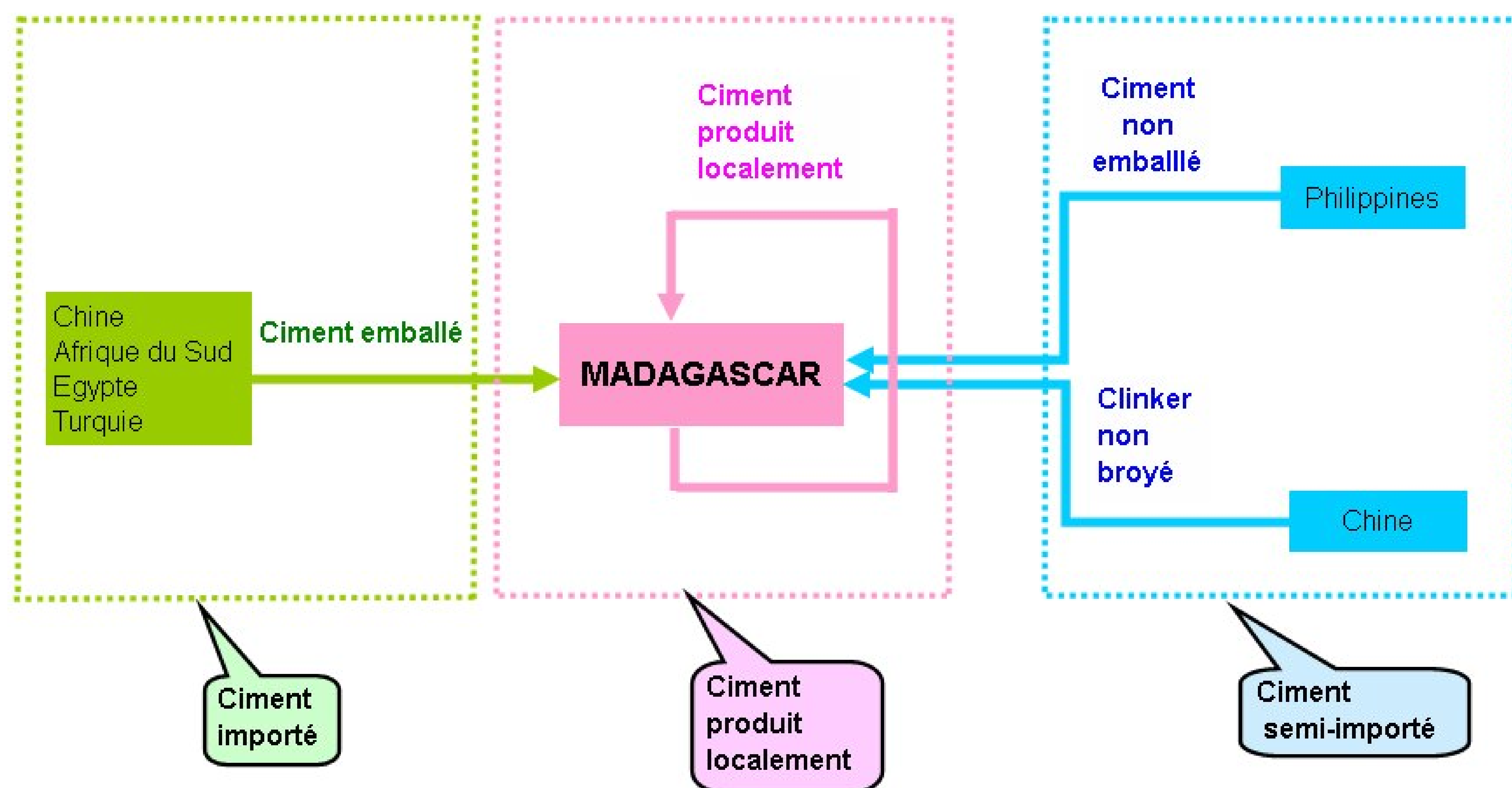


Figure 13 : les différentes de sources de ciment utilisé à Madagascar.

I.4. Fabrication de chaux

Le calcaire ou pierre à chaux est très abondant à Madagascar ; il peut être très pur ou dolomitique :

- Antseranana : réserve inépuisable peu dolomitique autour de la baie de Diego
- Mahajanga : gisements dolomitiques sauf à Marohogo et à Amboanio ;
- Toliara : réserve inépuisable aux environs de Toliara ;
- Antsirabe : un gros gisement fortement dolomitique à Sahatany et Ambatofinandrahana et un bon gisement à Ibity exploité par CHAUMAD et HOLCIM ;
- Ambatondrazaka : réserve constituée par des petits gisements dispersés exploités par le groupe Chaux-Pouzzolane.

I.5. Fabrication des produits à base de pierre

I.5.1. Moellons et graviers

Les chiffres indiqués sont ceux du secteur formel. Aucune estimation n'a pu être avancée sur la production des productions artisanales et familiales.

I.5.2. Produits moulés

Actuellement, on assiste à une augmentation des entreprises qui fabriquent des produits moulés de ciment (hourdis, agglomérés), de plâtre ou de pierre.

I.6. Fabrication de briques, tuiles et d'agglomérés de terre

La part du secteur informel est largement prédominante bien que non quantifiée. Celui-ci est formé d'unités artisanales qui perpétuent les techniques de fabrication archaïques. Pourtant, la majorité des matériaux utilisés provient de ce dernier (à base d'argile cuite). Concernant la fabrication artisanale, les données relatives aux techniques de production, aux quantités de matières premières et les sources d'énergie utilisées sont obtenues auprès des artisans. Nous avons visité les quatre principaux sites producteurs de briques de terre cuite

La fabrication industrielle de produits de terre cuite est inexistante à Madagascar. La plupart des matériaux en terre cuite sont produits artisanalement. Ce secteur est dominé par le secteur informel (petite entreprise familiale composée de 3 ou 4 artisans, pas de mécanisation, exploitation situant dans les rizières).

A Antananarivo, il n'y a que **quelques** usines de production semi-industrielle.

II. Processus de fabrication de matériaux de construction

Dans cette annexe, nous exposerons les matériaux de construction les plus courants.

II. 1. Béton

Le béton est employé de nos jours pour réaliser tout type d'ouvrage de bâtiment : fondation, mur, plancher, toiture. Il peut être mis en œuvre :

- in situ, à partir de béton préparé sur place, ou bien en usine et acheminé sur le chantier en camion toupies (béton prêt à l'emploi) ;
- ou en usine pour réaliser des ouvrages ou des parties d'ouvrages préfabriqués.

II. 1.1. Classification du béton

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

- Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2300kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.
- Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.
- Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de 500kg/m^3 . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés: dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

II. 1.1.1. Le béton armé

Grâce à une bonne adhérence et à un coefficient de dilatation quasi identique, une armature en acier permet de compenser la faible résistance du béton aux efforts de compression, de traction, de flexion, de torsion ou de cisaillement.

II. 1.1.2. Les bétons spéciaux

Les bétons à haute résistance permettent de construire des ouvrages en béton précontraint plus légers. Ils peuvent atteindre des résistances de 140MPa , soit trois à quatre fois celles des bétons classiques

Les bétons de fibres (fibres d'acier, réfractaires, de fonte, de verre, fibres de polymères, etc.) ont une résistance à la traction améliorée.

Des bétons légers (masse volumique inférieure à 2t/m^3) sont obtenus en remplaçant partiellement les granulats courants par des matériaux légers tels que : liège, copeaux ou granulats de bois ou de chanvre, scories, vermiculite, pierre ponce, perlite, ardoise ou argile, tous trois expansés, brique pilée ou laitier de haut fourneau concassé, billes de polystyrène, etc.

II.1.2. Dosage du béton

Le dosage du béton est monté dans le suivant, ceci varie en fonction de l'ouvrage à construire (tableau 8).

Tableau 8: Dosage pour 1m³ de béton (ou 1m³ de mortier)

	Ciment (kg)	Sable (m3)	Graviers (m3)	Eau (m3)	Fer (kg)
Béton pour fondation	300	0,52	0,65	0,115	0
Béton non armé pour tous usages	350	0,4	0,8	0,150	0
Béton armé : poutres, poteaux	350	0,4	0,8	0,175	variable
Mortier pour enduits	350	1,05	0	0,200	0
Mortier pour chape	450	1	0	0,115	0
Mortier pour hourdage	300	1,05	0	0,115	0
Mortier pour hourdage	250	1	0	0,115	0

II.1.3. Les constituants du béton

II.1.3.1. Ciment

La teneur en ciment dépend de la résistance souhaitée. Pour les bétons de remplissage, peu sollicités, le dosage est de 150 kg /m³. Pour toutes les pièces constituant la structure des bâtiments, en béton armé ou précontraints, le béton contient généralement 350 kg/m³ de ciment.

II.1.3.1.1. Fabrication de ciment courant ou ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru ;
- cuisson ;
- broyage et conditionnement.

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment :

- fabrication par voie humide, la plus ancienne ;
- fabrication par voie semi-humide ;
- fabrication par voie sèche (figure 14), la plus utilisée actuellement car c'est un procédé économe en énergie;
- fabrication par voie semi-sèche.

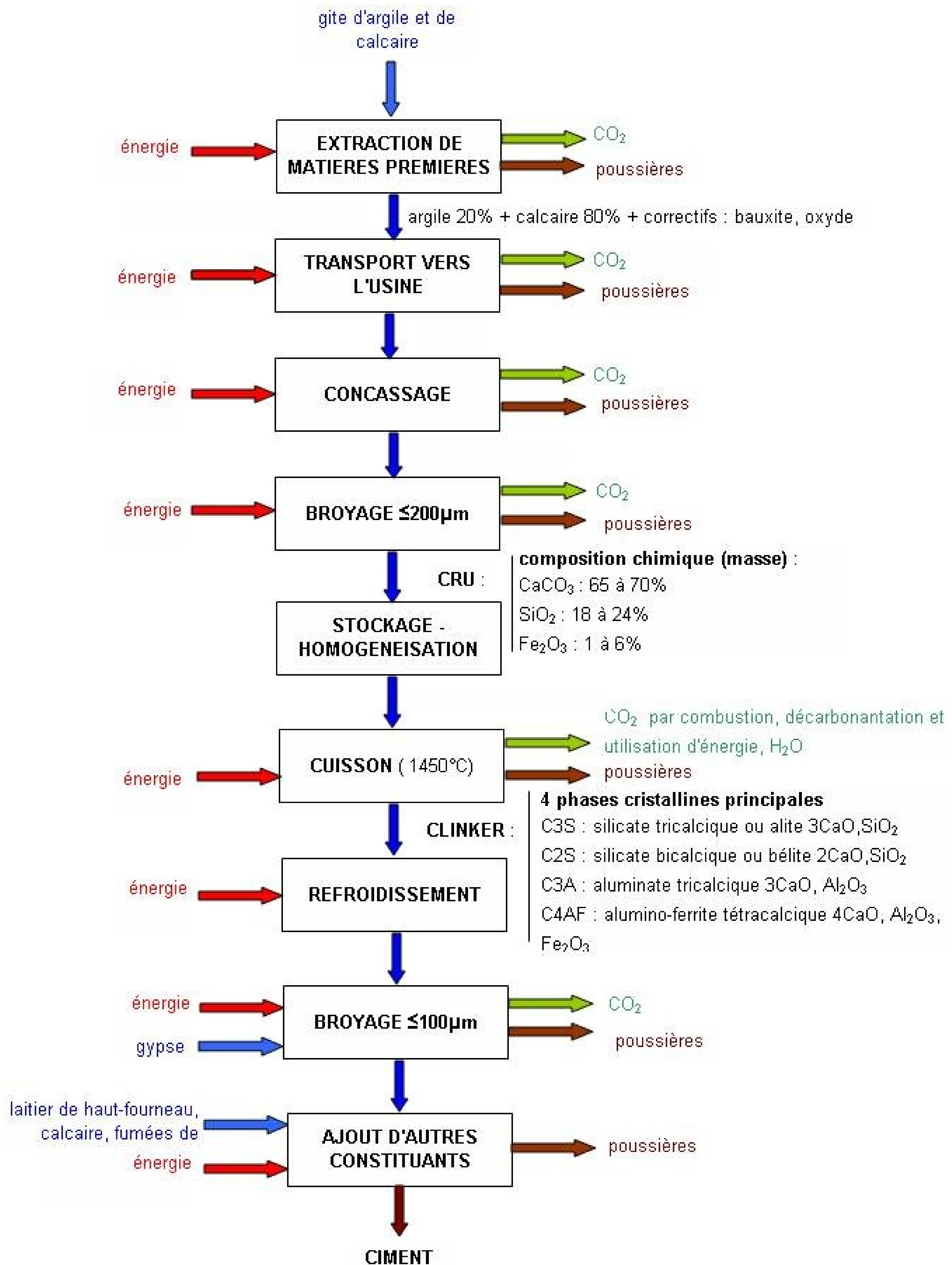


Figure 14 : Flow-sheet de la fabrication de ciment par voie sèche.

Il est à remarquer que quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a le même clinker.

II.1.3.2. Granulats

II.1.3.2. 1. Production de granulats

Les granulats utilisés sont des graviers issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières.

Le gisement des carrières sont de façon à peu près toujours identique. La [figure 15](#) illustre le processus de production de granulats.

Forage : Percement de trous verticaux d'environ 10 cm de diamètre dans la roche selon un écartement (la "maille") bien déterminé.

Minage : Les trous de forage sont remplis d'explosifs. L'explosion successive des trous fragmente grossièrement (<800 mm) la roche et l'abat.

Reprise : Une pelle hydraulique ou un chargeur à pneu récupère la roche abattue et la charge dans un engin de transport.

Roulage : Un engin, plus rarement un convoyeur à bande, achemine les matériaux grossiers jusqu'à l'installation de traitement.

Scalpage : Optionnel, les matériaux avancent sur des rails écartés d'environ 200 mm. Les plus petits passent à travers. Les matériaux fins sont souvent impropres aux usages nobles des granulats, le scalpage les élimine.

Concassage primaire : Les matériaux grossiers sont cassés par une action mécanique directe, par exemple la fermeture de deux mâchoires verticales ou la projection violente sur un écran métallique. On cherche généralement à obtenir des matériaux allant de 0 à 250 mm.

Criblage primaire : à l'issue du concassage primaire les matériaux sont envoyés par des convoyeurs à bande sur une série de grilles vibrantes. La taille des trous dans les grilles permet de trier les matériaux. Ceux suffisamment petits pour être commercialisés sont mis en stock, les autres partent vers le broyage secondaire.

Mise en pré-stock : Optionnel, la mise en stock et la reprise des matériaux destinés à un traitement ultérieur permet de donner une souplesse de fonctionnement à l'usine. La partie primaire peut ainsi fonctionner séparément du reste de l'installation.

Broyage secondaire : les matériaux trop gros sont cassés par une action mécanique souvent indirecte utilisant l'attrition. Les broyeurs coniques verticaux giratoires sont courants. On cherche alors à réduire la taille des plus gros à 50 mm.

Criblage secondaire : Même principe que précédemment, mais les matériaux trop gros repassent dans le broyeur secondaire, les autres partent soit vers le broyage tertiaire, soit vers les stocks commercialisables.

Broyage tertiaire : on cherche à obtenir des matériaux inférieurs à 14 mm de diamètre.

Criblage tertiaire : Plusieurs cribles en séries finissent de séparer les granulats en "coupures" de plus en plus fines.

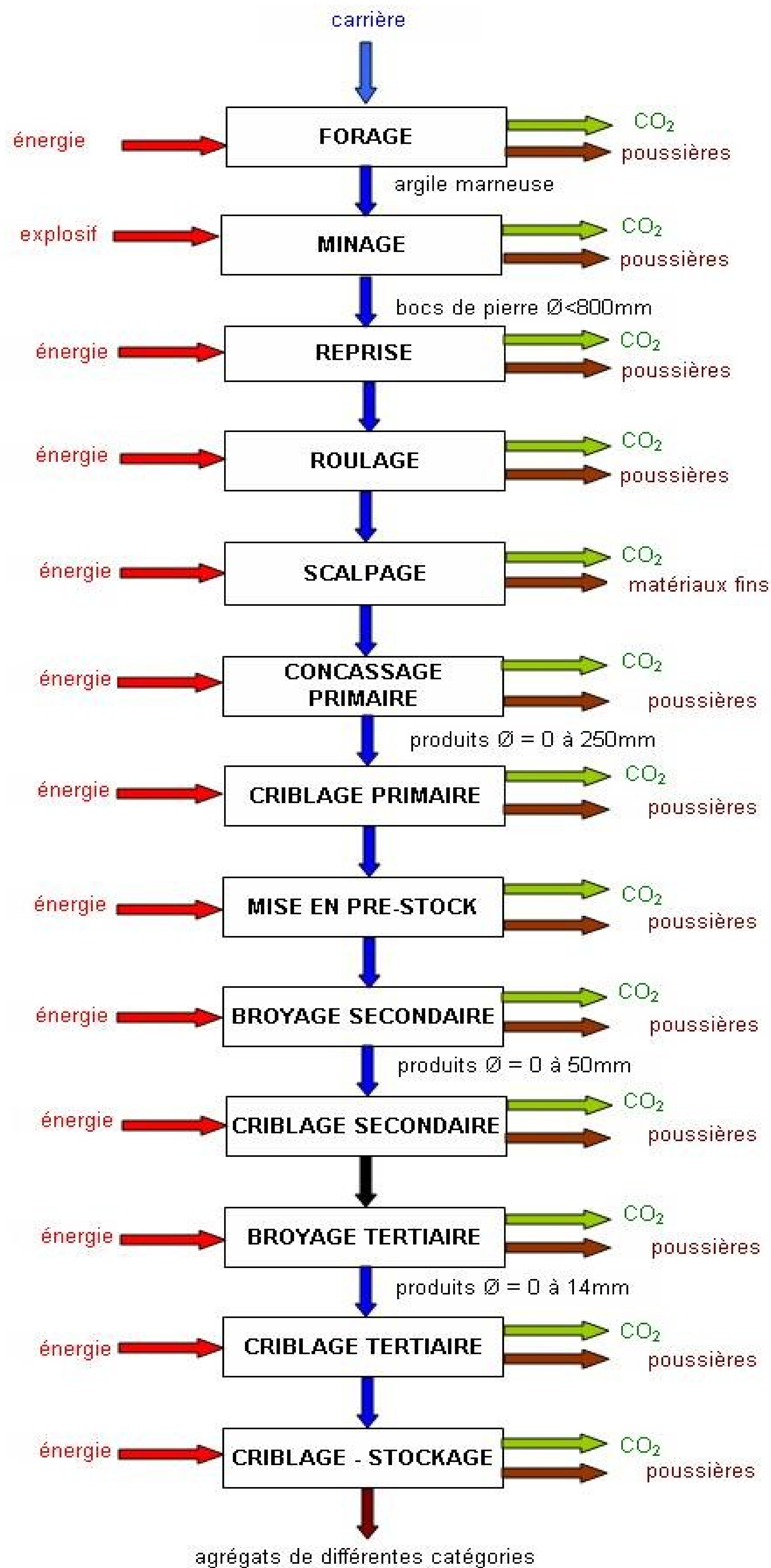


Figure 15 : Flow sheet de la production de granulats

II.1.3.3. Adjuvants

Les adjuvants ajoutent au mortier ou au béton de base des qualités adaptées à chaque type d'utilisation : d'accélérateur ou retardateur de prise, etc.

II.1.4. Les blocs de béton

II.1.4.1. Principe de fabrication des blocs de béton

Les blocs de béton sont obtenus par pression ou bien par vibration de mélange: ciment + sable + eau et granulats courants ou bien granulats légers. Pour obtenir les blocs de béton avec la dimension la plus précise, les moules utilisés doivent avoir une stabilité suffisante donc ils sont métalliques. Après démoulage, les produits (blocs de béton) doivent être stockés dans un endroit favorable (humidité de l'ordre de 95 %), où ils peuvent prendre le durcissement pour ensuite être transporter à la construction. En général, la fabrication des blocs de béton se compose de cinq opérations principales comme indiquer sur la [figure 16](#) ci-après.

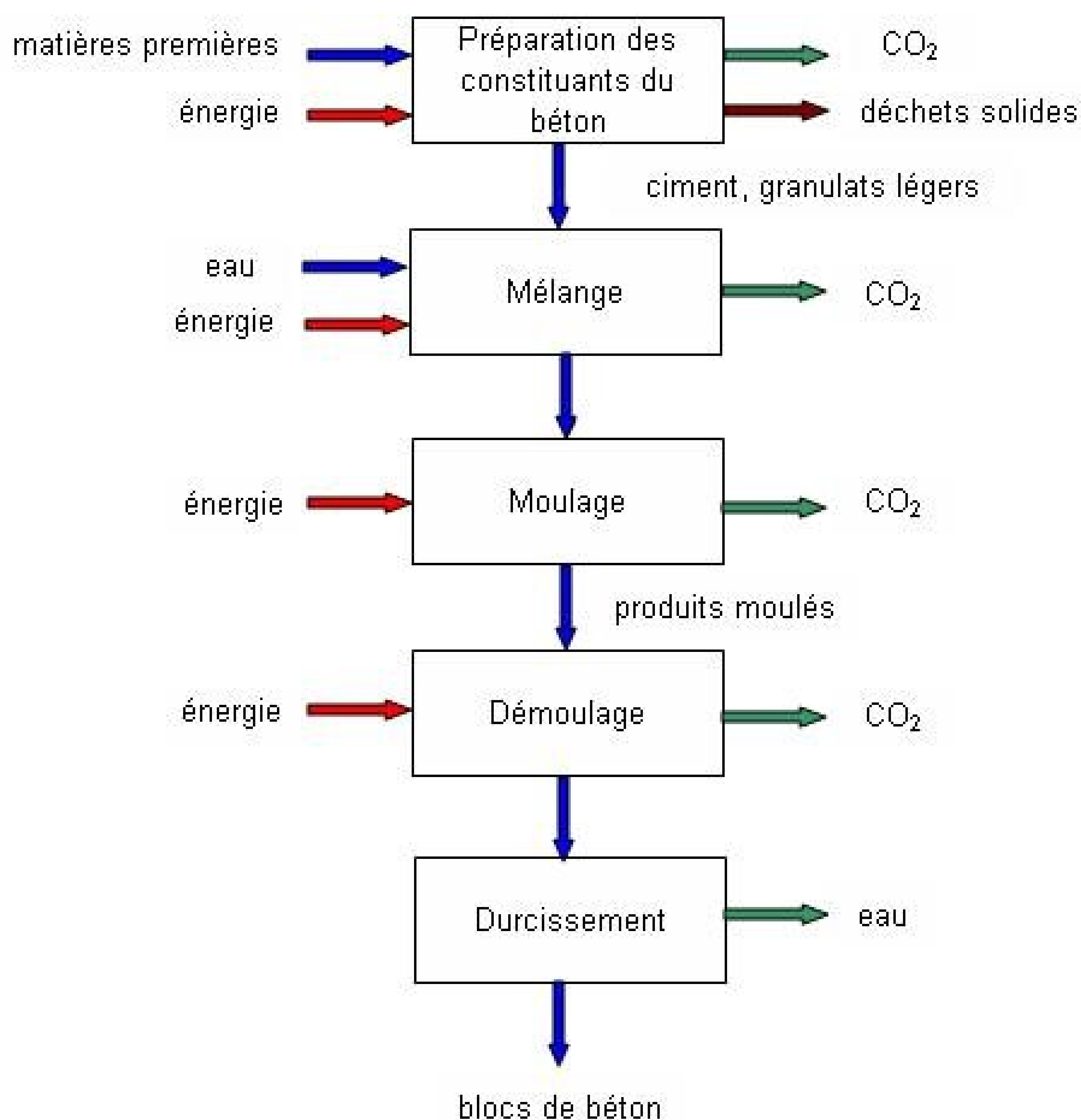


Figure 16: Schéma de la fabrication de blocs de béton.

Remarque :

Le béton et le mortier peuvent être mixés manuellement par les ouvriers ou mélangés à l'aide des engins.

II. 2. Matériaux de terre cuite

Les matériaux de terre cuite regroupent les produits pleins et perforés telles les briques, les produits creux comme les hourdis, les tuiles, etc.

II.2.1. Fabrication semi-industrielle

➤ **Processus de fabrication des matériaux en terre cuite**

La fabrication comprend plusieurs étapes (figure 17) dont les principales sont :

- l'extraction des matières premières ;
- la préparation de la pâte ;
- le façonnage ;
- le séchage ;
- la cuisson.

L'argile constitue la matière première de base des produits en terre cuite. Les dégraissants, des matières inertes qui facilitent l'évacuation de l'eau pendant le séchage et le dégagement gazeux pendant la cuisson, sont mélangés à l'argile dans de faibles proportions.

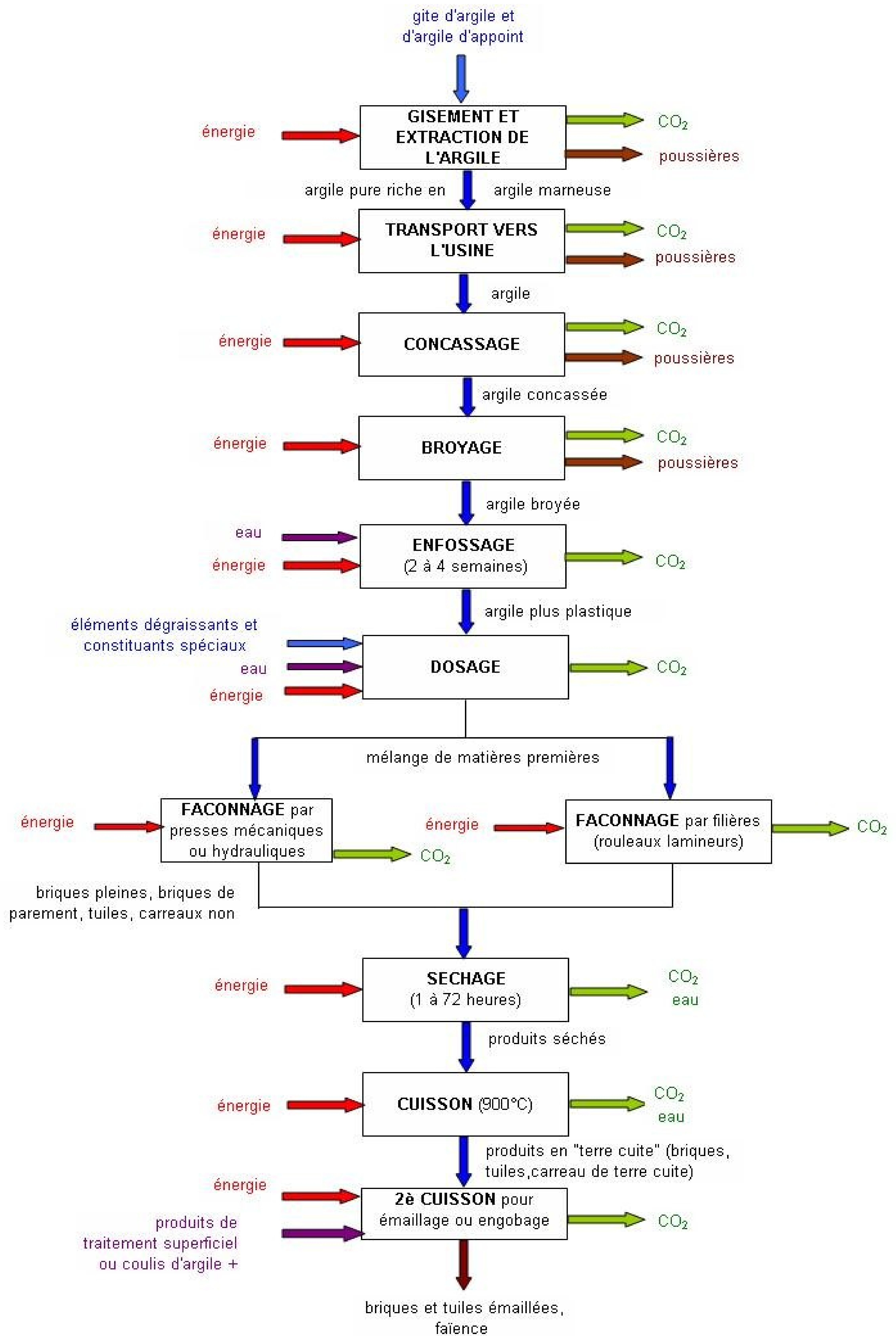


Figure 17 : Processus élémentaires de la fabrication semi-industrielle des matériaux de construction en terre cuite.

La fabrication industrielle de produits de terre cuite n'existe pas encore à Madagascar.

II.2.2. Fabrication de briques stabilisées

Le processus de fabrication est schématisé par la [figure 18](#) ci-après :

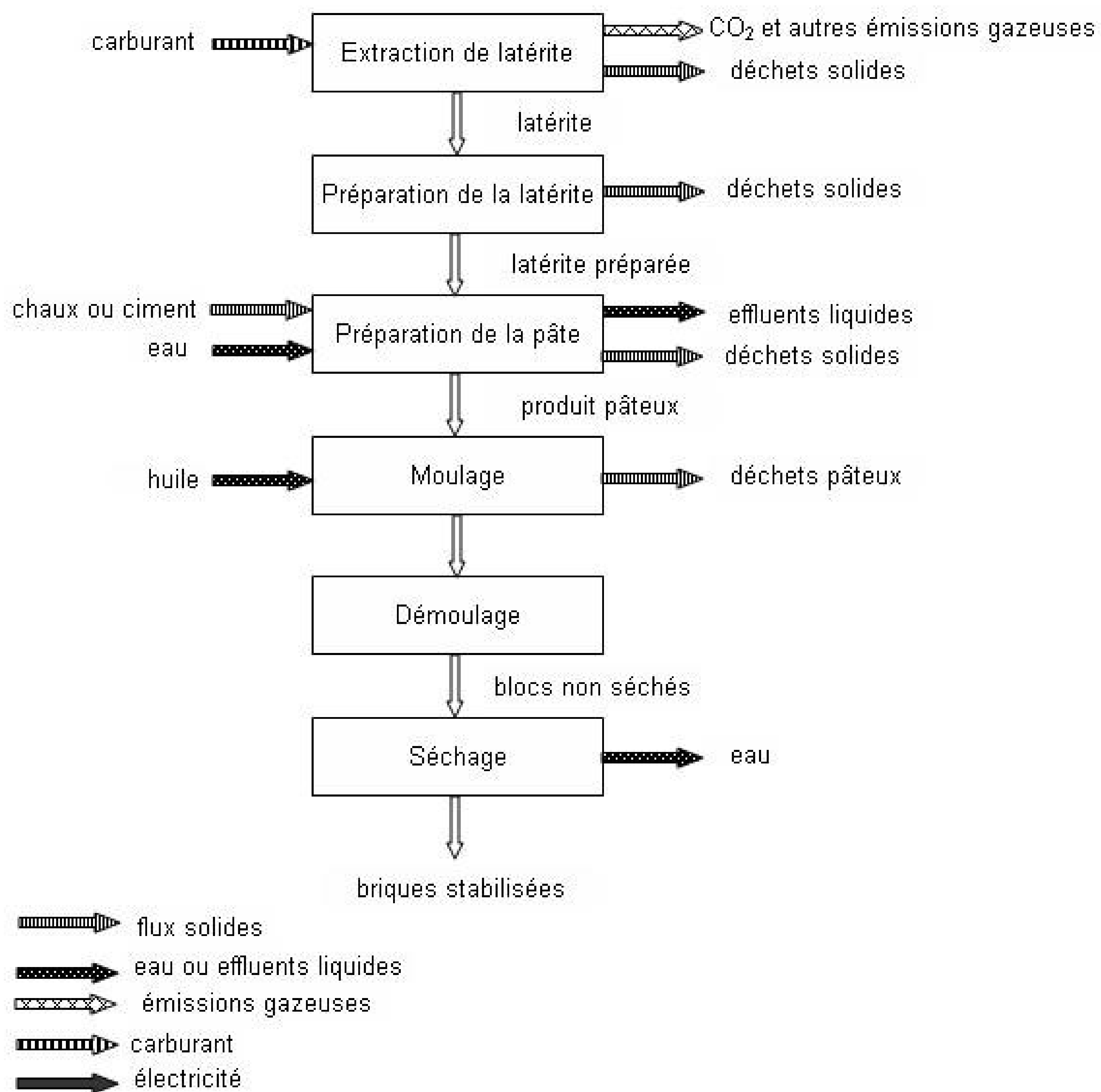


Figure18 : Processus élémentaires de la fabrication de briques stabilisées

Préparation de la latérite

Après avoir choisi la carrière qui va permettre d'obtenir une terre de bonne qualité, la terre ne doit pas être trop humide car elle pourra coller aux grilles de tamisage. Ensuite, on enlève les gros éléments contenus dans la terre, leur taille est limitée à 20mm au maximum et souvent moins c'est-à-dire 5 à 10mm. Après, on enlève les grosses mottes de terre à l'aide d'un concasseur ou pulvérisateur. Ensuite, on tamise pour avoir de fines particules de dimension inférieure ou égale à 5 μ m.

On mélange la terre préparée, aussi sèche que possible, au stabilisant pour obtenir un matériau bien poudreux et bien homogène. On utilise de la chaux ou du ciment comme stabilisant.

On ajoute ensuite l'eau nécessaire juste avant de presser car le stabilisant réagit sur l'eau et on a peu de temps de prise. La quantité d'eau à ajouter est suffisante si la résistance à la compression de la pâte est de 1bar. Si non, il faut rajouter de l'eau ou du mélange poudreux. La vérification est effectuée à l'aide d'un pénétromètre de poche.

II.2.2.1. Moulage et démoulage

Cette opération est effectuée par des presses manuelles, ce fait permet de compacter le mélange, c'est-à-dire serrer les grains et réduire les vides entre eux. Pour faciliter le démoulage, l'intérieur du moule doit être fréquemment huilé.

II.2.2.2. Séchage

Les produits obtenus sont ensuite séchés et sont posés sous bâche, dans un local couvert, à l'abri du soleil et de la pluie. Ils ne doivent pas être en contact de grande chaleur et vent sec car les blocs doivent conserver de l'humidité et durcissent lentement. Quand les blocs sont assez durs, ils sont empilés sur la tranche en laissant un espace entre eux pour que l'air circule, et ils peuvent être stockés à l'extérieur, sous une bâche en plastique. L'opération de séchage dure d'environ 15 jours.

II.3. Acier

L'acier est un alliage métallique à base de fer contenant du carbone (< 2 %) et éventuellement des éléments d'addition dits éléments d'alliage. Il peut acquérir par traitement chimique, mécanique et thermique des propriétés très variées : résistance à la corrosion, haute limite d'élasticité...

L'acier peut être produit :

- par fusion de minerai de fer et de coke dans des Hauts Fourneaux (environ 2000°C) puis affinage dans un convertisseur à oxygène

- soit par fusion de ferrailles de récupération dans des fours électriques (environ 1600°C)

L'acier obtenu est ensuite laminé pour produire soit des produits longs (poutrelles, profilés, barres, fils...), soit des produits plats (plaques, tôles en feuilles ou en bobines...). Le processus de production est illustré par la [figure 19](#).

La récupération et le recyclage des ferrailles en fin de vie permettent de préserver les ressources (minerais, combustibles), et de réduire les émissions de CO₂.

À l'échelle mondiale, 40 % des aciers produits proviennent du recyclage des ferrailles.

II.3.1. Production d'acier

II.3.1. 1. Usine d'agglomération

Le minerai de fer est préparé par broyage et calibration en grains qui s'agglomèrent entre eux. L'aggloméré obtenu est concassé puis chargé dans le haut fourneau avec du coke. Le coke est un combustible obtenu par distillation (gazéification des composants indésirables) de la houille dans le four de la cokerie.

II.3.1. 2. Haut fourneau

On extrait le fer de son minerai. Minerai et coke solides sont enfournés par le haut. L'air chaud (1200 °C) insufflé à la base provoque la combustion du coke (carbone presque pur). L'oxyde de carbone ainsi formé va "réduire" les oxydes de fer, c'est-à-dire leur prendre leur oxygène et, de ce fait, isoler le fer. Il se chargera en carbone au fur et à mesure de sa descente dans le haut-fourneau et se transformera en fonte.

II.3.1. 3. Convertisseur à l'Oxygène

On y convertit la fonte en acier. La fonte en fusion est versée sur un lit de ferraille. On brûle les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte en insufflant de l'oxygène pur. On récupère les résidus (laitier d'aciérie). On obtient de l'acier liquide *sauvage*, qui est versé dans une poche. Il est appelé acier sauvage, car, à ce stade, il est encore imparfait.

II.3.1. 4. Laminage

Cette dernière étape consiste principalement à étirer et écraser le métal pour lui donner les formes et dimensions souhaitées. Le laminage s'effectue à chaud. Pilotées par

ordinateur, les installations modernes sont très complexes et les produits s'y déplacent à des vitesses élevées pouvant aller jusqu'à 360 km/h en sortie pour le fil. A l'issue, les produits finis peuvent faire l'objet d'un parachèvement. Pour une large part des produits plats, l'opération est complétée d'un laminage à froid pour en réduire encore l'épaisseur.

II.3.1.4.1. Laminage des produits plats : de la brame à la tôle

La brame est réchauffée dans un four pour rendre le métal plus malléable, donc plus facile à étirer et à mettre en forme. L'ébauche est ensuite amincie par écrasements progressifs entre les cylindres du laminoir.

II.3.1. 4.2. Laminage des produits longs

Les blooms ou billettes issues de la coulée en lingots sont transformés en poutrelles, profilés, rails, barres ou fils.

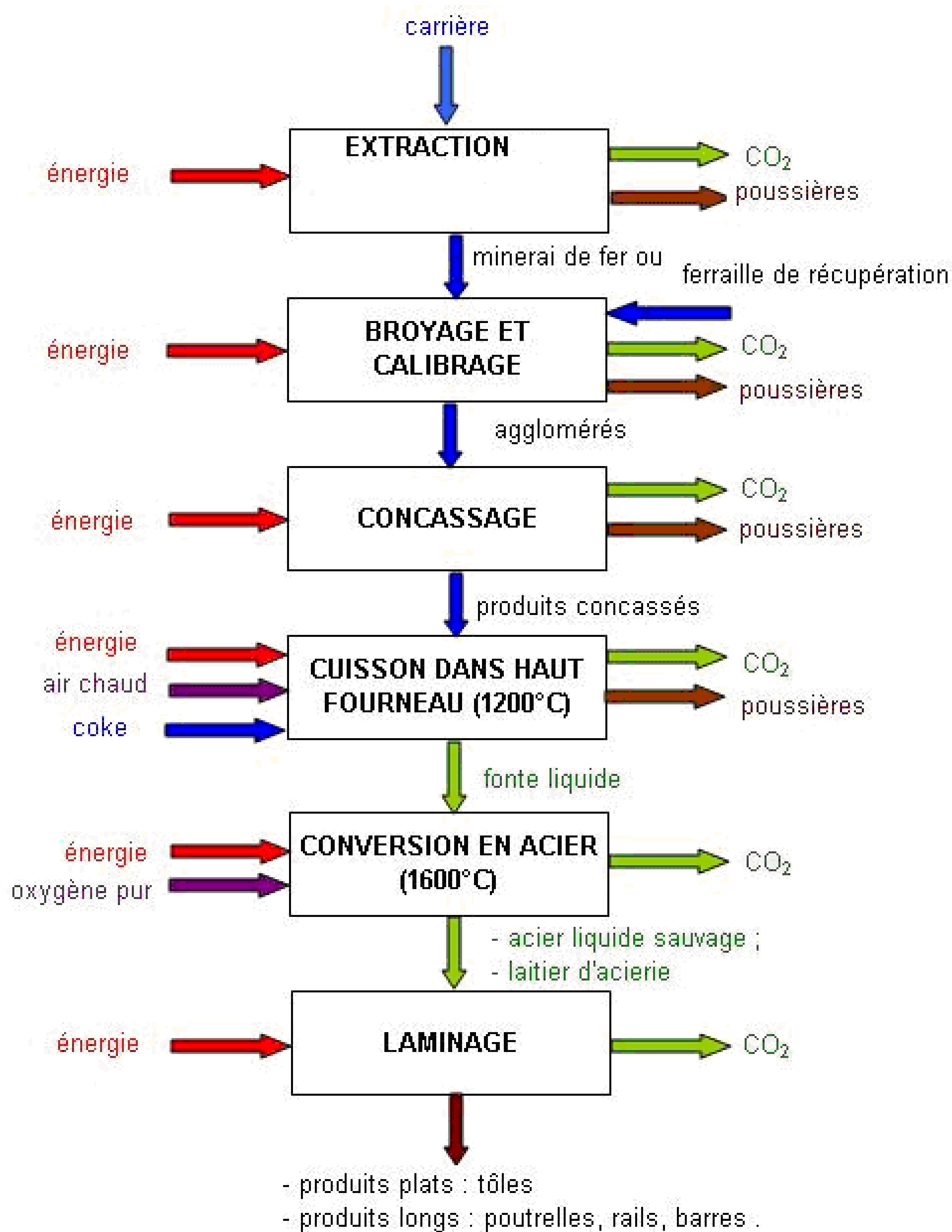


Figure 19 : Flow Sheet de la production d'acier.

II.4. Chaux

II.4.1. Techniques de fabrication

II.4.1. 1. Matières premières

La principale matière première est le calcaire pur ou magnésien qui ne comporte que les carbonates de calcium ou de magnésium et très peu d'impuretés argileuses (< 15 %). Les roches sont extraites de carrière généralement à ciel ouvert.

II.4.1. 2. Etapes de fabrication

Toutes les étapes de production sont données dans la [figure 20](#).

II.4.1. 2.1. Concassage et criblage

Les roches dures sont concassées puis criblées pour avoir des diamètres à peu uniformes (cuisson uniforme).

II.4.1. 2.2. Cuisson

La cuisson se fait dans des fours droits continus. Le calcaire et les combustibles (charbon ou bois) sont introduits à la partie supérieure du four en couches successives. La pierre descend lentement en traversant le four, on a une zone de préchauffage à environ 850°C, une zone de calcination et une zone de refroidissement.

Notons l'existence des fours artisanaux à marche discontinue : le four est constitué par simple empilement de pierre à chaux, le plus gros étant proche du foyer, le plus petit éloigné.

II.4.1.2.3. Broyage

Une partie de la chaux vive est broyée aussi finement que possible.

II.4.1. 2.4. Extinction

L'autre partie est destinée à subir l'extinction. Celle-ci s'effectue dans des hydrateurs par aspersion d'eau ou par formation de pâte d'où l'obtention de chaux éteinte.

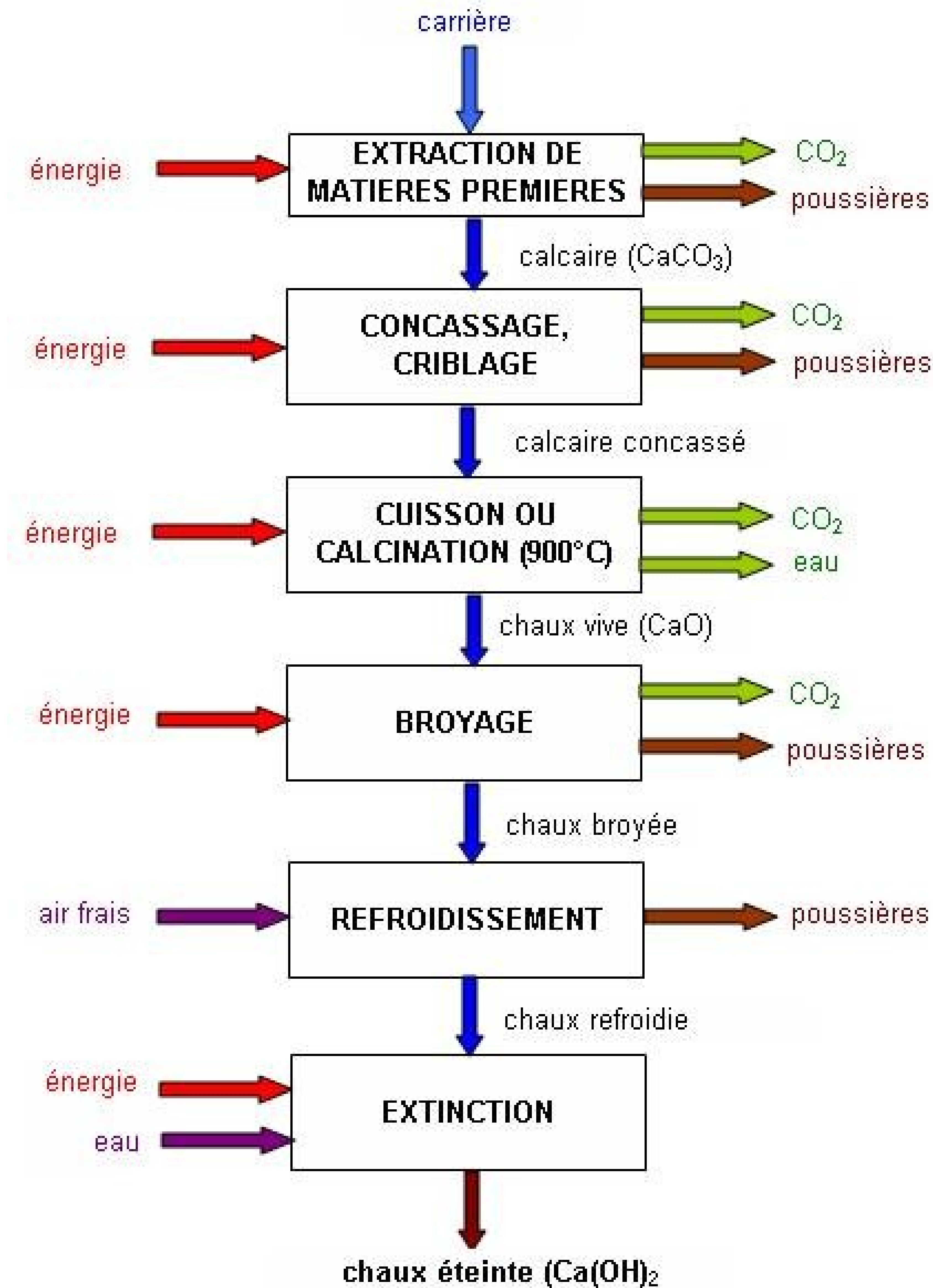


Figure 20 : Fabrication de la chaux.

II.4.2. Les différents types de chaux

II.4.2. 1. Les chaux aériennes

La **calcination** du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900° C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45 %, correspondant à la perte en gaz carbonique. La chaux vive correspond à la forme la plus dangereuse du matériau, avide d'eau, elle brûle tous

corps organique en captant son eau. Elle peut être éteinte, lors de l'opération d'extinction ou d'hydratation, en ajoutant de l'eau.

L'extinction peut être réalisée selon plusieurs procédés. La forme obtenue après extinction dépend de la quantité d'eau:

- en quantité limitée, contrôlée : l'extinction produit une chaux en poudre,
- avec un excès d'eau: l'extinction produit une chaux en pâte.

II.4.2. 2. Les chaux magnésiennes

Dans certains calcaires dits dolomitiques, le carbonate de calcium est associé au carbonate de magnésium. Cette variante de la roche calcaire forme de la chaux magnésienne, lors de sa cuisson à une température inférieure à 900° C, dans les conditions habituelles requises pour l'obtention d'une chaux aérienne.

II.4.2. 3. Les chaux hydrauliques

Les calcaires purs sont rares. Ils sont le plus souvent mélangés à des marnes et des argiles riches en éléments chimiques comme le fer, l'aluminium et surtout la silice. Entre 800 et 1 500 ° C, le calcium du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, mais aussi des aluminates et des ferro-aluminates de calcium.

Par contact avec l'eau, ces corps vont former des hydrates insolubles qui confèrent au liant un caractère hydraulique. Les proportions d'alumine et de fer sont très faibles (dans les liants blancs, les teneurs en fer sont inférieures à 0,1 ou 0,2%). Le phénomène de prise hydraulique est donc essentiellement dû à la réaction entre le CaO et les silicates.

Par la suite, au contact de l'air humide, la chaux et les hydrates ainsi formés vont se carbonater (avec le gaz carbonique de l'air) pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine. Cette réaction prend plusieurs mois : c'est la partie aérienne de la prise.

II.5. Plâtre

II.5. 1. Fabrication

Le plâtre est obtenu par déshydratation thermique du gypse (sulfate de calcium hydraté). Sa fabrication, nécessite plusieurs étapes ([figure 21](#)).

Extraction du gypse à l'aide d'explosifs, quand il s'agit de gisement à ciel ouvert : « des carrières ». Acheminé depuis la carrière à l'aide de camions, le gypse subit un concassage, afin de réduire la dimension de ses grains

Le gypse est transporté à l'aide d'un tapis vers le criblage. Cette opération consiste à ne sélectionner que les grains de diamètre inférieur à 40 mm

Le gypse ainsi sélectionné est stocké en tas dans un local couvert avant d'être homogénéisé, car le gypse extrait n'est pur qu'à 90 %. Aussi il sera mélangé à l'aide d'une machine composée de râteau qui va mélanger les couches de gypse.

Toujours à l'aide de tapis, le gypse est conduit dans un four où il sera placé dans un moulin, où à l'aide d'une vis sans fin il est broyé et écrasé (comme dans un moulin à café.).

Il sera cuit à 150 °C. Ce four permet de faire remonter le gypse cuit par le bout du four, tandis que les impuretés plus lourdes, restent au fond. Après refroidissement à 60 °C il devient du semi-hydrate (le gypse a perdu une molécule d'eau et demi). D'autres types de four existent (fours culée, fours droits, fours marmite, sur-cuiseur, autoclaves, ...) qui donnent différentes qualités

Le plâtre est ensuite mélangé dans un malaxeur avec différents ajouts (souvent quelques pour mille) :

- de l'amidon, pour améliorer l'adhésion entre le plâtre et le carton,
- des adjuvants
- des retardateurs pour modifier les temps de prise du plâtre

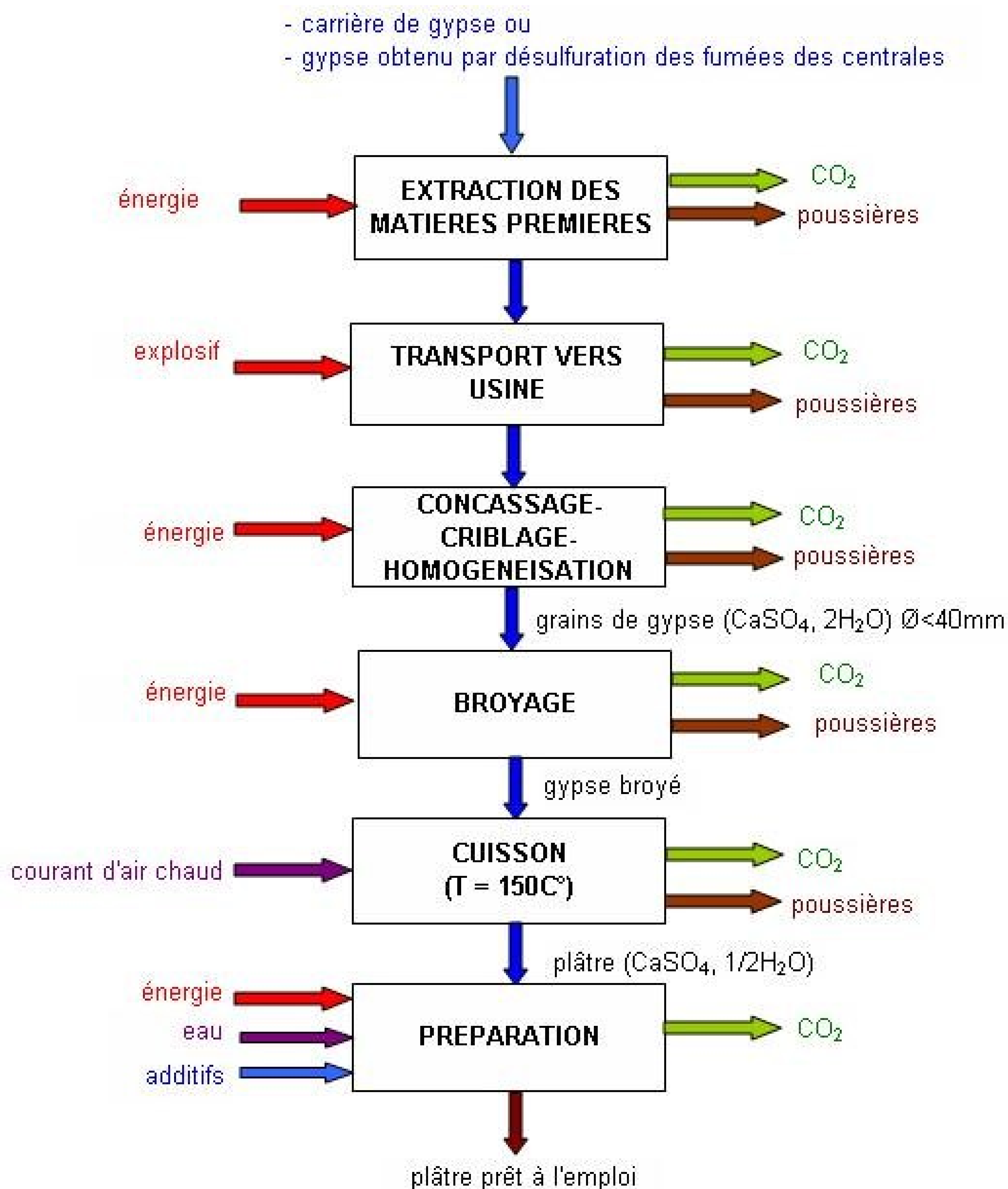


Figure 21: Processus de fabrication de plâtre.

II.5. 2. Les différentes qualités de plâtre

Selon les conditions opératoires et la température de déshydratation, on obtient différentes qualités de plâtre :

- le plâtre de Paris, mélange de 60 à 80% d'hémihydrate β et d'anhydrite, de résistance mécanique peu élevée (10 MPa en compression), qui constitue l'essentiel du plâtre de construction,
- les plâtres spéciaux (hémihydrate α), hydrofuges, plus résistants (> 30 MPa) mais plus coûteux (0,5% de la production française),

- l'anhydrite (sulfate déshydraté) ou "surcuit", utilisé pour les chapes dures et sans retrait.

II.6. Verre

Dans le langage scientifique, le mot **verre** est un matériau amorphe présentant le phénomène de transition vitreuse.

Il existe quatre types de verre :

- verre borosilicate ;
- verre céramique ;
- verre au plomb ;
- verre silico-sodo-calcique.

C'est ce dernier type de verre qui nous intéresse car les vitrages des bâtiments sont fabriqués à partir de ce verre.

II.6. 1. Processus de fabrication

Pour obtenir du verre, les étapes de fabrication sont présentées par la [figure 22](#) ci-après.

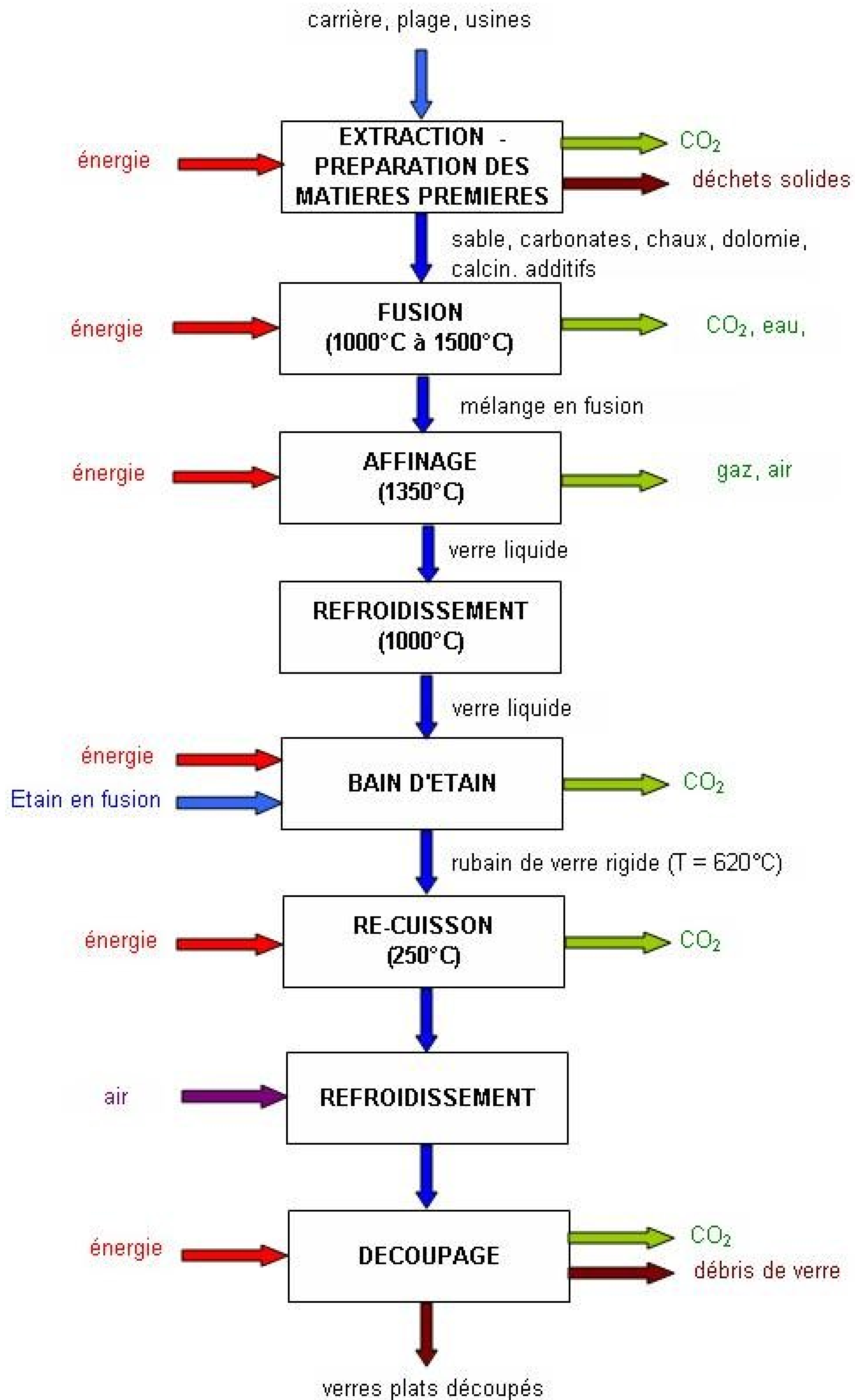


Figure 22 : Processus de fabrication des verres plats.

II.6. 1.1. La préparation des matières premières

Les matières premières utilisées dans l'industrie du verre sont :

- *Les vitrifiants* : éléments de base qui donnent la structure vitreuse (la silice contenue dans les sables par exemple).
- *Les fondants* : éléments qui permettent de diminuer la température de fusion des vitrifiants (alcalis comme les carbonates de sodium et de potassium par exemple).
- *Les stabilisants* : éléments qui empêchent la détérioration des verres dans le temps (la chaux, la magnésie, la dolomie, l'alumine...).
- *Les affinants* : éléments qui, en présence de chaleur, libèrent une grande quantité de gaz. Ces dégagements gazeux entraînent avec eux les bulles du verre en fusion et favorisent l'homogénéisation de celui-ci. Le sulfate de sodium, le nitrate de sodium ou de potassium sont souvent employés à cet effet.
- *Les colorants* : les oxydes de fer, de chrome, de nickel, de manganèse, de cobalt, de cuivre sont responsables des différentes colorations que peut avoir un verre.
- *Les agents opacifiant* : éléments utilisés pour rendre les verres opales (exemple : le fluor et les phosphates).

Le verre sodocalcique représente la majorité de la production pour les secteurs du verre plat (vitrage pour les bâtiments et pour les automobiles).

Le charbon, coke : le carbone est le réducteur le plus utilisé, en verrerie, pour régler le redox des verres. 4 types de produits sont utilisés : fines d'anhracite, coke broyé et tamisé, coke de pétrole granulé, fuel mélangé à la composition.

Le verre, récupéré et recyclé, rentre également comme matière première dans le mélange vitrifiable.

Dénotmé «calcin », ce verre fond à plus ou moins 1000°C au lieu de 1500°C pour les matières premières habituelles. Son utilisation permet donc d'économiser de l'énergie et des matières premières minérales.

II.6. 1.2. Le processus de fusion

Le processus de fusion se divise en 3 étapes successives.

II.6. 1.1.1. Fusion

Le mélange doit être transformé en un liquide dépourvu d'inclusions cristallines. Au alentour de 1000°C, les premières réactions de fusion et de décomposition commencent

à se produire mais il faut monter entre 1200°C et 1500°C pour s'assurer que les matières moins fusibles puissent réagir avec les matières en fusion et être digérées par la phase liquide.

II.6.1.1. 2. L'affinage

Ce verre fondu est alors débarrassé des bulles gazeuses puis homogénéisé dans la zone d'affinage vers 1350 °C et enfin progressivement refroidi jusqu'à 1000 °C environ.

II.6.1.1. 3. Bain d'étain

Le verre liquide coule dans un four contenant de l'étain en fusion de grande pureté. L'atmosphère de ce four est réductrice pour éviter l'oxydation du métal.

Le verre moins dense que l'étain « flotte » sur celui-ci et forme un ruban dont l'épaisseur naturelle est de l'ordre de 6 mm. Des dispositifs annexes permettent de limiter ou d'accélérer l'étalement de ce ruban de verre afin d'en maîtriser l'épaisseur et le parallélisme des faces.

II.6.1.3. Refroidissement

A la sortie du bain d'étain le verre est à une température de l'ordre de 620 °C. Il est alors suffisamment rigide pour être transporté sur des rouleaux et introduit en continu dans un tunnel de re-cuisson appelé « étenderie » dans laquelle sa température s'abaisse progressivement vers 250 °C. Pendant ce refroidissement lent le verre a été libéré de toutes les contraintes internes qui empêcheraient son exploitation future.

II.6.1.4. Le formage du verre

Les différents procédés de mise en forme permettent de classer les produits verriers en 3 grandes catégories :

- Le verre plat (verre à vitre, miroirs...) ;
- Le verre creux (bouteilles, bocaux, flacons, objets de décoration...) ;
- Les fibres de verre textiles et non textiles et les autres verres (verre cellulaire, verre optique, verre de télévision, tube et ampoule...).

Dans la construction, le verre plat les fibres de verre sont les plus utilisés. L'opération se déroule sous atmosphère neutre ou réductrice (à l'aide de dihydrogène) pour éviter l'oxydation de l'étain et donc les possibilités de souillure de la surface du verre.

D'une extrémité à l'autre du bain, la température du verre va se réduire progressivement.

La mise en forme du verre par étirage est une ancienne méthode qui ne se pratique plus que pour des applications spécifiques (exemple : verre extra mince).

Les fours alimentent directement les étireuses. Le principe de ces procédés est d'immerger dans le bain de fusion une pièce réfractaire présentant en son milieu une fente verticale (barre d'étirage). Le verre passe, sous une légère pression, au travers de la fente et forme une feuille stable et sans rétrécissement. En faisant varier la profondeur d'immersion de la barre d'étirage dans le bain de fusion et en jouant sur la vitesse d'étirage, il est possible de modifier l'épaisseur du verre.

Contrairement à la technique du « float glass », le verre étiré devra subir une étape supplémentaire de polissage pour le rendre parfaitement plat.

Concernant les fibres de verre non textiles, ceux-ci sont généralement employés dans les applications d'isolation thermique ou acoustique. Elles peuvent être mises en forme par étirage centrifuge, par étirage par soufflage, par étirage centrifuge et soufflage.

II.7. Le bois

Le bois est un matériau que les industries de première transformation modifient et amènent sous de multiples formes: bois sciés, lamellés collés, panneaux, pièces aboutées, ...

Comme matériau, le bois s'emploie soit directement comme matière première, par exemple pour la fabrication d'éléments de menuiserie, de meubles, d'emballages, soit pour la réalisation de matériaux dérivés tels que les panneaux de particules et contreplaqués. La grande variété des bois, les propriétés et d'aspects différents, permet de nombreuses utilisations dans de multiples répertoires de l'environnement humain.

II.7.1. Transformation du bois

On distingue trois types de transformation du bois :

- le sciage ;
- la restructuration et
- la reconstitution.

II.7.1. 1. Le sciage

Les grumes arrivées en scierie sont d'abord triées sur le parc à grumes, qui est une aire de stockage, puis passées à la machine selon les pièces de bois à produire. Dans le cas du sciage, plusieurs méthodes de découpe ou débit, existent selon les produits à tirer de la grume. Le mode de débit le plus simple est le sciage de tranches parallèles de même épaisseur appelées plots.

Avec une découpe plus complète, plusieurs types de pièces sont produits en sciant les arêtes, on parle de sciage avivé.

Le mode de débit est fonction des caractéristiques des grumes (dimensions et qualité), de l'équipement et des débouchés de l'entreprise.

- **Le classement des débits de bois**

Plusieurs types de classements ([figure 23](#)) coexistent dans la classification des débits de bois : le classement normalisé tendent à remplacer graduellement les dimensions commerciales fréquemment employées aujourd'hui. Ces dimensions sont issues des usages et des possibilités de débit des arbres.

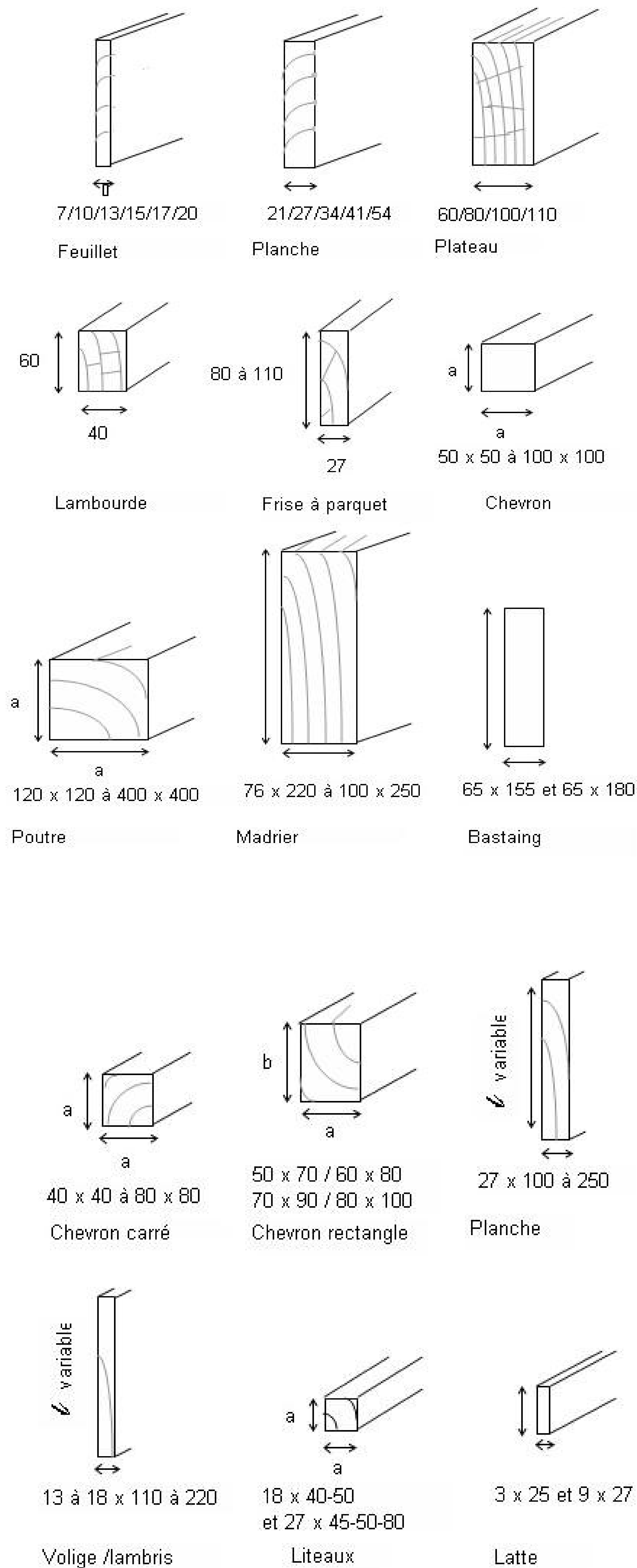


Figure 23: Classement des débits de bois

Le sciage donne beaucoup de sous-produits. Le rendement matière d'une scierie est de l'ordre de 50 %. La moitié environ de la grume n'est pas utilisable pour des pièces de bois; ce sont les chutes dues aux défauts, les dosses, l'écorce et la sciure.

Il existe deux autres méthodes de découpe de la grume qui sont :

- **le tranchage** : cela consiste à couper des feuilles avec un grand rabot ;
- **le déroulage** : sur le principe du taille-crayon, les feuilles sont découpées en continu. Les feuilles de tranchage et déroulage ont une épaisseur d 0,1 à 5 millimètres; ces types de découpe exigent des bois de bonne qualité avec un minimum de défauts.

Les feuilles issues du tranchage servent principalement à la décoration et à la fabrication de panneaux de contreplaqué.

II.7.1. 2. La restructuration

Cette méthode utilise surtout les bois de trituration c'est-à-dire les bois aux qualités médiocres et/ou aux faibles dimensions.

Le bois est fractionné, ses particules sont déchiquetées puis mélangées à de la colle et pressées à chaud pour la fabrication de panneaux : panneau de particules et panneau de fibres.

II.7.1. 3. La reconstitution

Il s'agit d'obtenir des pièces de grandes dimensions à partir de débits de petite taille tout en gardant les propriétés de résistance mécanique du bois massif. Les pièces de bois sont assemblées par aboutage ou collage bout à bout de sciages usinés, par panneautage ou collage côte à côte ; ou par lamellation dite collage des éléments les uns au dessus des autres.

Ces techniques permettent de fabriquer des pièces pour la construction, la charpente et la menuiserie à partir de bois de qualité moindre, car il y a possibilité de purger c'est-à-dire éliminer les parties comprenant des défauts comme les noeuds.

Le bois une fois sorti de la forêt a plusieurs destinations possibles selon l'essence, la qualité, les dimensions, le tissu industriel local et les débouchés :

- la scierie
- l'usine de panneaux
- la papeterie
- les unités de stockage et d'usinage du bois de chauffage.

ANNEXE 5 : PROTOCOLE D'ENQUETE

Les données locales collectées concernent principalement les matériaux de construction non importés : briques de terres cuites, briques stabilisées, bois transformés (voliges, planches, parquets, etc.).

Notre enquête est réalisée afin d'obtenir des données concernant en premier lieu la fabrication de briques de terre cuite et de briques de terre stabilisée. Ensuite, nous avons cherché les données relatives aux transformations des bois. Ces données nous permettront d'avoir les quantités de matières premières, sources et quantités d'énergie utilisées. Les valeurs seront donc spécifiques pour Madagascar. Nous avons divisé notre enquête en trois parties :

- la première concernant la fabrication des briques de terre cuite ;
- la deuxième est liée la fabrication de briques stabilisées et
- la troisième est relative à la transformation de bois.

I. Méthodologie

Il est à noter que nous avons effectué notre étude dans les régions périphériques d'Antananarivo.

Le protocole utilisé pour conduire les enquêtes sur terrain comprend les opérations ci après.

- Nous repérons d'abord en premier lieu les sites à visiter. Concernant la fabrication de briques stabilisées, nous avons visité une industrie sise à Ambohimambola. Le secteur de fabrication de briques de terre stabilisée est en cours d'exploitation à Madagascar. Les murs bâtis avec ce type de matériaux ne sont pas encore pris en considération statistiquement [1].

Pour la fabrication de briques de terre cuite, ce secteur est dominé par le secteur informel pratiquant la fabrication artisanale (petite entreprise familiale composée de 2 ou 3 artisans, pas de mécanisation, exploitation situant dans les rizières). Les principaux sites de production se trouvent à Sabotsy Namehana, Vontovorona, Anosizato, et Ambohitrinimanjaka.

Il est à noter que statistiquement, le nombre des fabricants artisanaux de briques de terre cuite n'est pas encore évalué.

Cependant, nous avons quand même enquêté au sein d'une usine formelle adoptant la technique semi-industrielle, c'est-à-dire fabrication mécanisée, utilisant de l'électricité, unité plus importante par rapport à la fabrication artisanale et dont la production est effectuée dans usine appropriée. Pour cela la briqueterie d'Ambohimena (Ambatolampy) est visitée.

A propos de la transformation de bois, la plupart des usines sont trouvées le long des routes nationales 1, 2, 3,4 et 7 ; des lieux où on rencontre beaucoup de forêts ainsi que dans des usines situant dans le centre ville d'Antananarivo comme Isotry, Andravoahangy, Anosizato, Mahazo, Ambohimahitsy, Talatamaty, Ankadikely et Sabotsy Namehana.

Pour la collecte des données concernant la transformation de bois, nous avons visité Andravoahangy, Sabotsy Namehana et Ankadikely.

12 sites sont visités pour la production artisanale de briques de terre cuite et 9 pour les usines de transformation de bois, une usine de chaque pour la production de briques de terre stabilisée et la production semi-industrielle de briques de terre cuite.

Type de production	Site de production	Nombre d'usines (ou unités de production) visitées
Production artisanale de briques de terre cuite	- Anosizato	3
	- Sabotsy Namehana	3
	- Vontovorona	3
	- Ambohitrimanjaka	3
Production semi-industrielle de briques de terre cuite	- Ambohimena	1
Production industrielle de briques de terre stabilisée	-Ambohimanambola	1
Transformation de bois	- Andravoahangy	3
	- Sabotsy Namehana	3
	- Ankadikely	3

- Par la suite, nous présentons aux responsables de chaque usine et aux exploitants afin d'exposer les objectifs de notre enquête.
- Et enfin, des formulaires ont été établis et complétés après chaque enquête. Ces formulaires comportent les informations ci-après.

I.1. Briques de terre cuite

I.1.1. Fabrication artisanale

- le nom du chef de l'entreprise ;
- le nombre de briques de terre cuite correspondant à un four ;
- les types de combustibles utilisés ;
- les quantités de combustibles nécessaires pour la cuisson ;
- les distances entre les lieux d'approvisionnement en combustibles et le lieu de production de briques ;
- le type et la capacité des moyens de locomotion pour les transports des combustibles.

I.1.2. Fabrication semi-industrielle

- le nom de l'usine ;
- processus et les différentes phases de fabrication ;
- le nombre de briques de terre correspondant à un four ;
- les types de combustibles et les sources d'énergie utilisés pour la production : bois, électricité, gas-oil ;
- les quantités de combustibles et énergies nécessaires pour chaque phase de production : broyage des matières premières, transports au sein de l'usine ; séchage, cuisson ;
- les distances entre les lieux d'approvisionnement en combustibles, matières premières et le lieu de production de briques ;
- le type, capacité et consommation en carburant des moyens de locomotion pour les transports des combustibles et matières premières ;
- rendement de la tractopelle utilisée pour l'extraction des matières premières.

I.2. Briques stabilisées

- le nom de l'usine ;

- production journalière de l'usine ;
- nature et quantité de chaque matière première : latérite, stabilisants ;
- processus et phases de fabrication ;
- les distances entre les lieux d'approvisionnement en matières premières et le lieu de production de briques ;
- le type, capacité et consommation en carburant des moyens de locomotion pour les transports des matières premières ;
- rendement de la tractopelle utilisée pour l'extraction des matières premières.

I.3. Débitage de bois

- le nom de l'usine ;
- les différents produits issues de la transformation de bois effectués par l'usine : volige, parquets, planches, etc.
- quantité d'électricité consommée pour la production de chaque unité de produit.
- distances entre la concession et l'usine de transformation.
- le type, capacité et consommation en carburant des moyens de locomotion pour les transports des bois ;

Des formulaires d'enquêtes sont présentés à chaque enquête.

II. Formulaire

I. FABRICATION ARTISANALE DE BRIQUES DE TERRE CUITE

1) Nom du propriétaire de l'unité de production :.....

2) Nombre de briques de terre correspondant à un four ou (capacité du four) :.....

3) Combustibles utilisés pour la cuisson ainsi que les quantités nécessaires :

Balle de riz :

Tourbe :

Sciure de bois :

Fine de charbon de bois :

Bois :

Tourbe :

Autres :

4) Distances entre les lieux d'approvisionnement en combustibles et le lieu de production de briques :.....km

5) Véhicule de transport des combustibles ainsi que leurs capacité

Combustibles	Véhicule	Capacité
.....
.....
.....
.....

II. FABRICATION SEMI-INDUSTRIELLE DE BRIQUES DE TERRE CUITE

1) Nom de l'usine :

2) Nombre de briques de terre correspondant à un four :

3) Production /semaine :

4) Production/mois :

5) Processus et les différentes phases de fabrication et sources d'énergie utilisées :

Phase de production d'énergie	Matériels utilisées	Sources

-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
-
.....	
6) Distances entre :	
Lieux d'approvisionnement en matières premières et le lieu de production de briques :	
Matières premières	Distances
.....
.....
.....
Lieux d'approvisionnement en combustibles et le lieu de production de briques :	
Combustibles	Distances
.....
.....
.....
7) Consommation en combustible et électricité :	
Combustibles et électricité	Consommation
.....
.....

8) Rendement de la tractopelle utilisée pour l'extraction des matières premières :.....

9) Véhicule de transport des combustibles ainsi que leurs capacité

Combustibles	Véhicule	Capacité
.....
.....
.....
.....

10) Véhicule de transport des combustibles ainsi que leurs capacité

Combustibles	Véhicule	Capacité
.....
.....
.....
.....

Matières premières	Véhicule	Capacité
.....
.....
.....

III. DEBITAGE DE BOIS

1) de l'usine ou du propriétaire :.....

2) Produits issus de la transformation de bois effectués :

-.....

-.....

-.....

-.....

3) Quantité d'électricité consommée pour la production de chaque unité de produit :

Produit consommée	Quantité d'électricité
.....
.....
.....
.....

4) Distances entre la concession et l'usine de transformation :.....

5) Véhicules pour les transports des bois - capacité du véhicule :

ANNEXE 6 : LES CARACTERISTIQUES DES CENTRALES ET RESEAUX DU RIA (MIX ELECTRIQUE)

Les huit centrales, Andekaleka (62 000 kW), Mandraka (24 000 kW), Antelomita (8 000 kW), Mandroseza (40 000 kW), Manandona (1 600 kW), Antsirabe (16 280 kW), Sahanivotry (15 000 kW) et Ambohimambola (63 000 kW) n'arrivaient que depuis peu à satisfaire les demandes en électricité d'Antananarivo et Antsirabe. En effet, la pointe de consommation est estimée par la JIRAMA à 122 000 kW pour les deux villes.

Installée par la compagnie nationale de l'électricité et de l'eau, la JIRAMA ou Jiro sy Rano Malagasy, à 14 km à l'Est du centre-ville d'Antananarivo, la Centrale thermique d'Ambohimambola (CTA) joue un double rôle :

- le rôle d'appoint pour renforcer l'alimentation en électricité de la ville d'Antananarivo et la ville d'Antsirabe ;
- le rôle de dispatcheur : les productions électriques des six centrales de la JIRAMA transitent par la CTA avant d'être distribuées aux consommateurs des deux villes d'Antananarivo et d'Antsirabe.

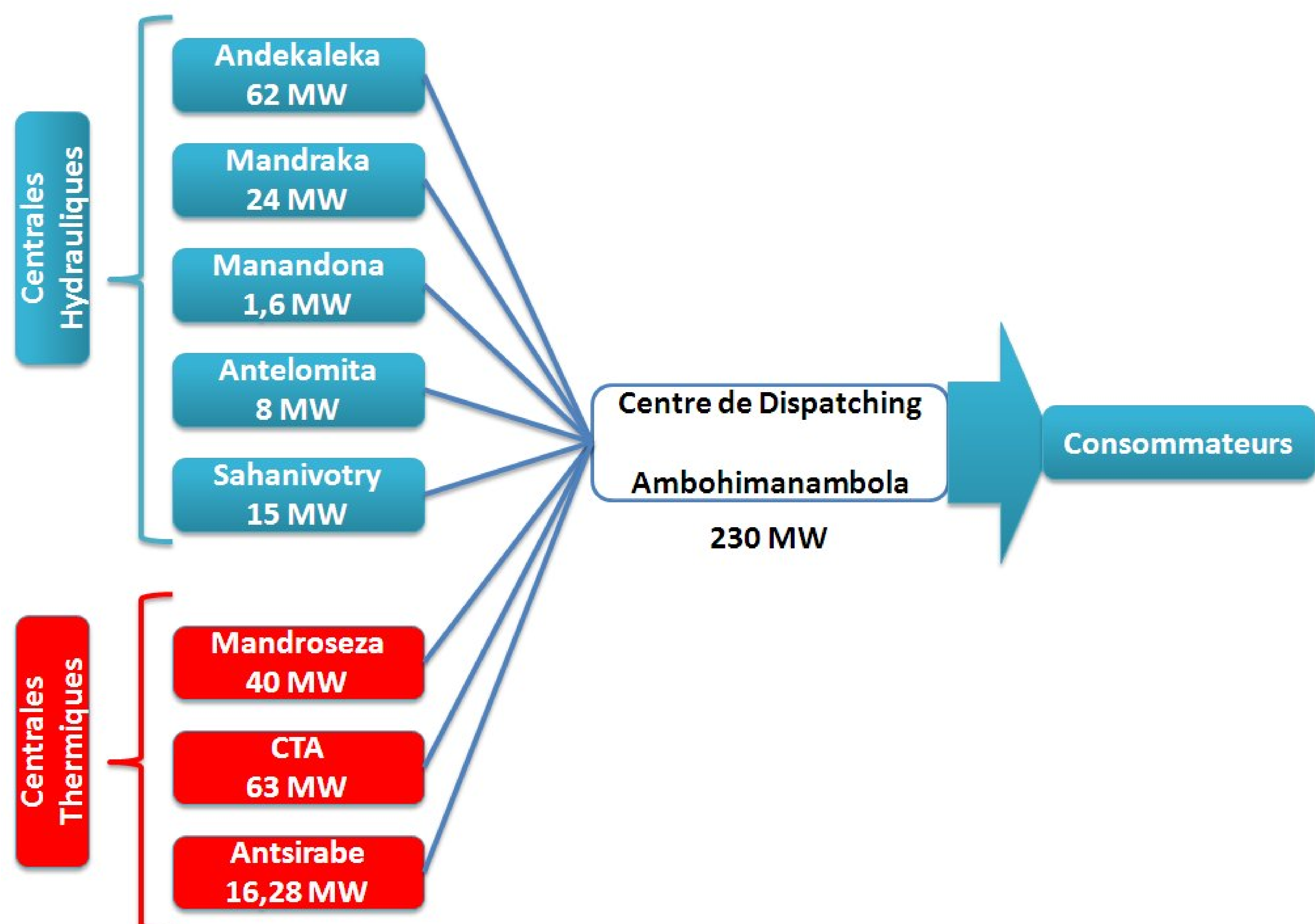


Figure 24: Schéma des puissances fournies par les centrales du RIA

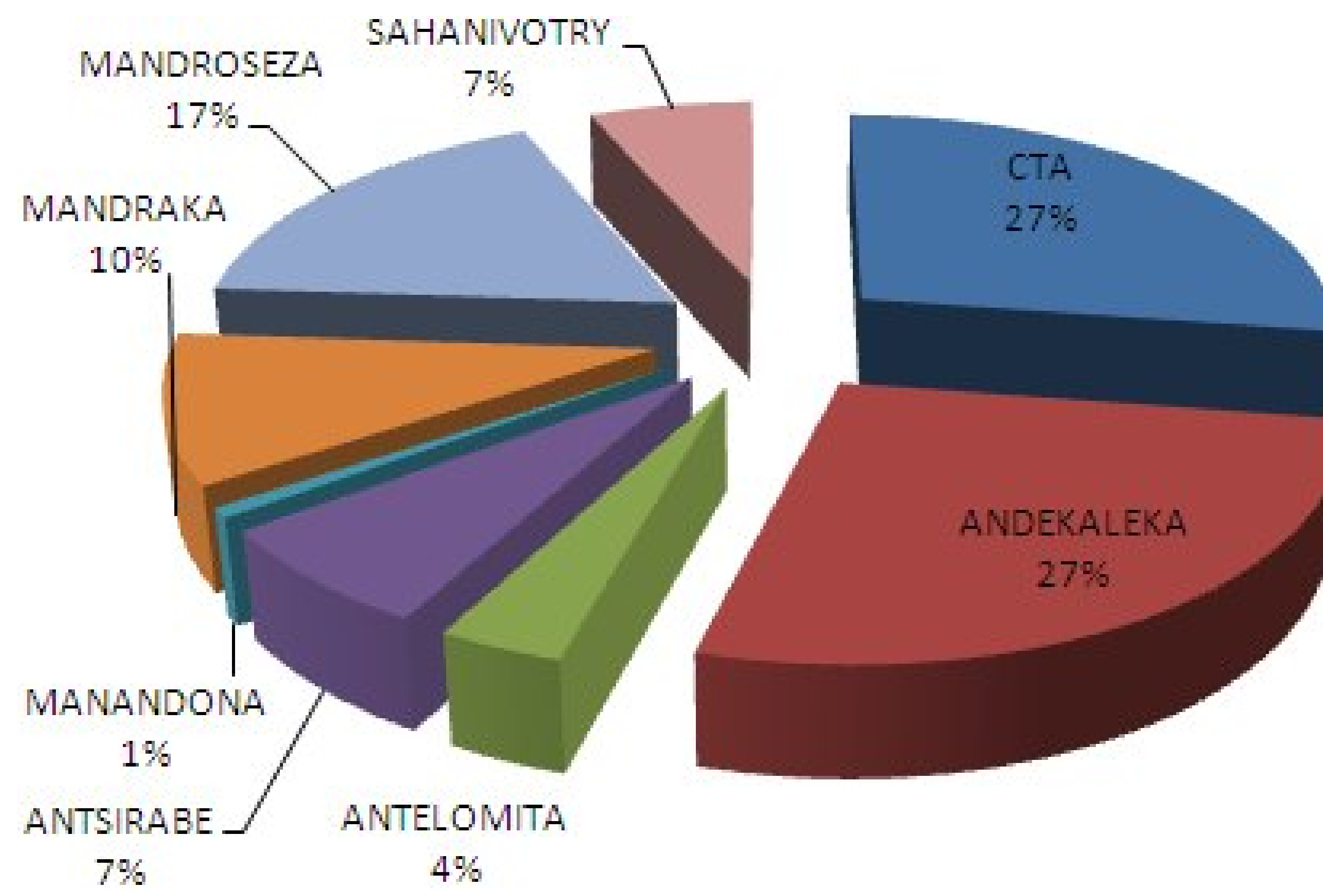


Figure 15: Répartition des puissances fournies par les centrales du RIA

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. INSTAT (2005). *Enquête auprès des ménages 2004 (EPM 2004)*. Antananarivo, Madagascar.
- [2]. MARION C. (2000). *L'état de la pollution à Madagascar et les outils mis en œuvre pour en atténuer ses conséquences*. D.U. Maîtrise de l'Énergie et de l'Environnement
- [3]. RAZAFY F.L., RANDRIAMAMIANINA V, RABEFITIA Z, RAKOTOARINARIVO C. (2001). *Inventaire national des gaz à effet de serre, secteur changements d'affectation des terres et foresterie*. Projet MAG99G31 du Ministère de l'environnement, Antananarivo, Madagascar.
- [4]. ANDRIAMANANTSOA B., RAKOTOASIMANANA G., ANDRIANASOLO N (2001). *Inventaire national des gaz à effet de serre. Secteur Energie*. Projet MAG99G31 du Ministère de l'environnement, Antananarivo, Madagascar.
- [5]. RAVOLOLONANDRIANINA (2002). *Etude d'atténuation des émissions des gaz à effet de serre, secteur agriculture*. Projet MAG99G31 du Ministère de l'environnement, Antananarivo, Madagascar.
- [6]. CHAKABROTY M. I. (1992). *Specification and Evaluation in Civil Engineering*. Calcutta, India,
- [7]. TIWARI P. and PARIKH. J. (1995). *Cost of CO₂ reduction in building construction in India*. In energie, Vol 20, n°6, pp.531-547.
- [8]. ANONYME (2003). *Integrated Product Policy Building on Environment Life Cycle Thinking Communication from the commission to the Council and the European Parliament, commission of the European communities*. Bruxelles, Belgique.

- [9]. ADEME (2006). *Calcul des facteurs d'émission et sources bibliographiques utilisées*. Version 4.0, Bilan Carbone.
- [10]. Sommet planète terre (1997). *Conférence des Nations-Unies sur l'environnement et le développement*. Rio de Janeiro, Brésil.
- [11]. ASSOCIATION HQE (1997). *Définition des cibles de la qualité environnementale des bâtiments*. Version N°1.
- [12]. Journal officiel de la République Française du 10 janvier 2004. *Association HQE. Définition des cibles de la qualité environnementale des bâtiments*. Version n°1.
- [13]. CHARLOT-VALDIEU C ET OUTREQUIN P. (2004). *La démarche HQE de conduite de projet urbain intégrant le développement durable*. The European Commission Community Research.
- [14]. PNAE et Ministère de l'environnement. *Plan d'Action Environnemental. Programme environnemental 3, document stratégique, une meilleure gestion de l'environnement pour un développement rapide et durable*. Madagascar, 2002.
- [15]. USEPA, US.ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995). *Life-Cycle Assessment : A conceptual framework, key issues, and summary of existing methods*. Prepared by Research Triangle Institute for the Office of Air Quality Planning and standards, EPA-452/R-95-002, US Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC, Atlanta, Etats-Unis.
- [16]. SETAC, SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (1992). *Life Cycle Assessment. Workshop report*. Potsdam, Germany ; Bruxelles, Belgique. SETAC-Europe.
- [17]. ISO (1997). *Management environnemental - Analyse de Cycle de Vie - Principes et cadre. International*. Organisation for Standardisation (ISO 14040), Genève, Suisse.

- [18]. ISO (1998). *Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie - Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire*. International Organisation for Standardisation (ISO 14041), Genève, Suisse.
- [19]. ISO (1998). *Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie - Évaluation d'impact du cycle de vie*. International Organisation for Standardisation (ISO 14042), Genève, Suisse.
- [20]. ISO (2000). *Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation*. International Organisation for Standardisation (ISO 14043), Genève, Suisse.
- [21]. ISO (2006). *Management environnemental- Analyse du cycle de vie- Exigences et lignes directrices*. International Organisation for Standardisation (ISO 14043), Genève, Suisse
- [22]. OWENS J.W. (1999). *Why life cycle impact assessment is now described as an indicator system*. International Journal of LCA 4(2) 81-86.
- [23]. GIEC (2007). *Summary for Policymakers of the 4th assessment report*.
- [24]. JENKINS B.M, BAXTTER L.L, MILES T.R.JR ET MILES T.R. (1998). *Combustion properties of biomass*. In Fuel Processing Technology 54.
- [25]. SUZUKI M., et OKADA K (1995). *The estimation of energy consumption and CO₂ emission due to housing construction in Japan*. In energy and Buildings 22, pp. 165 -169.
- [26]. PARIKH J., GOKARN S. (1993). *Global Environmental Change*. India.
- [27]. CITI, Committee of International Trade and Industry (1988). *Input/Output Table of Japan*. Tokyo, Japan.

- [28]. MRSCIJ, Management Research Society for Construction Industry of Japan (1986). *Cost Analysis Information for Buildings Works*. Tokyo, Japan.
- [29]. CPWD, Central Public Works Department (1989). *Delhi Schedule of rates*. New Delhi, India.
- [30]. CSO, Central Statistical Organisation (1989). *Statistical Abstract of India*. New Delhi, India.
- [31]. PC, 1992 Central Public Works Department. *Delhi Schedule of rates*. New Delhi, India, (1989).
- [32]. Manual BEES (Buildings *Environmental and Economic Sustainability*).
- [33]. PEUPOORTIER B. (1997). *European Methodology for the Evaluation of environmental Impacts of Building*. Projet REGENER, Final report to European Commission, DG 12, approx, 400p.
- [34]. PEUPOORTIER B. (2003). *Eco-conception des bâtiments*. Presse de l'École des Mines, 206p.
- [35]. FRISCHKNECHT R., et al.,(1996). *Oekoinventare von Energie systemen*. Auflage, ETH Zürich / PSI Villigen.
- [36]. CEREN Centre d'Essai et de Recherche de l'Entente Interdépartementale en vue de la protection de la forêt et de l'Environnement contre l'incendie (1999). *Energies par produit*. Conseil canadien du bois.
- [37]. MIES, MISSION INTERMINISTERIELLE DE L'EFFET DE SERRE (1998). *Mémento des décideurs*.
- [38]. JANCOVICI, J.M, (2000). *Note de synthèse sur le télétravail*. Secrétariat d'état à l'industrie, Ministère de l'Industrie - Mission pour le développement durable.

- [39]. ADEME (2004). *Calcul des facteurs d'émission et sources bibliographiques utilisées*. Version 4.0, Bilan Carbone.
- [40]. deam database.
- [41]. DEVOUASSOUD P. (1999.). *Estimation de la valeur d'un immeuble libre à la vente*. Technique de l'Ingénieur, Traité Construction. C1520.
- [42]. CANAPERO (1979). *Le toit*. C1005. Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction.
- [43]. LEHEMBRE B. et al. (1997). *Le Maçon, Guide des Métiers du Bâtiment*. Editions Nathan, Paris.
- [44]. NEUFERT E. (2001). *Les éléments des projets de construction*. 7^{ème} Edition, DUNOD.
- [45]. Ministère des travaux publics (1962). *Série des prix*. Antananarivo, Madagascar.
- [46]. RAZAFIMAHARO D. (2010). *Emission de GES de mix électrique : cas du réseau interconnecté d'Antananarivo*. Mémoire de fin d'étude Master 2. Université de La Réunion.
- [47]. BOUSTEAD I., HANCOCK G.F. (1979). *Handbook of Industrial Energy Analysis*. Ellis Horwood Publishers, Chichester, UK.
- [48]. PNUD (2004). *Energie et Environnement. Rapport mondial sur le développement humain*.
- [49]. IFP rapport 55 949 (2001). Page 44.
- [50]. CHARNAY F. (2005). *Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production*

pérenne de compost. Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges, chimie et microbiologie de l'eau, France.

[51]. AGETIPA, ONE, MINENVF (2006). *Plan d'urbanisme directeur PUDi. Prescriptions environnementales*. Antananarivo, Madagascar.

[52]. BUTTOUD (1998). *L'économie forestière malgache, quelques points saillants*.

[53]. EPA, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1993). *Life-Cycle Assessment : Inventory Guidelines and principles*. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, USA.

[54]. INSTAT (2003). *Enquête auprès des ménages 2002 (EPM 2002)*. Antananarivo, Madagascar.

[55]. ACQUIER J. L. (1997). *Architecture de Madagascar*. ISBN 2-7013-1207-8, Paris : Berger-Levrault.

[56]. HAMMER J. P. et VERIN P. (2004). *A Madagascar : chez les Zafimaniry*. ISBN 2-910728-41-2, 2004, Paris.

[57]. La Cité des mille, (1997). *Histoire, architecture, urbanisme*. Edition Tsipika, Antananarivo, Madagascar.

[58]. RANAIVONARIIVO G.V. (1999). Cours de DEA. *Complément sur la fabrication de matériaux de construction*. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar.

Sites internet

[59]. www.craterre.archi.fr

[60]. enerdata, (2005), www.enerdata.fr

[61]. GHG, Geenhouse Gas Initiative (2006), www.ghgprotocol.org

[62]. www\madarail.mg

[63]. TBE-Europe, (2005), www.staywithclay.com.

Mots clés : CO₂, Analyse de Cycle de Vie, bâtiment, fonctionnement.

Key words : CO₂, Life Cycle Assessment, buildings, functioning

Résumé

Des études ont été effectuées dans d'autres pays comme l'Inde et le Japon pour quantifier le gaz carbonique émis par la construction des bâtiments. Des logiciels d'ACV comme BEES et EQUER développés aux Etats-Unis et en France permettent aussi de calculer l'émission en CO₂ au sein d'un habitat.

Pourtant, les modèles de calcul et les outils de travail créés ne peuvent pas être utilisés à Madagascar du fait que les données utilisées ne reflètent pas la réalité locale.

Ainsi nous avons effectué le travail actuel comportant la quantification de dioxyde de carbone émis pendant le cycle de vie d'un habitat et son fonctionnement.

L'approche adoptée est l'Analyse de Cycle de Vie pour évaluer le CO₂ émis par le bâtiment pendant 50 ans. Nous avons décomposé le bâtiment en Ouvrages Fonctionnels.

Différents types de matériaux correspondants à notre réalité sont considérés. Le modèle

Entrée / Sortie (E/S) est adopté. Les éléments de départ sont les matériaux de construction tandis que les éléments d'arrivée sont les différents types d'OF. Les résultats sont donnés par Unité Fonctionnelle.

Concernant le fonctionnement, nous avons calculé l'émission en CO₂ par postes d'activités domestiques. La consommation en eau ainsi que la production de déchets sont aussi évaluées.

Afin d'obtenir un résultat global relatif à un habitat, c'est-à-dire relatif au bâtiment et à son fonctionnement, un outil de travail nommé ECO2H (Emission en CO₂ d'un Habitat) est élaboré.

Des innombrables scénarios, pour l'enveloppe du bâtiment ainsi que pour le fonctionnement de l'habitat peuvent être réalisés car une multitude de choix concernant les matériaux de construction et les caractéristiques de l'habitat sont exposées.

Summary

Many studies have been undertaken in others countries as India and Japan to quantify the buildings CO₂ emission. Life Cycle tools such as BEES and EQUER are developed in United States and France. Carbon dioxide emission can be calculated with these tools.

Modes of calculations developed in other countries can not be used in Madagascar because they are not adapted to our local reality. So, our work concerns the quantification of carbon dioxide emission during building life cycle including the occupancy.

Life Cycle Assessment approach is used for study. For the building, it is decomposed in "Functional Structure". Different types of materials are considered.

Input/output model is adopted. The input elements are the construction materials and the output elements are the different types of "Functional Structure". The results are given by Functional Unit.

Concerning the occupancy, the carbon dioxide emissions are calculated for every household activity. Water consumption and solid waste production are also evaluated.

To obtain the global CO₂ emission, we have developed a tool named ECO2H. Many scenarios can be realized. Various construction materials and different household characteristics are exposed.