UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale



Evaluation des impacts environnementaux de la fabrication de savon FOMULAC, République démocratique du Congo

---

Promoteur : Pr. P. Gerin

Mémoire présenté par Guévorts Jonathan
en vue de l'obtention
du grade de Bio-ingénieur
en Chimie et bio-industries

Année académique 2010-2011

Ce mémoire fut le fruit d'une longue période de travail, qui m'a énormément appris. Ces enseignements ont été rendus possibles grâce aux personnes suivantes, auxquelles je tiens à exprimer ma reconnaissance.

A vous M. Gerin, d'avoir accepté ce projet, pour votre soutien et vos corrections. Vos remarques resteront des fils conducteurs pour ma vie professionnelle.

A toi Eric, ce mémoire t'est dédié. Pour ta prévenance en tant que maître de stage. Ainsi qu'aux cadres de la savonnerie qui m'ont permis d'en comprendre le fonctionnement.

Merci aux responsables de Louvain coopération au Développement qui m'ont accueilli sur place ; Brigitte, Saïdou, Ephraïm ainsi qu'à Vincent et Roger qui m'ont présenté le projet et m'ont permis de traverser les tracasseries administratives.

Merci à Christine pour son aide précieuse lors des manipulations et à Anne Isenrentand pour les analyses spectrométriques. Et à toi Françoise, pour ton enthousiasme communicatif !

Merci à la maison du Bonheur, vous qui avez été mon foyer durant ce long été. A vous mes cokoteur de l'Oasis, pour cette belle année de simplicité en votre compagnie.

A Bao, tes idées claires et ton amitié.

A Catherine, pour ta correction dans la dernière ligne droite ainsi qu'à Marc, qui a dû supporter mon accaparement de l'ordinateur.

A mes parents, pour leur soutien inconditionnel.

Résumé

La savonnerie FOMULAC est une entreprise à finalité sociale, située dans la concession de l'Hôpital de Katana au Sud-Kivu. Son activité permet le financement de médicaments au bénéfice des populations locales. La savonnerie achète des amandes de palme, en extrait l'huile palmiste, saponifie cette huile à froid avec de la soude caustique et conditionne le savon obtenu. Les responsables de la savonnerie souhaitent améliorer les performances environnementales de cette entreprise. Dans ce contexte, notre objectif était d'évaluer les impacts environnementaux de la production de savon FOMULAC et d'identifier les étapes du procédé pour lesquels des améliorations devraient être prioritairement recherchées.

Pour atteindre cet objectif, nous avons opté pour une démarche de type analyse de cycle de vie. L'ensemble des processus et des flux de matière et d'énergie a été inventorié et le flow-sheet de la savonnerie a été établi, ce qui a permis de déterminer un bilan massique, un bilan énergétique et un bilan environnemental du procédé.

Les résultats ont mis plusieurs problématiques en évidence : (1) Une consommation anormalement élevée de combustible pour les étapes de séchage et de clarification, contribuant respectivement à 52 et 15% de la consommation énergétique totale de la savonnerie ; (2) le transport des matières (bois, amandes, savon) par camion contribue à 30% de la consommation d'énergie fossile du cycle de vie du savon; (3) les boues de clarification de l'huile contribuent à 83 % des émissions de MES dans les eaux de surface, comptabilisées sur l'ensemble du cycle de vie du savon; (4) les travailleurs sont soumis à des nuisances respiratoires, des risques de brûlures et de blessures.

Les principales solutions proposées sont : l'amélioration des performances du séchoir ou l'utilisation d'un séchoir solaire, la diminution des températures de fonctionnement de l'étape de clarification ou l'amélioration des performances thermiques du clarificateur, la réduction des masses transportées par retrait des contaminants et de l'humidité des matières, et l'utilisation des boues de clarification pour l'alimentation du bétail. Les améliorations potentielles qui pourraient être attendues sont une diminution de 100% de la consommation actuelle de bois, la réduction des risques d'incendies et une diminution des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du savon : production d'oxydants photochimiques (-95%), émission de MES dans l'eau (-83%), acidification (-36%), réchauffement climatique (-15%) et consommation d'énergie fossile (-9%).

Glossaire

Am	Amandes, désignant la matière hétéroclite des amandes et de leurs contaminants
Am*	Amande, désignant la partie du fruit protégée par la coque
AmC	Contaminant présent dans les lots d'amande
AmCS	Contaminants séchés
AmS	Amandes séchées
AmS *	Amande séchée
Bou	Boues de clarification
CES	Consommation d'énergie spécifique
COVnM	Composé organique volatile non méthane
$DCO_{K2Cr2O7}$	Demande chimique en oxygène utilisant le dichromate de potassium comme oxydant
DCO_{KMnO4}	Demande chimique en oxygène utilisant le permanganate de potassium comme oxydant
EIE	Evaluation des incidences sur l'environnement
EMAS	Eco-management and audit scheme
HPB	Huile palmiste brute
HPP	Huile palmiste pure
LCA	Life cycle analysis (analyse de cycle de vie)
LCI	Life cycle inventory (inventaire)
LCIA	Life cycle impact assesment (évaluation des impacts du cycle de vie)
MES	Matière en suspension
MF	Matière fraîche
MS	Matière sèche
MSNH	Matière sèche non huileuse
PEC	Predicted environmental concentration
PNEC	Predicted no effect concentration
SS	Sous-système
SV	Solides volatils
SVNH	Solides volatils non huileux
$T_{cendres}$	Teneur en cendres
T_{eau}	Teneur en eau
T_{eau_AmC}	Teneur en eau des contaminants d'amandes
T_{eau_Ami}	Teneur en eau des amandes ou amandes séchées
T_{eau_Ami*}	Teneur en eau des amandes* ou amandes* séchées
T_{huile}	Teneur en huile
TPH	Tourteau palmiste huileux
TPS	Tourteau palmiste sec
T_{SVNH}	Teneur en solides volatiles non huileux
eau_V	Vapeur d'eau

Tables des matières

CHAPITRE I : INTRODUCTION 4

1 INTRODUCTION GENERALE 3

2 ÉTAT DE L'ART 4
2.1 ENVIRONNEMENT 4
2.2 IMPACT ENVIRONNEMENTAL 5
2.3 LES METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 6
2.3.1 L'évaluation des incidences sur l'environnement [Tukker, 2000] 6
2.3.2 L'analyse de cycle de vie 7
2.4 ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PRODUCTION D'HUILE PALMISTE ET DE SAVON 13
2.4.1 Impacts environnementaux de la production d'huile de palme 14
2.4.2 Ecotoxicité du savon dans les eaux de surface 15

3 CONTEXTE DU MEMOIRE : LA SAVONNERIE FOMULAC- KATANA, PROVINCE DU SUD KIVU 15
3.1 LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO (RDC) ET LE SUD-KIVU 15
3.1.1 Contexte géographique 16
3.1.2 Contexte historique et politique 16
3.1.3 Contexte sociodémographique 17
3.2 LE SITE FOMULAC-KATANA 19
3.2.1 Historique 19
3.3 LA SAVONNERIE FOMULAC 19
3.3.1 Objectifs 19
3.3.2 Le rôle de Louvain Coopération au Développement 20
3.3.3 Description de l'entreprise 21
3.3.4 Description du procédé 22
3.3.5 Contraintes de fonctionnement 28

CHAPITRE II : OBJECTIFS ET DEMARCHE 32

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES 33

1 ECHANTILLONNAGE 33
1.1 QUARTAGE 33
1.2 MATIERES 34
1.2.1 Amandes (Am) 34
1.2.2 Amandes séchées (AmS) 34
1.2.3 Bois de chauffe 35
1.2.4 Tourteaux palmistes secs (TPS) 35
1.2.5 Tourteaux palmistes huileux (TPH) 36
1.2.6 Boues de clarification (boues) 36
1.2.7 Eaux usées 37
1.3 CONDITIONNEMENT DES ECHANTILLONS 40
1.3.1 Transfert des échantillons d'eau vers la Belgique 40
1.3.2 Homogénéisation des échantillons de boues 40
1.3.3 Broyage des amandes* 40

2 CARACTERISATION DES MATIERES 40
2.1 TENEUR EN MATIERE SECHE, SOLIDES TOTAUX (ST) ET TENEUR EN CENDRES 40
2.2 MATIERE EN SUSPENSION (MES) ET TENEUR EN CENDRES DES MES 42
2.3 TENEUR EN HUILE 43
2.4 TENEUR EN CONTAMINANT DANS LES AMANDES (AMC) 43
2.5 DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE (DCO) 44
2.5.1 Oxydation au KMnO4 44
2.5.2 Oxydation au K2Cr2O7 46
2.6 TENEUR EN SODIUM 48
2.6.1 Préparation des échantillons 48
2.6.2 Mesure de la teneur en sodium 49
2.7 MESURE DU PH 49

3 QUANTIFICATION DES FLUX DE MATIERE 50
3.1 FLUX DE MATIERE DE L'UNITE HUILERIE 50
3.1.1 Mesure de la densité de l'huile palmiste 50
3.1.2 Mesure de la densité du bois 51
3.2 FLUX DE MATIERE DE L'UNITE SAVONNERIE 51

4 QUANTIFICATION DES FLUX D'ENERGIE 51
4.1 FLUX D'ENERGIE ELECTRIQUE 51
4.2 FLUX D'ENERGIE CALORIFIQUE 52

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS 54

1 MISES AU POINT ANALYTIQUES 54
1.1 OPTIMISATION DE LA DUREE D'ETUVAGE POUR LA MESURE DE LA TENEUR EN MS 54
1.1.1 Détermination de la durée d'étuvage pour l'ensemble des matières solides 54
1.1.2 Détermination de la durée d'étuvage pour les amandes* broyées 55
1.2 OPTIMISATION DE LA DUREE DE CALCINATION POUR LA DETERMINATION DES TAUX DE CENDRES 57
1.3 COMPARAISON DES METHODES DE MESURE DE DCO AU $KMnO_4$ ET AU $K_2Cr_2O_7$ 58
1.3.1 Extrapolation des DCO des échantillons dont la $DCO_{K2Cr2O7}$ n'a pas été mesurée 59
1.4 ESTIMATION DE LA DEGRADATION DES ECHANTILLONS 61
1.4.1 Estimation de l'incertitude de nos mesures des ST 61
1.4.2 Vérification de la stabilité des ST et SV au cours de la conservation 63
1.4.3 Méthodologie retenue pour estimer les DCO non mesurées expérimentalement 66

2 CARACTERISATION DES MATIERES TRANSFORMEES DANS LA SAVONNERIE 66
2.1 AMANDES ET AMANDES SECHEES 67
2.2 BOIS DE CHAUFFE 71
2.3 TOURTEAUX HUILEUX ET SECS 72
2.4 HUILE PALMISTE BRUTE ET HUILE PALMISTE PURIFIEE 73
2.5 BOUES DE CLARIFICATION 74
2.6 EAUX USEES 77
2.7 SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES RETENUES 82

3 BILAN MASSIQUE 83
3.1 HUILERIE 83
3.1.1 Séchage 86
3.1.2 Foyer de séchage 87
3.1.3 Pressage 89
3.1.4 Clarification 91

3.1.5 Foyer de clarification 93
3.2 SAVONNERIE 94
3.3 TRANSPORT 98
3.4 BILAN GLOBAL 98

4 BILAN ENERGETIQUE 101
4.1 RESULTATS 101
4.2 DISCUSSION 103

5 BILAN ENVIRONNEMENTAL 103
5.1 DEFINITION DU CHAMP DE L'ETUDE 103
5.1.1 Définition de l'unité fonctionnelle 103
5.1.2 Délimitation des frontières du système 104
5.1.3 Sélection des catégories d'impact 108
5.2 INVENTAIRE 112
5.3 ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU SAVON 118
5.3.1 Calcul des indicateurs par catégorie d'impact 118
5.3.2 Contribution relative des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux 122
5.3.3 Risques et nuisances liés aux conditions de travail 125

6 PROPOSITIONS D'AMELIORATION DU PROCEDE POUR EN REDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX 126
6.1 REDUCTION DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET CHOIX DES COMBUSTIBLES 126
6.1.1 Séchage 127
6.1.2 Transport 130
6.1.3 Clarification 130
6.2 VALORISATION DES DECHETS 133
6.3 AMELIORATION DE LA SECURITE ET REDUCTION DES NUISANCES POUR LES TRAVAILLEURS. 133
6.4 TRAITEMENT DES EAUX USEES 134
6.5 REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ETAPES EXTERNES A LA SAVONNERIE 134

CHAPITRE V : CONCLUSION 135

Chapitre I : Introduction

1 Introduction

La savonnerie FOMULAC est une entreprise à finalité sociale, située dans la concession de l'Hôpital de Katana au Sud-Kivu. Une partie de ses bénéfices sert au financement de médicaments au bénéfice des populations locales. En effet, depuis plus de deux décennies, les formations sanitaires de la RDC en général et celles du Sud-Kivu en particulier n'ont pas bénéficié des subsides de l'Etat et dépendent principalement des appuis extérieurs. La savonnerie achète des amandes de palme, en extrait l'huile palmiste, saponifie cette huile à froid avec de la soude caustique et conditionne le savon obtenu. Les responsables de la savonnerie souhaitent améliorer les performances environnementales de cette entreprise.

Dans ce contexte, notre objectif est d'évaluer les impacts environnementaux de la production de savon FOMULAC et d'identifier les étapes du procédé pour lesquels des améliorations devraient être prioritairement recherchées.

Pour atteindre cet objectif, nous avons opté pour une démarche de type analyse de cycle de vie. L'ensemble des processus et des flux de matière et d'énergie a été inventorié et le flow-sheet de la savonnerie a été établi, ce qui a permis de déterminer un bilan massique, un bilan énergétique et un bilan environnemental du procédé.

2 État de l'art

2.1 Environnement

Le concept d'environnement est susceptible d'interprétations diverses et parfois contradictoires. Si un consensus semble exister au niveau scientifique, la notion d'environnement est encore définie de manière différente au sein des diverses législations nationales [André et al., 2003]. En effet, l'environnement est un concept pluridisciplinaire. De par ses dimensions multiples, il a toujours été à mi-chemin des sciences humaines et des sciences naturelles, et a donc longtemps eu des significations différentes selon les spécialistes du domaine scientifique

considéré [Vaillancourt et Gendron, 2007]. Actuellement, un consensus se profile autour d'une définition plus large [Vaillancourt, 1995 cité par André et al., 2003]: « *Un système organisé, dynamique et évolutif de facteurs naturels (physiques, chimiques, biologiques) et humains (économiques, politiques, sociaux, culturels) où les organismes vivants opèrent et où les activités humaines ont lieu, et qui ont de façon directe ou indirecte, immédiatement ou à long terme, un effet ou une influence sur ces êtres vivants ou sur les activités humaines à un moment donné et dans une aire géographique définie*. »

2.2 Impact environnemental

Un impact sur l'environnement peut se définir comme « *l'effet pendant un temps donné et sur un espace défini, d'une activité humaine sur une composante de l'environnement pris dans son sens large en comparaison de la situation probable advenant de la non-réalisation du projet.* » [Wathern, 1988 cité par André et al. 2003]. Cette définition nécessite d'être détaillée sur certains points.

Tout d'abord, à propos de la terminologie. Les termes « impact » et « effet » sont parfois utilisés comme synonymes. Tout comme André et al. (2003), nous définissons l'effet comme un événement qui est la conséquence objective de l'action envisagée (par ex, l'émission de x kg de CO_2). L'impact est la transposition subjective de cet événement sur une échelle de valeurs : il est le résultat d'une comparaison entre deux états : un état envisagé et un état de référence [André et al., 2003]. On dira donc qu'un impact est un effet jugé négativement.

Cette distinction de termes permet de soulever un autre point important de cette définition : les deux dimensions de l'impact, factuelle et normative. Définir un impact, c'est passer du factuel (l'effet) au normatif (effet jugé négatif). C'est passer de connaissances scientifiques à des considérations sociétales et politiques. Tous les effets que l'homme produit sur la nature ne sont pas considérés comme négatifs de prime abord. Par exemple, les paysages agricoles ne sont en général pas nécessairement jugés de comme des impacts sur la biodiversité. Au contraire des cultures OGM, qui sont souvent jugées négativement lors des débats [Bartz, Heink and Kowarik, 2009]. Mais selon Bartz, Heink and Kowarik (2009), la plupart de ces jugements émis reposent sur des valeurs souvent non explicitées. La détermination explicite de critères permettant de juger de la négativité ou de la

significativité d'un impact est pourtant peu présente dans la littérature, ce que ces mêmes auteurs soulignent.

Une autre question porte sur la définition de *« la situation probable advenant de la non-réalisation du projet [...] »*. La situation probable est l'état naturel. Mais qu'est ce qu'un état « naturel » dans un environnement changeant ? Sprugel (1991) a montré que dans certaines zones, il est quasi impossible de définir ou de prédire la végétation naturelle, car elle ne se stabilise pas au cours du temps. La situation probable, l'état naturel dépend donc d'un facteur temps. Plus l'échelle de temps est grande, plus la détermination de l'état naturel est difficile à prédire.

2.3 Les méthodes d'évaluation environnementale

Les méthodes d'évaluation environnementale sont des outils qui permettent la prise en compte de l'environnement dans la planification des opérations ou du développement de projets, de programmes, de plans ou de politiques [André et al., 2003]. Ces méthodes sont multiples, car elles vont dépendre des acteurs les utilisant (législateur, gestionnaire, scientifique) et de leurs objectifs. Payraudeau et van der Werf (2005) mettent six méthodes en évidence : l'environnmental risk mapping (ERM), l'évaluation des incidences sur l'environnement (EIE), le life cycle analysis (LCA), le multiple agent system (MAS), le multiple linear programming approach (LP) et les agro-environmental indicators (AEI). Nous en détaillerons deux, les plus souvent cités : l'évaluation des incidences sur l'environnement et l'analyse de cycle de vie [Tukker, 2000].

2.3.1 L'évaluation des incidences sur l'environnement [Tukker, 2000]

L'évaluation des incidences est une méthode pour estimer et évaluer les impacts environnementaux attribuables à l'implantation et la mise en œuvre d'un projet.

Son objectif est d'identifier, décrire et évaluer de manière appropriée, en fonction de chaque cas particulier, les effets directs et indirects, à court et long terme de l'implantation et de la mise en œuvre de projet sur :

1) l'homme, la faune et la flore ;

2) le sol, l'eau, l'air, le climat et le paysage ;

3) les biens matériels et le patrimoine culturel ;

4) l'interaction entre les facteurs 1) 2) et 3).

Les acteurs concernés par l'EIE sont essentiellement les entrepreneurs désireux d'installer un projet nécessitant un permis d'urbanisme, et les autorités locales. L'EIE suit une procédure légale qui diffère selon les pays et les régions.

L'EIE comprend les étapes suivantes :

- récolte des données sur le projet : matières premières utilisées, calendrier de la construction ;
- identification des émissions vers l'environnement. Outre les émissions de substances dans les divers compartiments environnementaux (eau, sol, air), cela comprend aussi les nuisances sonores et olfactives ;
- évaluation de l'état de l'environnement récepteur : sol, sous-sol, occupation du sol, milieux paysagers, faune et flore. Vérification de la présence de réserves naturelles, de point de captage d'eau souterraine, de site d'intérêt archéologique ;
- évaluation des impacts du projet sur l'environnement. Plusieurs méthodes existent. La méthode par compartiment évalue le projet à ses différentes phases de construction pour chaque compartiment environnemental. L'évaluation se fait sur base de critères législatifs (proximité de sites protégés, concentrations maximales de substances) et par des études locales de certains effets (effet des vibrations du charroi des machines de constructions, des odeurs émises…) ;
- recherches d'alternatives, de dispositifs de réduction ou de compensation.

2.3.2 L'analyse de cycle de vie

Définition

L'analyse de cycle de vie (LCA pour life cycle analysis) est un cadre méthodologique pour estimer et évaluer les impacts environnementaux attribuables au cycle de vie d'un produit, depuis l'extraction des matières premières, via la production et l'utilisation jusqu'à la gestion du déchet [Rebitzer et al., 2003 ; Finnveden et al., 2009].

Le but d'un LCA est l'évaluation et l'amélioration d'un bien, d'un procédé ou d'un service en termes de leurs impacts environnementaux potentiels.

Les acteurs utilisant le LCA sont essentiellement les industriels, pour la création d'un produit tenant compte d'impératifs écologiques dès le début de sa conception, mais aussi les gouvernements et les décideurs [Rebitzer et al., 2003].

Il y a quatre phases dans un LCA :

1) définition de l'objectif et du champ de l'étude ;
2) inventaire du cycle de vie (life cycle inventory (LCI)) ;
3) évaluation des impacts environnementaux (Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) ;
4) interprétation des résultats.

Trois types de LCA peuvent être distingués en fonction du temps et des moyens disponibles.

1) **Life cyle thinking** : L'inventaire est limité et souvent qualitatif. Cette approche permet une discussion qualitative dans le but d'identifier les étapes du cycle de vie et/ou les impacts environnementaux significatifs.
2) **LCA simplifié** : L'inventaire est détaillé, mais est semi-qualitatif ; des données génériques ou des bases de données standards sont utilisées (pour le transport ou la production d'énergie). Cette étude comporte généralement une analyse d'impact simplifiée qui est focalisée sur les catégories d'impacts environnementaux les plus importantes et/ou sur les étapes du cycle de vie principales.
3) **LCA détaillé** : l'inventaire est détaillé, quantitatif et basé sur des données spécifiques au produit étudié. L'analyse de l'impact du cycle de vie doit être réalisée pour tous les aspects environnementaux importants et le champ de l'étude est le résultat d'une procédure de définition itérative.

La distinction n'est pas nette, il y a un continuum du niveau détail et de qualité des données, qui dépend de l'objectif et des moyens de l'étude.

Historique

Les LCA datent du début des années 70. Leur objectif étaient de rendre compte de la consommation énergétique, considérée à cette époque comme prioritaire par rapport aux émissions de polluants.

C'est au début des années 90 qu'un véritable intérêt pour ces techniques LCA apparaît dans le monde industriel (Volvo, 3M, Philips, …), qui coïncide avec les premières publications scientifiques sur le sujet [Finnveden et al., 2009].

Le domaine des LCA a progressé de manière significative, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans la mise en application par les industriels, jusqu'à l'obtention d'une harmonisation par l'établissement de la série de normes ISO 14040 [Rebitzer et al., 2003 ;Finnveden et al., 2009]. Il y aussi une série d'initiatives internationales ayant pour but la promotion de la méthodologie LCA, notamment le « Life Initiative of the United Nations Environment Program » (UNEP), le « Society of Environmental Toxicology and Chemistry »(SETAC), le « European Platform for LCA » (EPLCA) de la Commission européenne et le « International Reference Life Cycle Data System » (ILCD) [Finnveden et al., 2009].

La méthodologie LCA

La première phase est la définition de l'objectif et du champ d'étude. Il y a deux catégories d'objectifs différents [Rebitzer et al., 2003 ; Finnveden et al., 2009].

- La description des flux entrants et sortants du cycle de vie et de ses sous-systèmes (LCA attributionnel).
- La description du changement des flux suite à une modification dans le système (LCA conséquentiel).

Les différences vont intervenir dans l'établissement des frontières du système ou dans des choix méthodologiques : définition de l'unité fonctionnelle, choix du type de données utilisées lors de l'inventaire (moyennes ou marginales).

L'unité fonctionnelle est une description quantitative de la performance de la fonction du procédé étudié. Dans le cadre d'un LCA comparé de sacs d'emballage [Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004], l'unité fonctionnelle est « 9000 litres de marchandise emballée dans un magasin carrefour », ce qui est une description quantitative de la performance de la fonction « emballer les courses d'un client pendant un an ».

L'unité fonctionnelle est traduite en une quantité de matière nécessaire pour obtenir une unité de la fonction. Le choix de cette matière définit le flux de référence. Ce flux de référence sera le point de départ pour construire le modèle du système du produit. Si l'on reprend l'exemple du LCA comparé de sacs d'emballage,

l'unité fonctionnelle définie plus haut correspond à 3,9 kilos de sacs plastique en polyéthylène haute densité.

$$\frac{9000\frac{L}{UF}}{14\frac{L}{sac}} * 0.00604\frac{kg}{sac} = 3.9\frac{kg}{UF}$$

Il est important de noter que la relation entre l'unité fonctionnelle et le flux de référence n'est pas toujours linéaire : il se peut que la production ou la demande ne soit pas élastique, ce qui signifie que la demande d'une unité fonctionnelle dans le cycle de vie investigué affecte non seulement la quantité produite de ce produit mais aussi son taux de consommation dans d'autres systèmes. [Rebitzer et al., 2003].

La deuxième phase de la méthodologie LCA est l'inventaire du cycle de vie. Celui-ci aboutit à la constitution d'une base de données répertoriant les quantités de matière et d'énergie entrantes et sortantes liées à la fonction générée dans le système du cycle de vie considéré.

La constitution de cette base de donnée est l'étape qui nécessite le plus de travail et de temps dans la méthodologie du LCA [Rebitzer et al., 2003]. Cette difficulté va de pair avec le détail et la qualité des données exigées. A chaque étape du cycle de vie correspondent des procédés de fabrication. L'obtention de données de ces procédés singuliers par lesquelles passent les flux de matières dans le système du cycle de vie serait extrêmement difficile et redondante, sans compter l'indisponibilité des données à caractère confidentiel. Plusieurs méthodes sont utilisées pour simplifier cette tâche, parmi lesquelles [Rebitzer et al., 2003].

- L'utilisation de base de données de procédés standard. Beaucoup de procédés sont similaires, tels l'approvisionnement en énergie, la production de métaux, de produits chimiques, le transport. Cette hypothèse de similarité permet d'éviter la récolte de données pour un procédé singulier.
- La suppression volontaire de certaines étapes du cycle de vie (en amont ou en aval).
- La simplification de certaines étapes du cycle de vie. Cette simplification consiste en une sélection préalable des procédés significatifs dans le cycle de

vie considéré, sur bases de conclusion d'études menées sur des produits similaires.

La base de données est accompagnée d'une documentation. La documentation fournit une description détaillée du procédé, ainsi que des informations sur la validité spatiale et temporelle des données. Il existe des bases de données issues d'initiatives publiques et d'initiatives d'industriels. Dans les initiatives publiques, Ecoinvent est le premier fournisseur mondial de base de données [http://www.ecoinvent.org]. Il est issu d'instituts de recherches suisses, notamment l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de l'Université de Zurich. Au nouveau international on retrouve notamment le « Life Initiative of the United Nations Environment Program » (UNEP) et le « European Platform for LCA » (EPLCA) de la Commission européenne. Dans les initiatives industrielles, l'association des fabricants de matière plastique en Europe a contribué à la constitution de base de données consultables publiquement [Rebitzer et al., 2003].

La troisième phase est l'évaluation des impacts du cycle de vie (life cycle impact analysis-LCIA). Le LCIA consiste en une série d'étapes :

1) sélection des catégories d'impacts et des indicateurs pour chaque catégorie d'impacts.
2) classification : attribution des données de l'inventaire aux catégories d'impact choisies.
3) caractérisation : calcul des indicateurs de catégorie d'impact grâce aux facteurs de caractérisation.
4) normalisation : calcul des résultats des indicateurs de catégorie relativement à une valeur de référence.
5) groupement ou agrégations des résultats.
6) analyse de la qualité des données.

Selon la norme ISO 14042, seules les trois premières étapes sont obligatoires, les trois dernières sont optionnelles [Pennington et al., 2004].

La sélection des catégories d'impacts est fonction des objectifs de l'étude et du produit étudié. Une catégorie d'impacts représente un processus clairement identifié, modélisé - sous-tendu par des hypothèses - pouvant être modifié par l'activité humaine et ayant des conséquences négatives.

Chacune de ces catégories se base sur un modèle, qui relie une cause (émission de CO2 fossile) à un effet (augmentation globale de la température). Les liens de causalité entre la source et l'effet sont proposés dans un scénario. Celui-ci est basé sur un set d'hypothèses consistant et reproductible sur les relations clé et les forces motrices. Il est formulé à deux niveaux. Sous la forme d'une histoire de manière qualitative, et sous la forme d'un modèle, exprimé en terme quantitatifs à partir d'une analyse formelle de l'histoire [IPCC, 2000].

Les différentes catégories d'impacts utilisées dans les LCA sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Catégories d'impacts utilisées dans les LCA avec des exemples d'indicateurs

Type	Catégorie d'impact	Exemple d'indicateurs	Unité	Source
Gaspillage des ressources	Ressources biotiques	Taux de régénération et stock		[1] [3]
	Ressources abiotiques	Réserves et taux d'extraction	mg éq.SB	[1] [3]
Pollution	Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement global Effet sur la santé humaine	kg éq.CO2	[1] [3]
	Diminution de la couche d'ozone	Dégradation de la couche d'ozone Augmentation des cancers humains	kg éq. CFC-11	[1] [3]
	Toxicité humaine	Cancer et facteurs respiratoires	DALY	[1] [3]
	Écotoxicité	Seuil d'écotoxicité légal Contribution à l'extinction d'espèces	PNEC	[1] [3]
	Formation d'oxydants photochimique	Augmentation d'ozone au niveau du sol.	g éq. C2H2	[1] [3] [2]
	Acidification atmosphérique	Potentiel d'acidification	g éq. H+	[1] [3]
	Eutrophisation aquatique	Augmentation de la biomasse aquatique		[1] [3]
	Eutrophisation terrestre	Capacité de croissance du bois		
	Chaleur		MJ	[1]
	Nuisances	Ionisation Odeur Bruit	DALY	[1] [3]
	Production de déchets			[2]
	Utilisation des sols			[3]

DALY : disability adjusted life year : espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI) : mesure du nombre d'années passées en bonne santé.

PNEC : predicted no effect concentration
éq : équivalent
[1] = Tukker, 2000
[2] = Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004
[3] = Pennington, 2004

L'étape de caractérisation est le calcul des indicateurs de catégorie d'impacts grâce aux facteurs de caractérisation. L'indicateur est calculé de la façon suivante :

$$indicateur = \sum_s f_s \times Q_s$$

Où :

Symbole	Signification
f_s	Facteur de caractérisation de la substance « s »
Q_s	Quantité spécifique d'une substance « s » émise

Les facteurs de caractérisation sont issus des modèles construits pour estimer l'impact environnemental. La contribution des gaz au réchauffement climatique est notamment évaluée par l'indicateur appelé « potentiel de réchauffement climatique » (Global Warming Potential) exprimé en équivalent CO_2. Le facteur de caractérisation 1 kg de gaz méthane est de 23 $kg_{éq.CO2}$.

Comparaison entre le LCA et l'EIE

La grande différence entre ces deux méthodes d'évaluation environnementale réside dans la manière dont elles évaluent les impacts locaux. L'EIE évalue les impacts de manière locale, singulière, géographiquement situé et contextualisé. La sensibilité du milieu externe adjacent au projet est prise en compte. De par sa singularité du projet étudié, il est en général difficile de comparer deux EIE de projets similaires, à causes des contextes locaux différents. Le LCA évalue les impacts sur base d'indicateurs, qui sont des constructions issues du modèle général, indépendant des conditions locales. La méthodologie standardisée par l'ISO rend possible la comparaison de produits entre eux [Tukker, 2000].

2.4 Aspects environnementaux de la production d'huile palmiste et de savon

Les catégories d'impacts liées à la production du savon FOMULAC seront détaillées dans la section bilan environnemental. Les hypothèses concernant la situation de

la production d'huile de palme et d'huile palmiste africaine, ainsi que l'écotoxicité du savon sont détaillée ici bas.

2.4.1 Impacts environnementaux de la production d'huile de palme

L'huile palmiste est extraite de l'amande de palme, sa production est liée à la production d'huile de palme. La situation africaine de la production d'huile de palme et d'huile palmiste est peu documentée, mais peut être approchée par la situation en Indonésie-Malaisie, Avec 13,4 millions de tonnes par an pour 23.5 millions de Malaisiens, la production d'huile de palme est responsable de 3,5 % de l'impact environnemental total de la Malaisie. Cette production est un facteur d'impacts important dans les régions d'Asie du sud-est pour plusieurs catégories :

- La consommation de ressources fossiles, dont la principale cause est la production des fertilisants de synthèse [Yusoff et Hansen, 2007].
- L'impact sur le réchauffement climatique est causé majoritairement par les fertilisants de synthèse azotés provoquant des émissions de N_2O durant leur application et d'autres gaz à effet de serre lors de leur production [Wicke, 2007 ; Jayed et al., 2009].
- La déforestation et d'appauvrissement dont la principale cause est le changement de l'utilisation des sols pour la culture du palmier à huile. La qualité des sols des forêts tropicales est dégradée de manière irréversible par la mort de la faune microbienne au soleil, le lessivage des minéraux par les tempêtes et les inondations [Jayed et al., 2009].
- L'impact sur la santé humaine dû à la combustion des co-produits de l'huilerie de palme produisant des substances cancérigènes [Yusoff et Hansen, 2007].

En ce qui concerne l'Afrique, les impacts causés par l'utilisation de fertilisants et par la dégradation des sols sont supposés non pertinents. En effet, les conditions d'exploitation sont très différentes : en 43 ans, la surface de culture de palme en Afrique a augmenté de 3,4 millions d'ha en 1961 à 4,3 en 2004, alors que, dans le même intervalle, la surface de culture de l'ensemble Indonésie-Malaisie a augmenté de manière considérable, passant de 0,15 millions d'ha à 6,7 millions

[Dronne, 2005]. Les rendements sont d'un autre ordre de grandeur : 15 à 20 T d'huile par hectare en Asie contre 4 T en Afrique [Dronne, 2005].

2.4.2 Ecotoxicité du savon dans les eaux de surface

Les savonneries produisent généralement de petites quantités d'eaux usées, mais celles-ci peuvent causer des impacts locaux dans les eaux avoisinantes. Les principaux problèmes causés par le savon sont [Gawad et Shafy, 2002] :

1) Interférence avec le transfert d'oxygène ;
2) Production de mousse ;
3) Ecotoxicité ;
4) Difficulté au niveau du traitement des eaux usées.

Nous avons trouvé peu d'informations sur l'écotoxicité du savon dans la littérature. Une étude a déterminé les concentration seuils (predicted no effect concentration, PNEC) dans le compartiment aquatique de plusieurs surfactants et les a comparés aux concentrations environnementales prédites (PEC) de ces substances pour la région des Pays-bas [van de Plassche et al., 1999]. Le savon a une toxicité plus aigüe que des détergents tel l'alkylbenzène sulfonate, leurs PNECs étant respectivement 27 et 250 mg/L. L'étude a montré que le PEC du savon était du même ordre de grandeur que le PNEC, mais qu'en considérant la toxicité chronique, les risques pour le compartiment aquatique étaient faibles.

3 Contexte du mémoire : la savonnerie FOMULAC-Katana, province du Sud Kivu

3.1 La République Démocratique du Congo (RDC) et le Sud-Kivu

Le Congolais vit dans des conditions difficiles, d'autant plus qu'il est engagé dans un cercle vicieux, tant au niveau individuel (manque d'autonomie et d'éducation), local (manque de services et d'infrastructures de base, insécurité, insalubrité) et étatique (corruption, mauvaises orientations économiques). Néanmoins, si ces conditions n'en rendent la tâche que plus difficile et valeureuse, beaucoup de Congolais sont conscients qu'elles ne leur enlèvent pas la responsabilité de

construire leur avenir. Une brève analyse du contexte géographique, politique et sociodémographique permettra de mettre en évidence ces conditions particulières.

3.1.1 Contexte géographique

La République Démocratique du Congo est située en plein centre de l'Afrique, à cheval sur l'équateur. Sa superficie est de 2.345 000 km^2 (76 fois la Belgique). Sa taille, couplée à un manque d'infrastructures de transport et de communication, rend les échanges et le transport de biens et de personnes extrêmement difficiles.

Parmi ses onze provinces, le Sud-Kivu (Figure 1) est situé à l'extrême Est du pays et couvre une superficie de 65.000 km^2 (deux fois la Belgique). Il partage ses frontières avec le Rwanda, le Burundi et la Tanzanie.



Figure 1 : Carte de la RDC
[http://www.rfi.fr/sciencefr/images/092/carte_rdc_provinces2006_432.jpg]

Le climat de la RDC varie fortement selon la localisation. Celui du Kivu est un climat tropical humide et compte neuf mois de pluie pour trois mois de saison sèche (répartie sur janvier et juillet) [http://www.congonline.com].

La population nationale avoisine les 70 millions d'habitants et regroupe une multitude d'ethnies de multiples origines culturelles et linguistiques. Trois quarts de la population congolaise vit en milieu rural. La province du Sud-Kivu abrite une population estimée à 4,5 millions habitants [http://www.tlfq.ulaval.ca/axl/afrique/czaire.htm].

3.1.2 Contexte historique et politique

Depuis son accession à l'indépendance en 1960, la politique en RDC a mis du temps à se stabiliser jusqu'à nos jours. La décolonisation est improvisée : « À

l'inexpérience des leaders s'ajoutent des rivalités de compétences, des pratiques politiques différentes et surtout une forte interférence extérieure » [Tshonda, 2010].

Le long règne de Mobutu (1965-1997) se caractérise par une gestion présidentielle, monopartiste et despotique. Elle est entravée par une série de tentatives de sécession, entraînant des guerres civiles [Tshonda, 2010].

A partir de 1997, 3 guerres se sont succédé, ayant chaque fois pour origine la région du Kivu : la première et la deuxième guerre du Congo (1996-1997 et 1998-2002) et la guerre du Kivu (2004-2009). Le bilan est lourd : 4 millions de morts.

L'arrivée au pouvoir de Kabila en 2006, élu démocratiquement, marque le début d'une stabilisation : à l'heure actuelle, il n'y a pas de conflit armé ouvert. Mais en zone rurale, les populations font face aux pillages et viols qui continuent à être commis par des bandes armées (notamment les Hutus rwandais responsables du génocide de 1994) malgré le renforcement du mandat de la MONUC (Nations Unies) depuis 2003. « La violence est en effet restée la principale réalité sociale, se substituant à toute action politique dans le pays. » [Willame, 2008]. Il est pourtant nécessaire de nuancer : l'est de la RDC n'est pas une énorme « zone rouge » dans laquelle le moindre déplacement est dangereux. En 2005, 6 zones[1] sur 7 sont dans une situation propice au développement, contre seulement 1 zone en situation d'urgence [Dewitte, 2006].

Outre la violence, la corruption est aussi un facteur non négligeable de déstructuration se déroulant à tous les niveaux de pouvoir. En favorisant les riches et les puissants, l'état réduit sa capacité à fournir un réseau social sécuritaire [UNDP, 2004].

Si ces violences et la déstructuration de l'état ont des causes multiples et complexes, leurs conséquences sont visibles tant sur les structures sociales, que l'économie et les systèmes de santé.

3.1.3 Contexte sociodémographique

Après ces dizaines d'années de crise humanitaire pendant lesquelles les interventions dites « d'urgence » se sont succédé sans discontinuer, les réflexes humanitaires sont fortement ancrés dans les esprits locaux, qui perdent leur

[1] Zone de santé : division administrative basée sur l'accès aux soins de santé.

autonomie (LD 27 ¾). Cette mentalité est décrite par Sophie Gaye, une ex-responsable de la zone RDC pour Louvain Coopération au Développement (LD) : « *Le principal obstacle est l'attentisme des populations du Sud : c'est là un immense frein, profondément ancré dans la structure mentale des individus. Ils ne cherchent par conséquent pas à consolider un certain nombre de choses, à reconstituer leur capital productif ; ils se disent qu'en tous les cas, les blancs les aideront !* » [http://www.ath.be/].

En 2008, la RDC présentait un IDH[2] de 0,361 (comparé à 0,948 pour la Belgique) [PNUD : www.hdr.undp.org], reléguant le pays au 177e rang mondial avec un développement humain caractérisé comme faible. L'espérance de vie à la naissance est de 46,1 ans.

Le niveau d'éducation en RDC est particulièrement faible, le taux d'inscription dans l'enseignement secondaire est de 33,4 % [nombre de personnes inscrites/100*nombre total de personnes appartenant à la classe d'âge pertinente] [http://www.etatdumonde.com/] et de seulement 4,1 % pour l'enseignement supérieur. En effet, l'état ne rémunérant plus ou très peu les enseignants, cette responsabilité échoit aux parents.

La situation économique est alarmante, le pays étant en crise depuis 1975. Le PIB par tête atteindrait à peine 281 $ (pour 33.243 $ en Belgique) faisant de la RDC un des pays les plus pauvres au monde.

Le contexte sanitaire est lui aussi alarmant. Depuis plus de deux décennies, les formations sanitaires de la RDC en général et celles du Sud-Kivu en particulier n'ont pas bénéficié des subsides de l'Etat et dépendent principalement des appuis extérieurs [Louvain Développement, 2008]. La conséquence en serait une baisse de la qualité des soins « publics » et une privatisation des soins de qualité dirigée vers les patients solvables, excluant une grande partie de la population. Cette baisse de qualité se traduit par la détérioration des services sanitaires et sociaux, le manque d'infrastructures et de ressources humaines. A cela se rajoutent d'autres difficultés : accès difficile à l'eau potable, réémergence de maladies endémiques ou

[2] L'Indice de Développement Humain fut proposé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) comme indicateur alternatif au PIB afin d'outrepasser la dimension purement économique et d'intégrer le bien-être en vue de mesurer le niveau de développement humain dans les différents pays du monde. Il est compris entre 0 et 1 et se calcule par la moyenne de trois indices quantifiant la santé/longévité, le savoir ou le niveau d'éducation ainsi que le niveau de vie.

épidémiques (paludisme, VIH/SIDA, etc.) ainsi que des maladies chroniques (diabète, hypertension, etc.).

3.2 Le Site FOMULAC-Katana

3.2.1 Historique

1926 : Création de la FOMULAC : Fondation Médicale de l'Université de Louvain en Afrique Centrale, ASBL de droit belge. Elle a pour objectif la dispense des soins de santé primaire, la formation du personnel médical et paramédical et la recherche en matière de santé publique.

1928 : Construction de l'Hôpital de Katana, sur un site d'une superficie approximative d'1km^2, au bord du Lac Kivu, à 55 km au Nord de Bukavu (Est de la RDC). Outre l'hôpital, le site dispose de quoi vivre en autarcie : centrale hydroélectrique, ateliers, menuiserie, habitations, cultures, … Cet hôpital joue un rôle pionnier et sert de modèle en Afrique dans le développement des soins de santé primaires. La zone de santé FOMULAC-Katana s'étend sur 1200 km^2 où vit une population d'environ 300.000 habitants [Louvain Développement, 2008].

1997 : FOMULAC et 6 ONG dont la création émane de l'Université Catholique de Louvain (UCL) se regroupent pour former Louvain Coopération au Développement (LD). Mais le nom du site est conservé, car « FOMULAC » est devenu un nom symbolique, évocateur pour les populations locales.

2004 : Cession du complexe de Katana par LD à l'Archidiocèse de Bukavu qui assure l'administration du site.

2004 : Création de la savonnerie.

3.3 La Savonnerie FOMULAC

3.3.1 Objectifs

Comme énoncé plus haut, les patients peinent à contribuer financièrement à leurs soins et c'est tout le système des soins de santé qui se trouve menacé.

La Savonnerie FOMULAC a été créée en 2004 sur le site FOMULAC-Katana avec l'aide de LD et ce avec 3 objectifs :

- Le financement de l'achat des médicaments en faveur des formations sanitaires pauvres des Zones de santé de Katana, Kalehe et Miti-Murhesa au Sud-Kivu.

- L'autonomie financière totale.
- L'amélioration du niveau d'hygiène de la population rurale dans une zone soumise à de fréquentes épidémies de choléra, par l'apport d'un savon bon marché.

3.3.2 Le rôle de Louvain Coopération au Développement

LD se positionne comme une ONG de développement dans une zone en transition après des conflits. Sa stratégie se base sur un partenariat avec des acteurs locaux (dans ce cas l'Archidiocèse de Bukavu et la savonnerie FOMULAC) chargée de l'exécution des activités du projet pour les bénéficiaires finaux. En tant qu'ONG locale, LD assure l'appui technique de ces acteurs locaux, renforce leurs capacités institutionnelles et structurelles ainsi que la compétence des ressources humaines ; en tant qu'ONG internationale, elle assure aussi l'interface entre les associations locales et les bailleurs de fonds internationaux.

Pour LD, le terme « développement » se traduit par « *un engagement solide et durable aux côtés des populations locales dans un processus de changement social permettant d'améliorer durablement leur capacité à subvenir à leurs besoins essentiels* ». L'installation d'un processus de changement social prend énormément de temps, surtout dans une zone postconflit ! Pour cette raison, la majorité de leurs programmes se déroule sur une durée de 3 à 6 ans, (par comparaison, de 3 à 9 mois pour les urgentistes) [Dewitte, 2006]. La savonnerie reflète donc un excellent exemple d'une action de développement réussie, ayant acquis une dynamique propre.

La responsabilité environnementale comme nouvel objectif

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet « l'économie au service de la santé : renforcement de l'impact social et de la responsabilité environnementale d'une savonnerie à finalité sociale au Sud Kivu (RDC) », qui est financé par la Région Wallonne. Les objectifs de ce projet sont les suivants :

- *La diversification de la gamme des produits, amélioration de la productivité et de la compétitivité de la savonnerie.*
- *La rationalisation de la production de l'huile de palme et palmiste dans les villages d'approvisionnement.*

- *Le renforcement institutionnel ainsi que l'amélioration des procédures de gestion en adoptant également des normes visant le respect et la protection de l'environnement dans la mise en œuvre des activités de la Savonnerie* [Louvain Développement, 2008].

Ce dernier point illustre le souci de cohérence des objectifs de la savonnerie, dont les finalités sociales et économiques sont désormais conçues comme non exclusives et interdépendantes à la finalité environnementale, ceci dans une visée de développement durable.

3.3.3 Description de l'entreprise

La Savonnerie FOMULAC comprend 3 blocs de bâtiments. Ces bâtiments comprennent les bureaux, l'atelier, les stocks de matière première, l'unité de production huilerie et l'unité de production savonnerie pour une surface au sol de 480 m^2. La savonnerie dispose de deux véhicules : un 4X4 et un camion pouvant charger 7T.

Elle produit principalement du savon de « lessive », qui sert de savon à multiple usage : lessive, vaisselle, toilette. La production de savon en barre ou de savon de toilette ne date que de quelques mois et en est à ses balbutiements.

Elle emploie à peu près une vingtaine de personnes réparties dans les services suivants : direction, comptabilité, marketing, responsable inventaire, responsable procédé, responsable caisse, ouvrier. Le Tableau 2 regroupe quelques chiffres permettant de donner une idée de l'ordre de grandeur.

Par son activité, la savonnerie a un impact bénéfique sur l'économie de la région (achat de matière première locale, création d'emploi, …)[Dewitte, 2007]. L'appui de la Savonnerie FOMULAC aux formations sanitaires ciblées a été de 5.000 $ en 2006 et 10.000 $ en 2007. Cette contribution demeure cependant minime par rapport aux besoins de plus de trente centres de santé et trois hôpitaux du district (moins de 10 % des besoins annuels estimés à plus ou moins 100.000 euros) [Louvain Développement, 2008].

Tableau 2 : Chiffres clés de la savonnerie

Fonctionnement	24h/24, 7j/7.
Personnel (2006)	22 personnes
Production mensuelle moyenne de savon de lessive (2007)	18.7 tonnes
Chiffre d'affaire mensuel moyen (2007)	18.980 $
Bénéfice mensuel moyen donné à la zone de santé (2007)	830 $

3.3.4 Description du procédé

Le flowsheet simplifié de l'ensemble des procédés est donné dans la Figure 2. Il sera détaillé et complexifié par la suite.

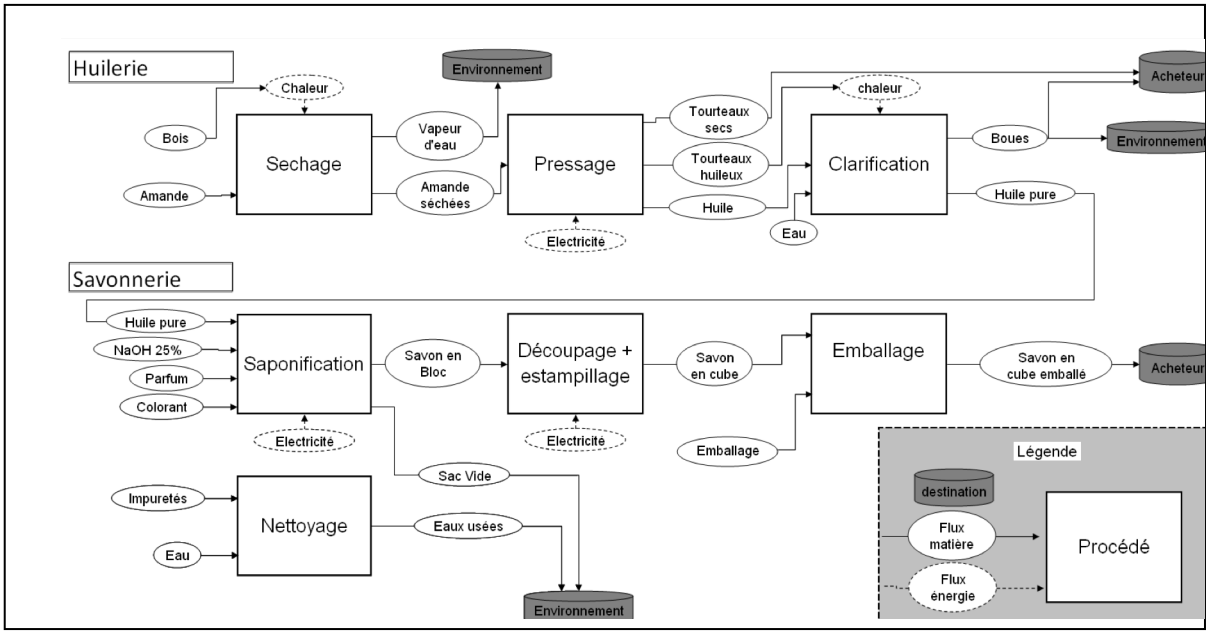


Figure 2: Flow-sheet simplifié de l'ensemble du procédé

Huilerie

Transport et stockage des amandes

Les amandes sont des sous-produits de la production de l'huile de palme, qui est réalisée dans des installations artisanales implantées dans les territoires de Kasika et Bunyakiri (à plus de 70 km de la savonnerie). Les amandes provenant de ces territoires couvrent 80% de l'approvisionnement. Elles proviennent parfois du Nord Kivu.

Ces amandes ont préalablement été extraites manuellement de leur coque par des villageois aux alentours des sites de production de l'huile de palme. Elles sont acheminées par camion vers la savonnerie, puis transportées manuellement par des ouvriers à l'aide de sacs, pour être stockées sur un pavement cimenté d'un hangar couvert de tôles (Figure H1). Les amandes sont donc achetées par lot, vont dans le stock, et rentrent par batch dans le séchoir. Pour chaque lot d'amandes (5 à 7 T), il y a environ entre 4 et 5 batches de séchage (1,3 T/batch).

Séchage

Le séchage a notamment pour but de rendre possible le pressage de l'amande* en diminuant sa teneur en eau afin de créer une adhérence avec le fourreau, ce qui lui évite de tourner avec les vis sans avancer [Carlier, 2003].

Du lieu de stockage, les amandes sont transportées sur une conduite semi-ouverte (Figure H2) jusque dans un séchoir fonctionnant au bois de chauffe (Figure H3). Cette installation est constituée de deux étages. L'étage inférieur est transpercé par 4 conduites métalliques creuses (Figure H4). La chaleur passe à travers ces conduites depuis les foyers situés à l'extérieur, alimentés par du bois de chauffe. Cette chaleur diffuse par convection naturelle vers une tôle perforée séparant les deux étages et sur laquelle sont étalées les noix en séchage. La capacité maximale est d'environ 1.500 kg, pour une durée approximative de 7 h, à raison de maximum 2 batches de séchage par jour.

Par temps sec et ensoleillé, une partie des amandes est étendue sur des bâches et séchée au soleil.

Pressage

Une fois séchées, les amandes sont récoltées par des truelles, puis descendues par une conduite dans un bac calibré à 470 kg.

De là, elles passent dans la presse à huile (moteur électrique de 18.5 kW) (Figure H5). L'huile qui en sort passe par un filtre, mais contient toujours une grande quantité d'impuretés. Cette huile pré-filtrée est appelée huile palmiste brute (HPB). Le cake de filtration est appelé tourteau palmiste huileux (TPH). De cette presse à huile sort aussi le tourteau palmiste sec (TPS) revendu aux éleveurs pour l'alimentation de leur bétail.



Figure H1: Stock d'amande



Figure H2 : Chargement des amandes du stock vers le séchoir



Figure H3 : Séchoir : vue extérieur de l'étage inférieur

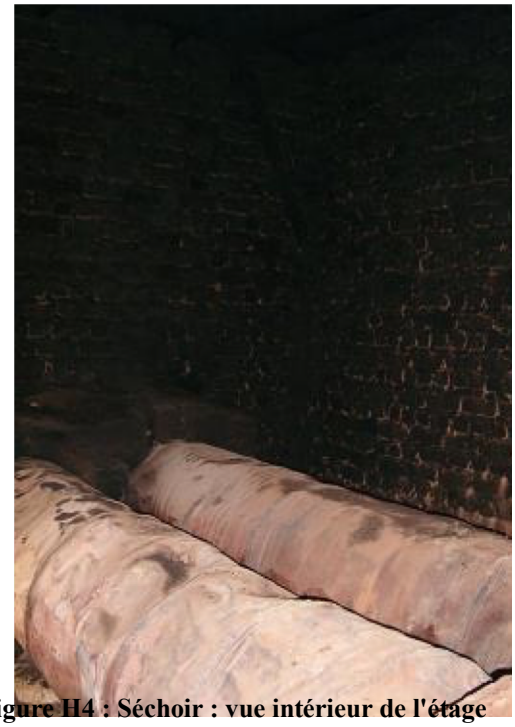


Figure H4 : Séchoir : vue intérieur de l'étage inférieur



Figure H5 : Presse en fonctionnement



Figure H6 : Clarification : huile brute en cours de chauffage



Figure H7 : Clarification : récupération de l'huile palmiste pure



Figure H8 : Clarification : boues

Clarification

L'huile brute est récoltée dans une bassine, puis transportée manuellement jusqu'aux fûts de clarification, d'une contenance de 200 L. De l'eau est préalablement rajoutée. Le tout est porté à ébullition, par la combustion des tourteaux huileux (Figure H6) qui se déroule sous le fût surélevé par des parpaings. Cela dans le but d'obtenir une convection d'eau dans l'huile permettant le transfert des matières en suspension présentes dans l'huile. Ce chauffage permet aussi de diminuer la viscosité de celle-ci, dont le point de fusion est à 27°C [Young, 1983]. Dès que le mélange entre en ébullition, la combustion est stoppée par le versement d'un seau d'eau sur le foyer. Les particules sédimentent dans le fond pendant la décantation qui dure environ 30 minutes et l'huile palmiste pure (HPP) surnageante est récupérée manuellement à l'aide de vieux bidons (Figure H7). Une fois toute l'huile surnageante enlevée, il ne reste dans le fond du fût qu'une boue

très visqueuse (Figure H8). Selon les opérateurs et la disponibilité des fûts, les boues sont soit stockées dans des fûts, soit directement rejetées dans une rigole d'évacuation avec un flux d'eau du robinet. Cette rigole déverse son contenu dans la rivière qui se déverse dans le lac, ± 1 km en aval. Une partie des boues stockées (~20 %) est fournie à la porcherie voisine.

Savonnerie

Procédés utilisés

Il y a 2 procédés de saponification utilisés dans la savonnerie : le procédé de saponification à froid, et le procédé de saponification à semi-ébullition.

Le premier permet d'obtenir un savon de lessive à partir de l'huile palmiste, alors que le deuxième est destiné à l'obtention d'un savon de toilette et de barre de savon, à partir d'huile de palme. Ce dernier procédé étant encore dans une phase d'essai, nous nous concentrerons essentiellement sur la production de savon de lessive.

Stockage de l'huile

L'huile provenant de la clarification est stockée dans une cuve. Cette cuve dispose d'une résistance pour le chauffage mais est rarement utilisée en pratique, les huiles conservant la chaleur acquise lors de la clarification.

Préparation de la soude caustique

La solution de soude caustique est préparée manuellement dans des demi-fûts (100 L) coupés longitudinalement, et le titre de la solution est vérifié par l'utilisation d'un densimètre. La réaction est très exothermique, la température avoisine les 100 degrés. Pour le procédé à froid, on attend le refroidissement de la solution, alors que dans le procédé à semi-ébullition, elle est versée chaude.

Saponification à froid

La saponification à froid se déroule dans un réacteur d'une capacité de 400 L (Figure S1). L'huile est versée en premier, et ensuite la solution de soude caustique, ainsi que le colorant et les huiles essentielles. Après 20 minutes, le mélangeur est stoppé, et le mélange liquide est déversé dans des moules parallélépipédiques (préalablement huilés et colmatés avec un mastic fait à base

des résidus de savon). Dans les moules, la réaction exothermique continue de se dérouler pendant quelques heures. Le déroulement de la réaction est surveillé par l'estimation de la température de la masse de savon, qui atteint un maximum puis commence à baisser au fur et à mesure que la masse de savon se solidifie.

Découpage et estampillage

Les blocs de savon sont ensuite démoulés, raclés en surface avant d'être débités sur une table de découpage pour obtenir des cubes de savons. Ceux-ci sont ensuite estampillés par une presse hydraulique fonctionnant avec un compresseur électrique (Figure S2). Lors des opérations de découpage du savon, les copeaux et poudres formées (déchets) sont stockées pour être vendues. Une partie de ces copeaux est réutilisée pour colmater les moules et une partie qui tombe sur le pavement passe dans l'évacuation des eaux usées.

Stockage et emballage

Les savons sont stockés sur des étagères pendant 3 à 4 jours afin de les sécher, puis emballés par paquets, dans des sachets plastiques ou des boîtes en cartons.

Saponification à semi-ébullition

La saponification à semi-ébullition est encore à son stade expérimental. Elle utilise l'huile de palme comme réactif, mais des essais sont effectués avec de l'huile palmiste. L'huile de palme est chauffée dans un fût, jusqu'à sa décoloration. La soude est déversée chaude (augmentant la vitesse de réaction) et à la fin de la réaction (qui dure entre 20 à 30 minutes) le mélange est versé sur le pavement cimenté pour un refroidissement rapide du savon. Une fois refroidi, le savon est découpé en plaques transférées dans un mixer (où elles sont colorées et parfumées) avant de passer dans une boudineuse.

Récolte des eaux usées

Les eaux usées sont récoltées des différentes pièces par des sterfputs, et sont déversées dans une rigole aboutissant à la rivière, canal de dérivation des eaux du barrage hydroélectrique, se jetant dans le lac à moins d'un kilomètre en aval.

Stockage des déchets

La plupart des déchets plastiques (sacs, emballages, bidons usés, …) sont enfouis dans un trou d'approximativement 5 m. de profondeur, dans l'enclos compris dans la savonnerie. Ce sont des matériaux (supposés) inertes, qui ne sont pas traités.



Figure S1: Saponification: réacteur

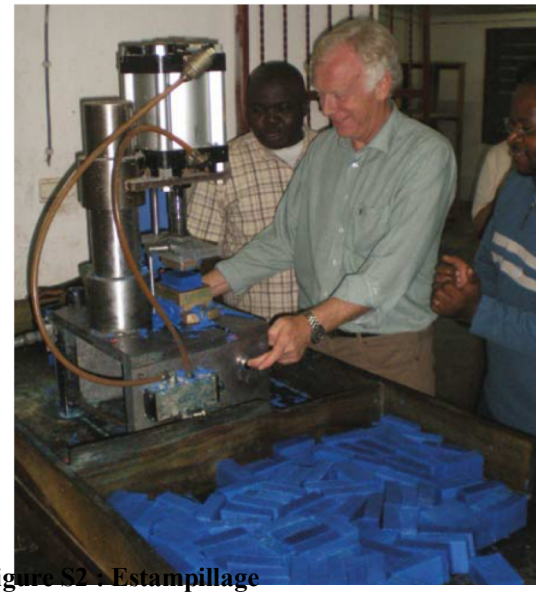


Figure S2 : Estampillage

3.3.5 Contraintes de fonctionnement

Approvisionnement en matière première

D'un point de vue quantitatif, l'offre des amandes dépend des producteurs-fournisseurs. Localement, ils sont peu nombreux : seulement deux territoires (Kasika et Bunyakiri) sont concernés par la mise en place des associations des producteurs de palmier à huile. L'approvisionnement est constant tout au long des saisons.

En cas d'insécurité, les populations fuient des zones d'exploitation vers leurs villages, et l'accès à ces zones devient problématique [Louvain Développement, 2008].

D'un point de vue qualitatif, les lots d'amandes achetés sont variables, que ce soit par leur taux d'humidité ou leur taux de contaminants. Leur description sera détaillée dans la section Matériel et Méthode.

Moyen de communication

Le transport de la matière première et du produit fini est problématique, pour de multiples causes :

- La possession d'un camion fonctionnel : facteur essentiel pour l'autonomie de la savonnerie. Durant la période de stage, le dernier camion était hors service, la quantité d'amandes achetée était deux fois inférieure aux quantités moyennes observées. D'autre part, le camion peut être réquisitionné de force par l'armée.
- L'état du réseau routier : catastrophique en RDC, puisqu'il n'est quasi pas entretenu depuis la décolonisation. Le Sud-Kivu ne fait pas exception, la route reliant Bukavu à Katana est restée longtemps sans le moindre entretien, dénuée de revêtement ; véritable champ d'ornières et de nids de poule mettant les essieux à rude épreuve, se transformant en bourbier impraticable en cas de pluie. Elle est actuellement en cours de chantier.
- L'insécurité permanente sur les axes routiers [Louvain Développement, 2008].

Pressions et incertitudes économiques

Depuis les dernières élections, l'état congolais a poursuivi son adhésion à des accords de libre échange mais sans assurer la protection de la production locale. En conséquence, le savon importé auprès des firmes multinationales inonde très souvent le marché local à des prix plus bas que ceux pratiqués par les producteurs locaux [Louvain Développement, 2008].

De plus, la demande chute dans des conditions d'insécurité, occasionnée par l'inaccessibilité de certains villages et centres d'écoulement de savon.

La demande a baissé au début de l'année 2009 à cause d'une récession générale frisant la panique dans le monde des affaires, consécutive à la triple crise alimentaire, financière et économique [Louvain Développement, 2008].

Gestion des ressources humaines

La gestion des ressources humaines est problématique.

D'une part, la plupart de la main-d'œuvre de la région est sous-qualifiée (voir contexte sociodémographique). Certains ouvriers sont incapables d'effectuer un

simple calcul. Leur autonomie est donc très limitée à des consignes claires et simples. Ils travaillent par équipes, encadrés par un ouvrier plus expérimenté.

D'autre part, le faible salaire (le salaire moyen est de 27 dollars par mois [http://www.etatdumonde.com/]), les conditions de travail difficiles, induisent une démotivation, une passivité et une possible tendance au vol. La création d'une relation de confiance qui va de pair avec l'expérience, est donc primordiale.

Contraintes techniques

Le matériel utilisé est vieux d'une génération, sa réparation demande des pièces qui ne sont pas facilement disponibles. De plus, il n'y a pas d'appareils de contrôle qualité, que ce soit pour vérifier les taux d'impureté d'humidité ou d'huile des amandes.

L'alimentation en électricité à la FOMULAC-Katana est une exception dans le Kivu, et même dans toute la RDC, puisque, même dans les grandes villes, les coupures sont fréquentes. Mais à cause de la vétusté des installations (vieilles de 80 ans !), des problèmes récents au niveau du disjoncteur ont empêché la savonnerie de fonctionner pendant plus de deux semaines. De plus, l'électricité est fournie par la centrale hydro-électrique de la concession FOMULAC-Katana, d'une puissance de 112 kW. La priorité étant donnée à l'hôpital, la savonnerie ne peut utiliser la presse électrique qu'à partir de 22h, jusque 6h le matin. Sauf les samedis et dimanches, de 14 à 17h.

L'étape limitante est l'estampillage ; il n'y a qu'un seul compresseur disponible, et une augmentation hypothétique de la production ne sera permise que par l'achat d'une machine supplémentaire.

Budget et finances

Le budget est serré, dû au faible fonds de roulement, dont une des causes est le mauvais paiement des clients.

Cela se traduit par une difficulté à investir dans du nouveau matériel (ex : achat de machine pour la nouvelle ligne de production, achat d'un camion) et impose une gestion des stocks irréprochable pour ne pas se retrouver à cours de liquidités.

Ce point est d'une importante particulière pour la savonnerie, pour qui l'autonomie financière est un de ses objectifs principaux.

Normes environnementales

Nos recherches sur le droit environnemental en RDC sont restées très lacunaires : un passage assez vague concerne le rejet des eaux usées :

« *Il est interdit de laisser couler des liquides dans les sources, lacs et cours d'eau, d'y jeter ou d'y déposer des matières ou de provoquer des émanations gazeuses pouvant corrompre ou altérer les eaux.*

Tous les effluents industriels, domestiques et autres doivent se conformer aux normes de rejets des eaux usées. Les normes de rejet des eaux usées sont fixées par voie réglementaire. »[3]

Au vu du contexte général énoncé plus haut, il nous semble que si les normes mentionnées existent (nous n'avons pas pu les trouver), elles ne sont sans doute pas appliquées. Néanmoins, et outre le fait que la responsabilité environnementale est désormais une des finalités de la savonnerie, les normes environnementales deviennent aussi une contrainte en tant que critère pour les bailleurs de fonds (dont la région Wallonne fait partie).

[3] Article 29, Section 1, Chapitre 2: De la protection de la qualité des eaux.

Chapitre II : Objectifs et démarche

Les dirigeants de la savonnerie FOMULAC sont conscients du fait que l'activité de cette entreprise peut avoir une incidence sur l'environnement. C'est pourquoi la meilleure gestion environnementale du site figure parmi les trois résultats à atteindre par le projet cofinancé par LD et la Région Wallonne.

Un premier objectif de ce travail était d'évaluer les impacts environnementaux de la savonnerie FOMULAC. Un second objectif est de proposer des solutions permettant d'améliorer les performances environnementales de la savonnerie.

Pour atteindre les objectifs fixés, nous avons opté pour une démarche qui se rapproche de celle de l'analyse du cycle de vie. Dans un premier temps, l'ensemble des processus et des flux a été répertorié. Pour cela, nous avons d'abord établi le flow-sheet complet et détaillé de la savonnerie, afin de permettre l'inventaire, la quantification et la caractérisation de l'ensemble des flux de matière et d'énergie entrants et sortants du site.

Les données manquantes ont ainsi pu être identifiées, de même que les flux à échantillonner. Nous avons élaboré les procédures d'échantillonnage jugées les plus adaptées aux circonstances et nous les avons mises en œuvre dans une campagne de caractérisation des matières et de mesure des flux sur le site de la savonnerie FOMULAC. Les données issues de ces mesures ont soulevé des questions quand à leur cohérence, et une partie de notre travail a donc porté sur leur validation.

L'ensemble des données récoltées et des données déjà disponibles[4] nous a permis d'établir un bilan de masse et d'énergie global pour la savonnerie, qui nous a ensuite permis d'établir le bilan environnemental en analysant la contribution de chaque étape du cycle de vie pour chaque aspect environnemental considéré.

Grâce à ce bilan environnemental, nous avons pu proposer des solutions ciblant prioritairement les activités ayant les impacts majoritaires, tout en gardant à l'esprit le contexte particulier de la savonnerie FOMULAC.

[4] Provenant essentiellement des fichiers comptables et des relations constantes au sein des procédés établis de manière empirique, fruit d'une expérience de 5 années de fonctionnement.

Chapitre III : Matériel et méthodes

1 Echantillonnage

L'objectif de l'échantillonnage est d'obtenir un échantillon représentatif de la matière échantillonnée. Cette représentativité doit être effective pour l'ensemble de la matière répartie dans l'espace et pour l'ensemble de ces occurrences dans le temps.

Nous présentons ci-dessous l'ensemble des matières qui ont été échantillonnées et la façon dont nous avons géré l'hétérogénéité spatiale et temporelle. La quantité d'échantillon a été déterminée selon un compromis entre deux critères : la variabilité spatiale de la matière, et la quantité nécessaire pour les analyses. La fréquence d'échantillonnage a elle aussi été déterminée selon deux critères : la variabilité temporelle de la composition du flux de matière et la quantité maximale d'échantillons analysables. La conservation de l'échantillon ainsi que le déroulement de la prise d'aliquotes (fraction d'échantillon) sont aussi évoqués ci-dessous.

1.1 Quartage

Certaines matières solides furent échantillonnées selon la méthode du quartage. Une série de prises a été effectuée sur la matière à échantillonner ; ces sous-échantillons ont été mélangés manuellement et versés en un cône régulier sur une surface lisse et exempte d'impuretés (un sac vide) ; à l'aide de la main, le cône a été séparé verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques. Les deux moitiés ont été scindées par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, les quatre quarts ont été séparées de manière à obtenir quatre tas, en faisant bien attention à ne pas laisser de matière entre les tas. Deux tas diamétralement opposés ont été retirés, et les deux autres ont été mélangés en un nouveau tas. L'opération a été répétée jusqu'à obtenir un échantillon de taille désirée.

1.2 Matières

1.2.1 Amandes (Am)

Nous faisons la différence entre ce que nous appelons « amandes », qui correspond à la matière entrante dans la savonnerie et qui contient des impuretés, et « amandes* » qui correspond aux amandes sans impuretés. Les amandes se présentent sous la forme hétérogène d'une multitude de grains d'une longueur approximative d'1 cm ayant des variations de teinte allant du rouge sombre au brun foncé (Figure A1). Les impuretés se présentent sous la forme de débris de coques, noix non cassées, fibres, poussières, grains de mais, … (Figure A2).

Les échantillons furent prélevés selon la méthode du quartage. Ne connaissant pas l'hétérogénéité, nous avons pratiqué un premier protocole d'échantillonnage consistant au prélèvement de 4 sous-échantillons d'environ 2 kg. Le deuxième protocole donnait une quantité d'échantillons plus raisonnable, en prenant 8 sous-échantillons d'environ 300 g. 3 opérations de quartage successives ont été effectuées afin d'obtenir un échantillon d'environ 1 kg selon le premier protocole et d'environ 300 g selon le deuxième.

Les amandes ont été échantillonnées à chaque renouvellement du stock lors de la réception d'un nouveau lot (Tableau 3).

Les échantillons ont été conservés dans un sachet plastique, à température ambiante, durant maximum une semaine avant analyse.

1.2.2 Amandes séchées (AmS)

Après passage au séchoir, les amandes ont une teinte plus sombre. Leur consistance est plus ferme. Les ouvriers mesure cette consistance qualitativement en croquant les amandes sous la dent.

La fréquence de production des batches est 4 à 5 fois plus grande que celle de l'arrivée des lots. La fréquence d'échantillonnage n'est cependant pas proportionnelle : nous avons pris conscience vers la fin qu'il fallait estimer la variabilité par batch, et donc échantillonné un plus grand nombre de batches sur les derniers lots (Tableau 3).

La prise d'échantillon ainsi que sa conservation furent identiques à celle des amandes.

Tableau 3: Ensemble des échantillons d'amandes et d'amandes séchées récoltés

Matière	Numéro[a]	Date	Heure	Nombre d'échantillons	Protocole d'échantillon-nage	Origine et date de réception du lot
Am	1	02/03	8h50	6	1	Bunyakiri, 26/02
AmS	1.1	02/03	20h31	1	1	
Am	2	-	-	-	-	Bunyakiri, 11/03
AmS	2.1	12/03	9h55	1	1	
Am	3	18/03	16h05	2	1	Bunyakiri, 17/03
AmS	3.1	19/03	08h40	1	1	
AmS	3.2	22/03	10h55	1	1	
Am	4	01/04	11h30	3	2	Bunyakiri, 01/04
AmS	4.1	01/04	15h00	3	2	
AmS	4.2	02/04	9h47	1	2	
AmS	4.3	02/04	17h35	1	2	
AmS	4.4	03/04	08h50	1	2	
Am	5	07/04	11h07	3	2	Bunya, (Nord Kivu), 07/04
AmS	5.1	07/04	22h05	1	2	
AmS	5.2	08/04	08h37	1	2	

[a] : le premier chiffre correspond au lot d'amandes fraîches, et le second au batch d'amandes sèches échantillonné pour ce même lot.

[b]: protocole 1: prise initiale de 4 échantillons de 2 kg avant quartage ; protocole 2 : prise initiale de 8 échantillons de 0.3 kg avant quartage.

1.2.3 Bois de chauffe

Le bois est acheté au stère, sous forme de bûches non fendues de 1 m de long, 20-30 cm de diamètre, d'espèces diverses (eucalyptus et grevillea). L'échantillonnage a consisté en la prise de quelques grammes de fibres dans le cœur du bois fendu. Il a été échantillonné une seule fois. L'échantillon a été conservé dans un sachet plastique, à température ambiante, durant maximum une semaine avant analyse.

1.2.4 Tourteaux palmistes secs (TPS)

Les tourteaux secs sont le principal résidu issu de la presse des amandes. Ils sortent depuis l'extrémité de la vis sans fin, très chauds au toucher, et sont accumulés en un tas conique. Ils se présentent sous forme de copeaux, agglomérats de chair d'amande pressée (voir Figure A4). La répartition des copeaux dans le tas semble homogène.

Les échantillons furent prélevés selon la méthode du quartage. 4*300g, 3 quartages successifs, pour un échantillon de ~150g. Ils ont été échantillonnés environ une fois par lot (Tableau 4). Les échantillons ont été conservés dans un

sachet plastique, sur étagère à température ambiante, durant maximum une semaine avant analyse.

1.2.5 Tourteaux palmistes huileux (TPH)

Les tourteaux dits « huileux », sont nommés par opposition aux tourteaux secs de par leur apparente teneur élevée en huile. Ils proviennent de la filtration sur une grille de l'huile qui sort par l'autre extrémité de la vis sans fin de la presse (voir Figure A3). Ils sont raclés et stockés dans un demi-fût percé de fins trous, afin de les égoutter pour récupérer l'excédent d'huile. Ils forment une pâte grumeleuse et luisante d'huile. À l'échelle macroscopique (quelques cm), la répartition des particules semble homogène.

L'échantillon a été prélevé sur des tourteaux égouttés (l'huile ne suinte plus par les trous du fût), plusieurs fractions d'un total de ~50g ont été rassemblées et mélangées dans un pot de confiture vide préalablement nettoyé et autoclavé.

La fréquence d'échantillonnage a été semblable à celles des tourteaux secs (Tableau 4).

Les échantillons étaient conservés dans les pots de confiture vides à température ambiante, durant maximum une semaine avant analyse.

Tableau 4: Ensemble des échantillons de tourteaux secs et huileux récoltés

Matière	Numéro[a]	Date	Heure	Remarque
TPS	1.1	11/03	8h45	
TPS	2.1	15/03	13h05	Prise dans le stock de TPS
TPS	3.1	22/03	11h07	
TPS	4.1	02/04	9h54	
TPS	4.2	03/04	09h13	
TPH	2.1	15/03	13h32	
TPH	3.1	19/03	08h30	
TPH	3.2	22/03	10h45	
TPH	4.1	02/04	10h05	
TPH	4.2	03/04	09h20	

[a]: le premier chiffre correspond au lot d'amandes, et le second au batch de presse échantillonné pour ce même lot.

1.2.6 Boues de clarification (boues)

Les boues issues de la clarification contiennent des résidus d'amandes pressées sous forme de fine particules (<1mm) qui forment une pâte semi-liquide très visqueuse et huileuse. Si on la laisse au repos, on distingue une fine couche d'huile surnageante en surface. A température ambiante, la pâte devient plus consistante.

Lorsque la température descend en dessous du point de fusion de l'huile (27°C [Young, 1983]), la pâte se durcit, et l'on peut distinguer clairement une croûte d'huile blanchâtre figée qui se forme. Ce phénomène a posé des difficultés pour la prise d'aliquotes lors des analyses. Cela sera discuté dans au point 1.3.2.

Les échantillons furent prélevés à l'aide d'une spatule en plusieurs prises, dans le fond du fût qui a été préalablement homogénéisé à l'aide d'un bâton. Une quantité totale de ~50 g est introduite dans un pot de confiture vide préalablement nettoyé et autoclavé. Pour la conservation, un aliquote de 10 g est directement prélevé et inséré dans un tube plastique de 10 mL hermétiquement fermé, avec l'ajout approximatif de 3 gouttes d'H2SO4 97 %.

Les échantillons furent prélevés lors du rejet des boues (Tableau 5), qui sont soit déversées directement, soit après stockage.

Les échantillons étaient conservés à température ambiante et les aliquotes au frigo.

Tableau 5: Ensemble des échantillons de boue récoltés

Numéro[a]	Date	Heure	Remarque
1.1	04/03	19h30	Prise chaude
0.1	15/03	17h00	Vieilles boues, âge >2semaines. Odeur âcre (vinaigre-vomissure)
2.1	16/03	09h00	Prise froide, après une nuit, boue dense
3.1	22/03	11H25	Prise froide, semble très huileuse
4.1	02/04	18h20	Prise froide, sur fût incliné
4.2	06/04	11h10	Prise froide
5.1	08/04	8h37	Prise chaude, semble très huileuse

[a]: le premier chiffre correspond au lot d'amandes et le second au batch de clarification échantillonné pour ce même lot. « 0 » Lorsque ne correspond à aucun lot

1.2.7 Eaux usées

Les eaux usées proviennent de l'utilisation de l'eau dans la savonnerie et des nettoyages réguliers du matériel et du gros nettoyage « hebdomadaire ». Leur composition est hétérogène dans le temps, tous les paramètres variant sensiblement. Elles ont une couleur allant du brun clair au brun foncé, grise et parfois même légèrement bleutée. Elles sont spatialement hétérogènes : chargées de matière en suspension, parfois d'huile et de particules de savon (voir Figure A5).

Elles coulent en continu et ont été récoltées dans un fût d'une capacité de (98 ± 2) L. La surveillance du fût était à la charge d'un ouvrier. Lorsque le fût était

rempli, le contenu était homogénéisé à l'aide d'un bâton (voir figure A6). Ensuite l'échantillon était prélevé à l'aide d'une bouteille vide préalablement rincée de 0,5 L, en la plongeant rapidement et complètement sous la surface (Tableau 6) . Puis le fût était vidé, rincé, et replacé sous la conduite d'évacuation des eaux usées.

Les échantillons étaient conservés dans leur bouteille au frigo, mais ils pouvaient rester à température ambiante durant des périodes de quelques jours lorsqu'ils étaient analysés à la Cimenki, où il n'y avait pas de frigo.

Tableau 6: Ensemble des échantillons d'eaux usées récoltés

Numéro[a]	Date	Heure	Aspect visuel	Odeur	Evénement particulier connu
0.1	04.03			-	
0.2	10.03	08h48	Gris-brun, opaque, morceaux de savon	-	
0.3	13.03	07h35	Gris, morceaux de savon	-	
0.4	15.03	12h15	Brun-noir, croûte d'huile	-	nettoyage
0.5	16.03	09h25	Clair	-	
0.6	17.03	08h25	Gris, mousse, peu de morceaux de savon	-	nettoyage
1.1	23.03	09h45	Brun	âcre	
1.2	23.03	11h30	Brun		
1.3	24.03	15h05	Gris-brun	âcre	
1.4	24.03	18h10	Gris-bleu		nettoyage
1.5	25.03	13h20	Gris		
1.6	26.03	07h48	Mousse		
1.7	26.03	11h05	-	âcre	
1.8	26.03	18h35	-	âcre	
1.9	27.03	12h05	-		
1.10	29.03	15h15	-	âcre	
2.1	04.04	15h00	-	salée	
2.2	05.04	08h00	Sombre	salée	
2.3	05.04	14h20	Bleu	savon	
2.4	05.04	19h45	Clair		
2.5	06.04	10h00	Clair		
2.6	07.04	8h45	Clair, opaque	savon	
2.7	07.04	14h05	Bleu, opaque, morceaux de savon		nettoyage
2.8	07.04	14h49	Bleu, opaque, mousse		nettoyage
2.9	07.04	16h20	Brun sombre, opaque		nettoyage
2.10	08.04	10h35	Mousse		
2.11	09.04	11h30	-	-	

[a] : le premier chiffre correspond à une période de mesure continue, et le second au n^{ième} fût échantillonné. « 0 » lorsqu'il ne s'agit pas d'un échantillon sur une période continue
- : non mesuré



Figure A1 : Amandes

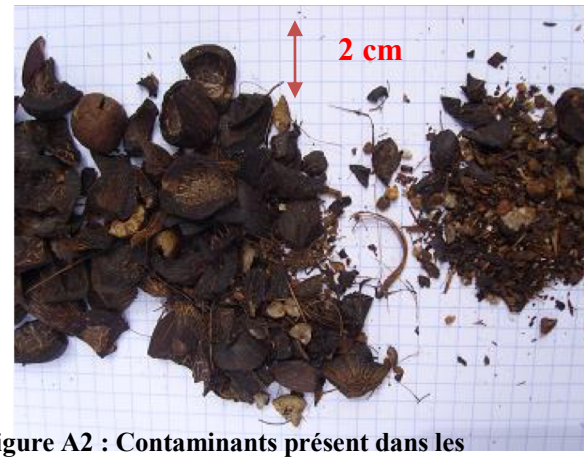


Figure A2 : Contaminants présent dans les amandes



Figure A3 : Tourteaux palmistes huileux à la sortie de la presse



Figure A4 : Tourteaux palmistes secs



Figure A5 : Echantillons d'eaux usées



Figure A6 : Homogénéisation du fût récoltant les eaux usées

1.3 Conditionnement des échantillons

1.3.1 Transfert des échantillons d'eau vers la Belgique

Pour le transport, les échantillons contenus dans les bouteilles plastiques ont été transvasés dans des tubes plastiques de type Falcon, hermétiquement fermés, d'une contenance de 10 mL. Pour ce faire, ils ont été secoués vigoureusement pour en homogénéiser le contenu. La bouteille de l'échantillon 0.4 présentait une pellicule de graisse résiduelle, la prise d'aliquote n'était pas représentative.

1.3.2 Homogénéisation des échantillons de boues

L'hétérogénéité des échantillons de boues après leur passage à froid posait problème pour la prise d'un aliquote représentatif. Préalablement à chaque analyse, nous avons donc réchauffé les échantillons de boues au bain-marie jusqu'à ce qu'ils reprennent une consistante plus fluide, puis nous les avons mélangés à l'aide d'une tige.

1.3.3 Broyage des amandes*

Pour la mesure de la teneur en matière sèche des amandes, nous avions d'abord procédé en mettant les amandes* entières. Lors des dernières mesures, les amandes* ont été broyées à l'aide d'un pilon dans un mortier.

2 Caractérisation des matières

2.1 Teneur en matière sèche, solides totaux (ST) et teneur en cendres

Pour les échantillons solides, une quantité connue (~10 g) de matière fraîche a été introduite dans un récipient taré de masse stable (coupelle métallique ou verre de montre). Le récipient a été mis au four à 105°C jusqu'à ce qu'il atteigne un poids constant (voir Résultats et Discussions, au point 1.1).

Pour les échantillons d'eaux usées, 100 mL d'échantillon ont été prélevés à l'aide d'un pied gradué, et introduits dans un récipient préalablement taré. Nous avons d'abord utilisé un erlenmeyer de 250 mL pour les premières mesures, puis avons effectués les autres en utilisant une coupelle métallique. Cette dernière étant de faible volume, l'aliquote y était transvasé progressivement, au rythme de l'évaporation de l'eau. L'aliquote est porté à ébullition et laissé sur la plaque

chauffante jusqu'à évaporation totale du liquide. Le récipient est ensuite placé à l'étuve pendant 2 h.

Le récipient contenant la matière sèche, ou les ST a été placé dans un dessiccateur jusqu'à son refroidissement à la température ambiante. Les récipients refroidis furent alors pesés. Finalement, la teneur en matière sèche et la teneur en eau sont obtenues par les relations suivantes :

$$T_{MS} = \frac{m_{r+MS} - m_r}{m_{MF}} \qquad T_{eau} = 1 - T_{MS}$$

Symbole	Signification	Unité
T_{eau}	Teneur en eau	[g_{eau}/g_{MF}]
T_{MS}	Teneur en matière sèche	[g_{MS}/g_{MF}]
m_r	Masse du récipient	[g]
m_{r+MS}	Masse du récipient contenant la matière sèche	[g]
m_{MF}	Masse de la matière fraîche avant séchage	[g]

et la teneur en Solides Totaux (ST) se calcule de la manière suivante :

$$ST = \frac{m_{r+ST} - m_r}{V_{aliquote}}$$

Symbole	Signification	Unité
ST	Solides totaux	[g/L]
m_r	Masse du récipient vide	[g]
m_{r+ST}	Masse du récipient comprenant les ST	[g]
$V_{aliquote}$	Volume d'aliquote analysé	[L]

Pour la mesure de la teneur en cendres, le résidu sec a été placé dans un four à 450°C pendant 4 heures. Le résidu obtenu est appelé « cendres ». Le creuset métallique contenant les cendres fut placé dans un dessiccateur jusqu'à son refroidissement à la température ambiante. La teneur en cendres et en solides volatils sont obtenus par les relations suivantes :

$$T_{cendres} = \frac{m_{r+cendres} - m_r}{m_{MS}} \qquad T_{SV} = 1 - T_{cendres}$$

Symbole	Signification	Unité
$T_{cendres}$	Teneur en cendres	[$g_{cendres}/g_{MS}$]
$m_{r+cendres}$	Masse du récipient contenant les cendres	[g]
T_{SV}	Teneur en solides volatils	[g_{SV}/g_{MS}]

Les solides volatils sont estimés par la différence entre la matière sèche et les cendres. Ils constituent une mesure de la quantité de matières organiques contenue dans la fraction solide de l'échantillon.

2.2 Matière en suspension (MES) et teneur en cendres des MES

Un filtre papier Watman n° 41 préalablement séché et taré a été introduit dans un creuset filtrant surmontant une fiole Buchner raccordée à une pompe à vide. Il fut humidifié afin d'éviter un court-circuitage d'air et la pompe à vide mise en route.

100 mL d'échantillon ont été prélevés à l'aide d'un pied gradué, et introduits dans le creuset filtrant. Une fois tout l'aliquote filtré, le filtre est recueilli sur un verre de montre et séché à l'étuve à 105°C pendant 2 h. Il fut ensuite retiré et placé dans un dessiccateur jusqu'à son refroidissement à la température ambiante. Les filtres refroidis sont alors pesés, et la teneur en matière en suspension est donnée par la relation suivante :

$$MES = \frac{m_{f+MES} - m_f}{V_{aliquote}}$$

Symbole	Signification	Unité
MES	Matière en suspension	[g/L]
m_f	Masse du filtre	[g]
m_{f+MES}	Masse du filtre avec la MES, après séchage	[g]
$V_{aliquote}$	Volume d'aliquote analysé	[L]

La teneur en cendres des ST a été mesurée de la même manière que celle évoquée au point 2.1 et est exprimée de la sorte :

$$T_{cendres_MES} = \frac{m_{cendres}}{m_{ST}} \qquad cendres_{MES} = \frac{m_{cendres}}{V_{aliquote}}$$

Symbole	Signification	Unité
$T_{cendres_ST}$	Teneur en cendres des ST	[$g_{cendres}/g_{ST}$]
cendres	Cendres	[g/L]

2.3 Teneur en huile

Une quantité connue (~ 25 g) d'échantillon a été introduite dans une cartouche en papier filtre épais. Cette cartouche fut introduite dans le corps en verre du dispositif Soxlhet. A ce corps en verre sont connectés un tube siphon et un tube d'adduction. Dans le montage, l'extracteur est placé sur un ballon préalablement taré contenant le solvant d'extraction (du xylène) et est surmonté d'un réfrigérant. Quand le ballon est chauffé, les vapeurs de solvant passent par le tube adducteur, se condensent dans le réfrigérant et retombent dans le corps de l'extracteur, faisant ainsi macérer le solide dans le solvant (chauffé par les vapeurs se trouvant en dessous). Le solvant condensé s'accumule dans l'extracteur jusqu'à atteindre le sommet du tube-siphon, qui provoque alors le retour du liquide dans le ballon, accompagné des substances lipophiles, dans notre cas l'huile palmiste.

Après une extraction de 4h, le solvant contenu dans le ballon fut évaporé, et l'huile résiduelle pesée. La teneur en huile est obtenue par la relation suivante :

$$T_{huile_MF} = \frac{m_{b+huile} - m_b}{m_{MF}}$$

$$T_{\text{huile}} = \frac{T_{huile_MF}}{T_{MS}}$$

Symbole	Signification	Unité
T_{huile_MF}	Teneur en huile sur la MF	[g_{huile}/g_{MF}]
$m_{b+huile}$	Masse du ballon avec l'huile	[g]
m_b	Masse du ballon	[g]
T_{huile}	Teneur en huile	[g_{huile}/g_{MS}]

2.4 Teneur en contaminant dans les amandes (AmC)

L'entièreté de l'échantillon d'amande a été pesé, puis trié manuellement sur une surface plane et propre (un sac vide). Toute matière qui n'était pas une amande* était exclue en un tas séparé, puis ce tas était pesé. La teneur en contaminant est obtenue par la formule :

$$T_{AmC} = \frac{m_{AmC}}{m_{éch}}$$

Symbole	Signification	Unité
T_{AmC}	Teneur en contaminant	[g_{AmC}/g_{MF}]
m_c	Masse des contaminants triés	[g]
$m_{éch}$	Masse de l'échantillon initial	[g]

2.5 Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxydant, exprimée en équivalent d'oxygène, nécessaire pour oxyder par voie chimique les matières réductrices présentes dans un échantillon, dans des conditions opératoires définies. Cette grandeur est utilisée pour déterminer la quantité de matière organique d'un échantillon. En réalité, les matières inorganiques réductrices sont également mesurées, mais les matières organiques prédominent dans la majorité des cas qui nous concernent.

La DCO est exprimée en gramme d'oxygène par unité de volume ou de masse de l'échantillon.

Deux méthodes utilisant deux oxydants différents (KMnO4 et K2Cr2O7) ont été utilisées car les résultats obtenus avec le KMnO4 n'étaient pas cohérents avec l'ensemble des autres mesures.

2.5.1 Oxydation au KMnO4

Dans cette méthode, la détermination de la DCO consiste à l'oxydation à chaud, en milieu acide, par un excès de KMnO4. L'excès est ensuite déterminé par iodométrie à l'aide de Na2S2O3.

Préparation de la solution mère de $KMnO_4$ (0.125 N)

0,988g de $KMnO_4$ ont été dissous dans un jaugé de 250 mL avec de l'eau distillée. Cette solution constituait un stock qui sera utilisé pour plusieurs expériences.

Préparation de la solution mère de $Na_2S_2O_3$ (0.1 N)

6,205g de $Na_2S_2O_3.H_2O$ ont été dissous dans un jaugé de 250 mL avec de l'eau distillée. Cette solution constituait un stock qui sera utilisé pour plusieurs expériences.

Préparation de la solution diluée de $KMnO_4$ (0.0125 N)

Lors de chaque nouvelle expérience, 50 mL de solution mère de $KMnO_4$ furent prélevés à l'aide d'une pipette jaugée (5 x 10 mL) et dilués dans un jaugé de 500 mL avec de l'eau distillée.

Préparation de la solution diluée de $Na_2S_2O_3$ (0.025 N)

Lors de chaque nouvelle expérience, 5 mL de la solution mère de $Na_2S_2O_3$ furent prélevés à l'aide d'une pipette jaugée, et dilués dans un jaugé de 200 mL avec de l'eau distillée.

Préparation de la solution de KI

10,064 g de KI ont été dissous dans un jaugé de 100 mL avec de l'eau distillée.

Préparation de la solution d'amidon

~1g d'amidon a été dissous dans un bécher contenant 100 mL d'eau distillée porté à ébullition.

Préparation des solutions d'échantillons

Mise en suspension des boues

Une quantité connue de boue (~0,250 g) préalablement traitée (comme vu au point 1.3.2) fut insérée dans un jaugé de 1 L avec de l'eau distillée (Solution échantillon).

Dilution des eaux usées

Plusieurs méthodes ont été utilisées en fonction de l'hétérogénéité des échantillons. La bouteille contenant l'échantillon d'eau usée a été secouée. Dans le cas où les particules en suspension étaient nombreuses et de taille supérieure au mm, la solution diluée a été préparée par l'insertion de 100 mL à l'aide d'un pied gradué dans un jaugé, complété à 1 L avec de l'eau distillée (Solution échantillon). Dans le cas contraire, une prise de 10 mL a été transférée à l'aide d'une micropipette (2 x 5 mL) dans un jaugé de 100 mL et complété avec de l'eau distillée (Solution échantillon).

Mesure de la DCO:

100 mL de Solution échantillon a été introduit dans un erlenmeyer de 250 mL. Le blanc a été préparé en introduisant 100 mL d'eau distillée dans un erlenmeyer de

250 mL. 10 mL d'H_2SO_4 50 % furent ajoutés précautionneusement, puis les erlenmeyers furent posés sur la plaque chauffante, et portés à ébullition. Ils furent retirés, et 50 mL de $KMnO_4$ 0.0125 N furent ajoutés. Les erlenmeyers furent couverts avec du papier aluminium, remis sur la plaque chauffante et portés à ébullition durant 10 min. L'ébullition était très instable, et pour éviter les pertes par éclaboussure, il fallait agiter les erlenmeyers de manière régulière. Les erlenmeyers furent sortis et plongés dans une bassine d'eau froide.

Une fois refroidis, 5 mL de KI 10 % leur furent ajoutés, et l'iode formé fut titré par le $Na_2S_2O_3$ 0.025N. Lorsque la coloration devenait jaune paille, l'amidon était ajouté, et le titrage continué jusqu'à décoloration complète. La DCO se calcule de la manière suivante :

$$DCO = \frac{(V_{Blanc} - V_{Sol_E}) * N_{Na_2S_2O_3} * 8000}{100} * f$$

Symbole	Signification	Unité
DCO	Demande chimique en oxygène	[mg_{O2}/L]
V_{Blanc}	Volume de thiosulfate utilisé pour le titrage du blanc	[mL]
$V_{Sol\ E}$	Volume de thiosulfate utilisé pour le titrage de la solution échantillon	[mL]
100	Volume de la solution échantillon	[mL_{Sol_E}]
$N_{Na2S2O3}$	Titre de la solution de thiosulfate	[éq/L]
8000	Masse d'oxygène par équivalent	[mg_{O2}/éq]
f	Facteur de dilution	[(L_{ech} ou g_{ech}) /L_{Sol_E}]

2.5.2 Oxydation au K2Cr2O7

La détermination de la DCO par la méthode au dichromate de potassium consiste en l'oxydation à chaud des matières réductrices de l'échantillon par l'oxydant fort $K_2Cr_2O_7$ en solution dans l'acide fort H_2SO_4, en présence du catalyseur Ag_2SO_4 (mélange que nous appelons « Solution des réactifs »).

DCO-macro avec titrage

Préparation des échantillons

La mesure de DCO selon la méthode macro a été effectuée sur les échantillons de boue préalablement traités comme vu au point 1.3.2.

Détermination du titre du sel de Mohr

20 mL de K_2CrO_7 0.25N ont été versés dans un ballon de 500 mL à fond plat et col rodé. 20 mL d'acide sulfurique concentré furent ajoutés, le tout porté à 250 mL avec de l'eau distillée. Après refroidissement, le sel de Mohr a été titré en présence de 12 gouttes de ferroïne (virage du vert au rouge-brun). La normalité du sel de Mohr se calcule de la manière suivante :

$$N_{Fe(NH_4)_2(SO_4)_2} = \frac{V_{K_2Cr_2O_7} * 0.25}{V_{Fe(NH_4)_2(SO_4)_2}}$$

Symbole	Signification	Unité
$N_{Fe(NH4)2(SO4)2}$	Normalité du sel de Mohr	[éq/L]
$V_{K2Cr\,O7}$	Volume de K2Cr2O7	[L]
0.25	Normalité de la solution de K2Cr2O7	[éq/L]
$V_{Fe(NH4)2(SO4)2}$	Volume de sel de Mohr	[L]

Détermination de la DCO de l'aliquote

Approximativement 0,4 g de sulfate de mercure, une quantité connue d'échantillon (~ 0.1 g) et 49,5 mL de de K_2CrO_7 0.25N ont été introduits dans un ballon de 500 mL à fond plat et col rodé. Le blanc a été préparé de la même façon sans l'ajout d'échantillon. Ensuite, 66 mL de solution d'acide sulfurique et de sulfate d'argent furent ajoutés précautionneusement, et le ballon directement connecté au réfrigérant. Le tout fut porté à ébullition pendant 10 minutes, laissé à refroidir 20 minutes. Le réfrigérant fut lavé avec 25 mL d'eau distillée, et le contenu du ballon porté à environ 300 mL avec de l'eau distillée. Le ballon fut mélangé puis laissé à refroidir.

Après refroidissement, la solution contenue dans le ballon a été titrée en présence de 12 gouttes de ferroïne. La DCO se calcule de la manière suivante :

$$DCO = \frac{(V_{Blanc} - V_{aliquote}) * N_{Fe(NH_4)_2(SO_4)_2} * 8000}{m_{aliquote}}$$

Symbole	Signification	Unité
DCO	Demande chimique en oxygène	[mg_{O2}/mg_{MF}]
V_{Blanc}	Volume de sel de Mohr utilisé pour le titrage du blanc	[mL]
$V_{aliquote}$	Volume de sel de Mohr utilisé pour le titrage de l'aliquote	[mL]
$m_{aliquote}$	Masse d'aliquote	[mg]
$N_{Fe(NH)4(SO4)2}$	Titre du sel de Mohr	[éq/L]
8000	Masse d'oxygène par équivalent	[mg_{O2}/éq]

DCO-micro avec mesure photométrique

Préparation des échantillons

La mesure de DCO selon la méthode photométrique a été effectuée sur les échantillons d'eaux usées. Une hétérogénéité fut remarquée, c'est pourquoi tous les échantillons ont préalablement été chauffés au bain-marie à 50°C, et vortexés jusqu'à désagrégation complète des éventuels culots résiduels. Malgré la chaleur, un échantillon présentait toujours une pellicule de graisse formant une phase séparée. Nous lui avons progressivement ajouté une solution de KOH 14N à l'aide d'une micropipette (140 µL), jusqu'à saponification totale des graisses résiduelles, qui fut constatée par la disparition de la phase séparée et l'apparition de mousse.

Mesure de la DCO

Le dosage s'effectue par une mesure photométrique de la concentration des ions réduits Cr^{3+} à 593 nm.

Les mesures de DCO sont réalisées à partir des kits Spectroquant (Merck, Allemagne). Dans le cadre de nos expériences, nous avons utilisé le kit 1.14555.00 correspondant à la gamme de DCO de 500 à 10 000 mg_{DCO}/L.

1mL d'échantillon fut introduit à l'aide d'une micropipette surmontée d'un tips au bout tronqué (assez grand pour aspirer les particules en suspension) dans le tube contenant la solution des réactifs. Après une agitation vigoureuse, le tube Spectroquant a été introduit dans un thermoréacteur (TR620, Merck) où il fut chauffé à 148°C pendant deux heures. Le tube fut ensuite retiré du thermoréacteur et placé sur un support métallique où il refroidit jusqu'à température ambiante.

La lecture de l'absorbance à 593 nm (dosage des ions Cr3+) fut réalisée dans un photomètre SQ200 (Merck). L'absorbance est finalement convertie en DCO par un facteur interne au photomètre.

2.6 Teneur en sodium

2.6.1 Préparation des échantillons

Une quantité connue (~ 10g) d'échantillon a été introduite dans un creuset en porcelaine préalablement taré. Les creusets furent mis au four à 105°C pendant ~ 24 h, puis au dessiccateur, pesés, remis au four à 450°C pendant ~ 24 h, remis au dessiccateur, repesés. Les cendres présentes dans les creusets furent attaquées

avec 3 mL d'HCL 37% et 1 mL de HNO_3 70% (mélange appelé eau régale), et les creusets furent posés sur une plaque chauffante à 130°C pendant minimum 5 min.

Les contenus des creusets furent ensuite transvasés dans des jaugés de 50 mL, et l'eau distillée fut ajoutée jusqu'au trait de jauge. Les solutions contenant des résidus en suspension furent filtrées à l'aide d'un filtre papier Watman n° 41.

Toutes les solutions furent diluées 10 fois dans une solution de chlorure de lanthane 10 %, et cette solution fut diluée à nouveau 10 fois avec la même solution de chlorure de lanthane 10 %.

2.6.2 Mesure de la teneur en sodium

La teneur en sodium de ces solutions fut mesurée par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) à l'aide d'un spectromètre Spectra AA-300 Varian, fonctionnant avec un mélange air-acétylène et une cathode creuse au sodium. La spectrométrie AAS consiste à vaporiser l'échantillon liquide à l'aide d'une flamme. Cette flamme est traversée par les photons émis par la cathode creuse à la longueur d'onde caractéristique de l'élément recherché (589 nm). En traversant la flamme, les rayons lumineux sont absorbés par les ions excités présents dans la flamme. L'absorption est mesurée par le rapport d'intensité entre la lumière incidente et la lumière transmise. La teneur en sodium des solutions est déduite par la courbe d'étalonnage calculée par l'appareil.

La teneur en sodium des échantillons se calcule par la formule suivante :

$$T_{Na^+} = \frac{C_{Sol_E} * f * 0.05}{m_{aliquote} / 1000}$$

Symbole	Signification	Unité
T_{Na+}	Teneur en sodium	[g/L]
C_{Sol_E}	Concentration de la solution analysée en AAS	[g/L]
f	Facteur de dilution	[-]
0.05	Volume de solution dans le jaugé	[L]
$m_{aliquote}$	Masse d'aliquote introduite dans le creuset	[g]
1000	Masse volumique de l'eau	[g/L]

2.7 Mesure du pH

La mesure du pH a été réalisée selon deux méthodes, toutes deux sur les échantillons d'eaux usées. La première méthode est l'utilisation de bandelettes à

pH (précision : ± 1 unité pH). Cette mesure était effectuée directement à la prise de l'échantillon d'eau, dans le fût.

La deuxième méthode fut employée sur les aliquotes à l'aide d'une électrode à pH, préalablement calibrée par des solutions tampon de pH connu.

3 Quantification des flux de matière

3.1 Flux de matière de l'unité huilerie

- Les amandes ont été pesées à l'entrée et à la sortie du séchoir, dans des sacs de jute fermé.
- Les tourteaux secs ont été pesés à la sortie du batch de presse, dans des sacs de jute.
- Les tourteaux huileux ont été pesés à la sortie du batch de presse, après égouttage dans le fût perforé, dans une bassine en plastique.
- L'huile a été pesée à l'entrée et à la sortie du batch de clarification à l'aide de bidons.
- L'eau a été pesée à l'entrée du batch clarification à l'aide de bidons.
- Les boues ont été pesées à la sortie du batch de clarification, dans des bassines en plastique.

La balance utilisée pour les pesées des flux de matière est une balance de gamme 1-500 kg, précise à 0,1 kg. Les contenants furent tarés avant pesage.

3.1.1 Mesure de la densité de l'huile palmiste

La densité de l'huile palmiste a été déterminée de la manière suivante : un trait a été dessiné sur le bidon préalablement taré, et l'eau remplie jusqu'au trait. Le bidon rempli a été pesé puis vidé. Il fut ensuite rempli avec le même volume d'huile et pesé. La densité est donnée par :

$$d_{huile} = \frac{m_{huile}}{m_{eau}}$$

Symbole	Signification	Unité
d_{huile}	Densité de l'huile	[kg_{huile}/L *L/kg_{eau}]
m_{huile}	Masse d'huile dans le volume du bidon	[kg]
m_{eau}	Masse d'eau dans le volume du bidon	[kg]

3.1.2 Mesure de la densité du bois

Un volume approximatif d'un stère a été élaboré à l'aide de 4 poteaux et d'une corde, formant un cube d'1m^3. Des bûches y furent entassées de manière à combler le maximum d'espace sans dépasser sur les côté du cube. Les bûches furent ensuite pesées sur une balance 1-500 kg. La densité du bois est donnée par :

$$d_{bois} = \frac{m_{bois}}{1000kg}$$

Symbole	Signification	Unité
d_{bois}	Densité du bois	[kg_{bois}/L *L/kg_{eau}]
m_{bois}	Masse de bois dans le stère	[kg]

3.2 Flux de matière de l'unité savonnerie

Seuls les flux d'eaux usées rejetées ont été mesurés dans l'unité savonnerie. La quantité d'eau dans le fût rempli a été mesurée une fois, pour une masse de 98 kg.

La quantification du flux d'eaux usées a consisté au comptage du nombre de fûts remplis.

4 Quantification des flux d'énergie

4.1 Flux d'énergie électrique

La consommation électrique n'avait jamais été mesurée dans la savonnerie, puisque l'électricité est fournie localement et non par l'état. Un compteur a donc été acheté dans ce but. Comme il était relié à l'alimentation générale, il fallait veiller à faire stopper toutes les machines pouvant fonctionner simultanément durant l'intervalle de temps de la mesure.

La consommation spécifique fut estimée par la mesure de la puissance moyenne effective, qui a consisté en la lecture du compteur à la fin et au début d'un intervalle de temps choisi en fonction de l'étape du procédé.

$$P_{étape} = \frac{E_{t2} - E_{t1}}{(t_2 - t_1)} * \frac{3600}{1000}$$

Symbole	Signification	Unité
$P_{étape}$	Puissance moyenne effective d'une étape du procédé	[MJ/h]
$(E_{t2}-E_{t1})$	Énergie électrique consommée durant l'intervalle de mesure	[kWh]
(t_2-t_1)	Durée de l'intervalle de mesure	[h]
3600	Nombre de kJ par kWh	[kJ/kWh]
1000	Nombre de KJ par MJ	[kJ/MJ]

4.2 Flux d'énergie calorifique

La chaleur produite par le combustible consumé dans une étape du procédé est donnée par la relation suivante :

$$Q_{étape} = M_{MF_comb} * ((1 - T_{eau}) * PCI_{MS_Comb} - T_{eau} * \lambda_{eau})$$

Symbole	Signification	Unité
$Q_{étape}$	Chaleur consommée par batch d'une étape du procédé	[MJ/batch$_{étape}$]
M_{MF_comb}	Masse de matière fraiche de combustible	[kg]
T_{eau}	Teneur en eau	[kg$_{eau}$ /kg$_{MF}$]
PCI_{MS_comb}	Pouvoir calorifique inférieur de la matière sèche du combustible	[MJ/kg$_{MS}$]
λ_{eau}	Chaleur de vaporisation de l'eau	[2.257MJ/kg$_{eau}$]

- PCI_{MS_Bois} = 19,8 MJ/kg [Bruneau, 1979]
- Le PCI des tourteaux huileux a été estimé selon la formule :

$$PCI_{MS_TPH} = T_{SVNH} * (PCI_{glucide} * T_{glucide/SVNH} + PCI_{protéines} * T_{protéines/SVNH}) + PCI_{huile} * T_{huile}$$

Symbole	Signification	Unité/valeur
PCI_{MS_TPH}	Pouvoir calorifique inférieur de la matière sèche des tourteaux palmistes huileux	[MJ/kg$_{MS}$]
T_{SVNH}	Teneur en solide volatil non huileux	[kg$_{SVNH}$/kg$_{MS}$]
$T_{glucides/SVNH}$	Teneur des glucides dans la fraction des solides volatils non huileux	[0,83 kg$_{glucide}$/kg$_{SVNH}$]
$T_{protéines/SVNH}$	Teneur des protéines dans la fraction des solides volatils non huileux	[0,17 kg$_{protéines}$/kg$_{SVNH}$]
T_{huile}	Teneur en huile	[kg$_{huile}$/kg$_{MS}$]
$PCI_{glucide}$	Pouvoir calorifique inférieur des glucides	[15.6 MJ/kg][a]
$PCI_{protéines}$	Pouvoir calorifique inférieur des protéines	[23.3 MJ/kg][c]
PCI_{huile}	Pouvoir calorifique inférieur de l'huile	[37.25 MJ/kg] [b]

[a] :[Weast and Astle, 1981] [b] :[Alamu et al., 2008] [c] : [Kienzle et al., 2001]

- PCI_{MF_mazout} = 42.6 MJ/kg [Al-Ghouti et al., 2009]

Chapitre IV : Résultats et discussions

1 Mises au point analytiques

Différentes caractérisations des échantillons ont été réalisées avec les moyens analytiques accessibles dans l'environnement de la savonnerie. Pour certaines analyses, des mises au point ont été nécessaires.

1.1 Optimisation de la durée d'étuvage pour la mesure de la teneur en MS

A cause de la contrainte d'utilisation limitée des fours, ceux-ci ne pouvaient être utilisés la nuit. De plus la capacité du four et du dessiccateur limitait le nombre d'échantillons à analyser. C'est pourquoi une durée minimale de séchage devait être estimée afin de limiter le temps de séjour des échantillons dans le four lors de la détermination du taux d'humidité des divers échantillons analysés.

1.1.1 Détermination de la durée d'étuvage pour l'ensemble des matières solides

Des aliquotes ont été prélevées sur les échantillons des diverses matières solides à analyser (3 pour Bou, 2 pour Am*, AmS et AmC , 1 pour TPS et TPH). Aucun traitement préalable n'a été effectué, excepté l'homogénéisation des boues. Le résultat de la perte de masse des aliquotes en fonction du temps est montré Figure 3.

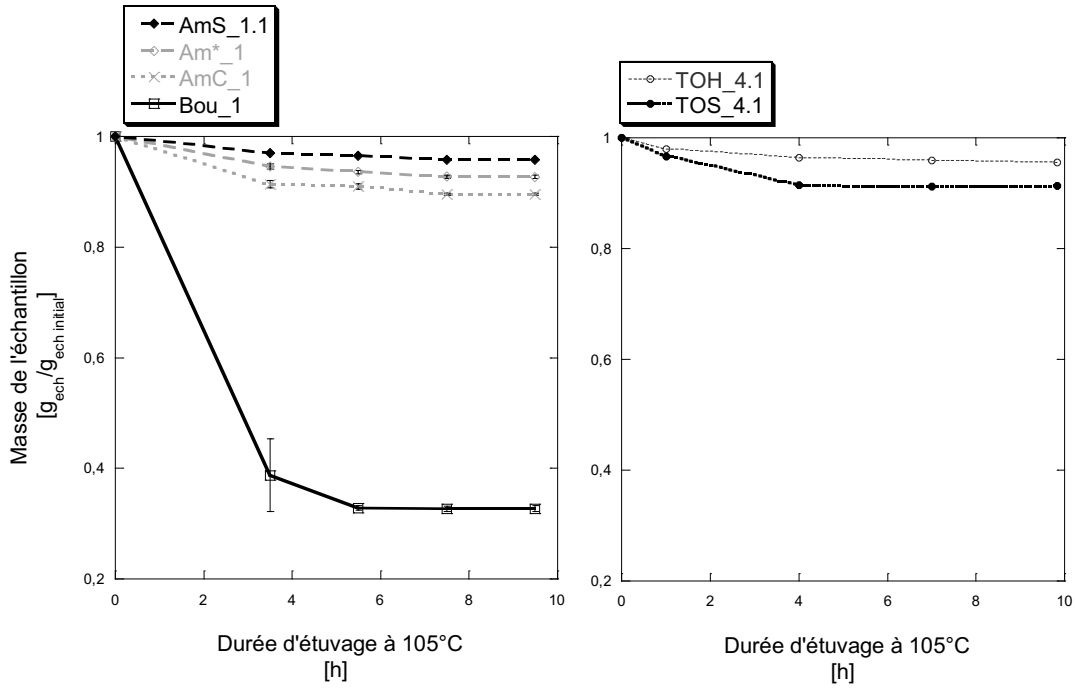


Figure 3: Perte de masse des aliquotes d'amandes*(Am*), de contaminants d'amandes (AmC), d'amandes séchées (AmS), de boues de clarification (Bou), de tourteaux secs (TPS) et tourteaux huileux (TPH) en fonction de la durée de l'étuvage à 105°C. Les barres d'erreur représentent l'écart à la moyenne (mesures en double) ou l'écart-type (mesures en triple) (les mesures de TOH et TOS ont été réalisées en simple).

On remarque tout d'abord sur la Figure 3 que les barres d'erreur réduites, excepté pour les aliquotes de boue à 3h30. L'écart type, qui représente l'incertitude cumulée de la prise d'aliquote et de la pesée est de l'ordre de 0.5% quelle que soit la matière échantillonnée.

L'évolution de la masse en fonction du temps atteint un plateau à partir de 4h de séchage pour les tourteaux secs, 5h30 pour la boue de clarification, 7h30 pour les autres matières. Nous avons donc choisi une durée de 8h pour les déterminations ultérieures de la teneur en matières sèches de toutes les matières.

1.1.2 Détermination de la durée d'étuvage pour les amandes* broyées

Après réflexion sur la possible limitation de la diffusion d'eau dans les matières, le plateau obtenu dans l'expérience précédente pour les matières Am* et AmS pouvait ne pas correspondre à une teneur en eau nulle, et une fraction d'eau résiduelle pouvait toujours être présente au cœur des amandes*. C'est pourquoi un deuxième essai fut effectué, cette fois ci en broyant les amandes* et les

amandes* séchées, et leur profil de perte de masse fut comparé avec celui des amandes* non broyées (Figure 4).

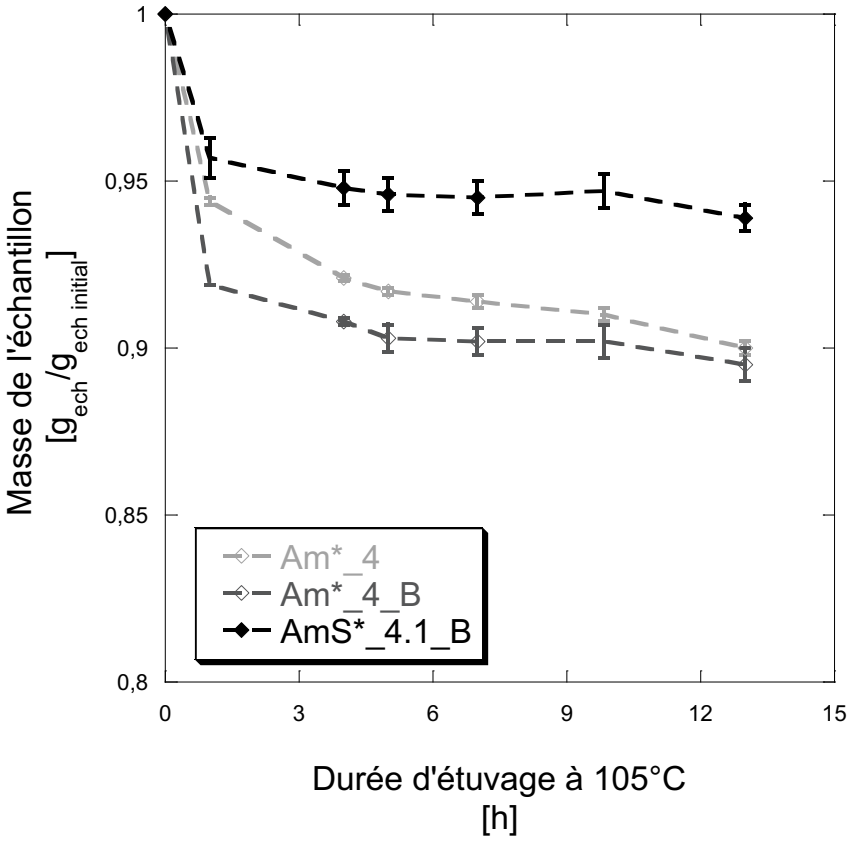


Figure 4 : Perte de masse des aliquotes d'amande* (Am*), amandes* broyées (Am*_B) et amandes* séchées broyées (AmS*_B) en fonction de la durée de l'étuvage à 105°C

Dans cette expérience, on observe que le plateau est moins marqué dans le cas des amandes* non broyées, comparé à l'expérience précédente. Dans le cas où les amandes* (séchées ou non) sont broyées, le plateau est observé entre 5 et 10h. La cinétique de séchage des amandes broyées est différente : il y a un écart significatif entre les courbes (Am*_4 et Am*_4_B) et celles-ci n'ont pas le même profil. Après 10h à l'étuve, les courbes commencent à converger, et la différence entre les amandes* broyées et non broyées n'est plus significative. La précision des deux méthodes est aussi différente : l'écart-type des amandes non broyées est de ~ 0.2%, et de ~ 0,5% pour les 2 autres.

Discussion

Le broyage des amandes* a un effet significatif sur la mesure de la teneur en MS, ce qui confirmerait que le plateau observé entre 8 et 10h dans la première expérience ne correspond pas à un taux d'humidité nulle. La perte de masse

observée entre 10 et 13h de séchage est statistiquement significative. Deux interprétations sont alors possibles : soit il s'agit d'une perte d'eau et la cinétique de séchage n'est pas terminée, soit il s'agit d'une perte en SV, et à partir de ce moment débute une cinétique de dégradation.

Quelle que soit l'interprétation, il est certain qu'il aurait fallu continuer l'expérience pour avoir la suite du profil. Malheureusement, elle a du être stoppée à cause des contraintes d'utilisation des fours, et nous avons utilisé une durée de 13h d'étuvage et opté pour un broyage des amandes* pour les analyses ultérieures.

1.2 Optimisation de la durée de calcination pour la détermination des taux de cendres

Afin de déterminer le taux de cendre des divers échantillons analysés, une durée optimale de calcination a été évaluée pour les même raisons que la détermination de la teneur en MS.

Les teneurs en cendres ont été mesurées sur 2 aliquotes de chaque échantillon. Les résultats sont montrés dans la Figure 5:

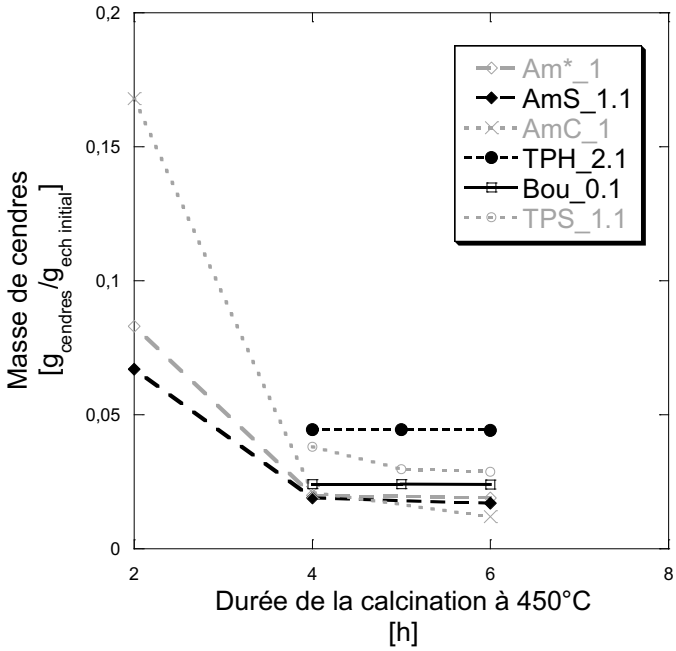


Figure 5: Perte de masse des aliquotes d'amandes (Am*), amandes séchées (AmS), contaminants du stock d'amandes (AmC), tourteaux huileux (TPH), tourteaux secs (TPS) et boues de clarification (Bou) en fonction de la durée de la calcination à 450°C. Les barres d'erreur représentent les écarts à la moyenne (mesures en double), mais ne sont pas visible sur la Figure.

Pour la majorité des échantillons, on observe un plateau à partir de 4h de calcination. Les tourteaux secs ont encore une légère perte de masse durant cet intervalle. Nous avons choisi une durée de calcination de 5h pour les expériences ultérieures.

1.3 Comparaison des méthodes de mesure de DCO au $KMnO_4$ et au $K_2Cr_2O_7$

A la savonnerie, les mesures de DCO ont été effectuées par oxydation au $KMnO_4$ (DCO_{KMnO4}). Pour vérifier leur cohérence, nous les avions mis en parallèle avec les valeurs des Solides Volatils (SV) qui représentent approximativement la quantité de matière organique des échantillons. Nous ne disposions des SV que pour une partie des échantillons, la mesure de la teneur en cendres n'ayant été effectuée sur place que sur un nombre limité d'échantillons (essentiellement à cause du nombre limité de creusets).

Il s'est alors avéré que la DCO_{KMnO4} était exceptionnellement faible, comparée aux valeurs attendues pour ce type de matière (Tableau 7). C'est la raison pour laquelle des mesures de DCO ont été effectuées à nouveau, une fois revenu à LLN, en utilisant un oxydant plus puissant ($K_2Cr_2O_7$). Ces valeurs de $DCO_{K2Cr2O7}$ ont été mises en parallèle aux SV calculés sur base des ST et des teneurs en cendres qui ont été remesurées à LLN.

Tableau 7 : Comparaison des DCO obtenues avec les DCO attendues

Matière	Rapport DCO/SV expérimental [g_{DCO_exp}/g_{SV}]		Rapport DCO/SV attendu [a] [$g_{DCO_attendu}/g_{SV}$]	**DCO observée/ DCO théorique** $g_{DCO_exp}/100g_{DCO_attendu}$]	
	DCO_{KMnO4}	$DCO_{K2Cr2O7}$		DCO_{KMnO4}	$DCO_{K2Cr2O7}$
Eaux usées	0,12 ± 0,04	2,2 ± 0,2	2-3 (acide gras)	4-6	>70
Boues	0,26 ± 0,05	1,6 ±0,2	1-2 (glucides, protéine et acides gras)	13-26	89
Sucre de table	0,79	1,092 ± 0,005	1,07	75	±100
Huile palmiste	0,04	2,5 ± 0,2	3	1	84

[a] : Sur base d'hypothèse sur leur composition, voir Matériel et Méthode, point 4.2

Le rapport DCO/SV permet d'avoir une idée sur le type de matière organique présente. Que ce soit les échantillons d'eaux usées ou de boues de clarification, on

observe que ces rapports sont très faibles pour la DCO_{KMnO4}, et sont d'un ordre de grandeur inférieur à ceux auquel on pouvait s'attendre en faisant des hypothèses sur la composition (colonne Rapport DCO/SV attendu). Un contrôle a été effectué avec du sucre de table et de l'huile palmiste. L'efficacité de l'oxydation de l'huile palmiste par le protocole DCO_{KMnO4} est inférieure de deux ordres de grandeur à celle attendue.

Les valeurs obtenues par la méthode de $DCO_{K2Cr2O7}$ sont du même ordre de grandeur que les valeurs attendues.

Discussion

La DCO_{KMnO4} a-t-elle été mal exécutée, ou était-elle inadaptée ?

- Le protocole a été bien exécuté, puisque l'efficacité expérimentale de l'oxydation du sucre correspond à l'efficacité théorique (~75%) de cette méthode. [IBM, 1969]

- La méthode est inadaptée pour les échantillons contenant de l'huile palmiste. Cela peut s'expliquer par deux raisons : d'une part, par les dilutions successives qui entraînent la perte d'une partie de l'huile sur les parois de la verrerie; d'autre part, par une oxydation incomplète. En effet, seules les doubles liaisons des triglycérides sont oxydées par le permanganate [Lakshminarayana et al., 1982 ;Mercangöz et al., 2004]

La faible valeur de DCO_{KMnO4} observée pour les échantillons d'eau et de boues serait donc due en partie au fait qu'ils contiennent des triglycérides, ce qui semble tout à fait cohérent. Ces valeurs de DCO_{KMnO4} ne représentent donc pas la DCO réelle.

Les valeurs de $DCO_{K2Cr2O7}$ sont cohérentes, cette méthode est donc plus adaptée à nos échantillons. Nous avons donc utilisé les valeurs de $DCO_{K2Cr2O7}$ par la suite.

1.3.1 Extrapolation des DCO des échantillons dont la $DCO_{K2Cr2O7}$ n'a pas été mesurée

Tous les échantillons de boues ont été mesurés par $DCO_{K2Cr2O7}$. Par contre, toutes les aliquotes d'eaux usées ramenées à LLN n'ont pu être analysées une nouvelle fois, à cause de leur nombre trop important. Nous avons posé comme hypothèse (qui sera testée dans la section suivante) que seules les aliquotes présentant des

conditions défavorables à la détérioration de leur composition par des microorganismes (pH>9) pouvaient avoir conservé leur composition initiale, et c'est sur ces aliquotes que la $DCO_{K2Cr2O7}$ a été mesurée. Il a donc fallu trouver un moyen pour estimer la DCO des échantillons dont la $DCO_{K2Cr2O7}$ n'a pu être mesurée.

Le Tableau 8 compare les valeurs de DCO_{KMnO4} et de $DCO_{K2Cr2O7}$ obtenues pour les aliquotes d'eaux usées ayant un pH supérieur à 9, afin de voir s'il y a une corrélation qui permettrait d'estimer les DCO manquantes.

Tableau 8 : Comparaison des valeurs de DCO_{KMnO4} et $DCO_{K2Cr2O7}$ des échantillons ayant un pH supérieur à 9

Aliquotes	pH[a]	SV[a] [g_{SV}/L]	DCO_{KMnO4} [g_{O2}/L]	$DCO_{K2Cr2O7}$[a, b] [g_{O2}/L]	Rapport $DCO_{K2Cr2O7}/DCO_{KMnO4}$	Rapport $DCO_{K2Cr2O7}/SV$
0.3	11,8	4,7	0,4	9,64 ± 0,1	25	2,1
0.6	10,26	8,0	0,7	17,0 ± 0,2	25	2,1
1.2	12,75	1,3	0,2	3,44 ± 0,09	17	2,7
1.4	12,75	2,5	0,2	6,01 ± 0,03	24	2,4
2.3	11,88	4,1	0,3	9,05 ± 0,09	30	2,2
2.5	12,83	1,5	0,3	3,42 ± 0,09	13	2,2
2.7	9,76	1,0	0,4	19,5 ± 0,1	48	1,9
2.11	11,26	2,6	0,3	5,71 ± 0,09	17	2,2
Moyenne					24	2,2
Ecart type					10	0,2

[a] mesuré à LLN

[b] : moyenne sur deux sous-aliquotes et écart moyen

D'après les résultats du Tableau 8, il ne semble pas y avoir de corrélation entre la DCO_{KmNO4} et la $DCO_{K2Cr2O7}$, le rapport $DCO_{K2Cr2O7}/DCO_{KMnO4}$ n'étant pas constant.

Par contre, il semble y avoir une corrélation entre la $DCO_{K2Cr2O7}$ et les solides volatils. La Figure 6 exprime la DCO mesurée en fonction des solides volatils.

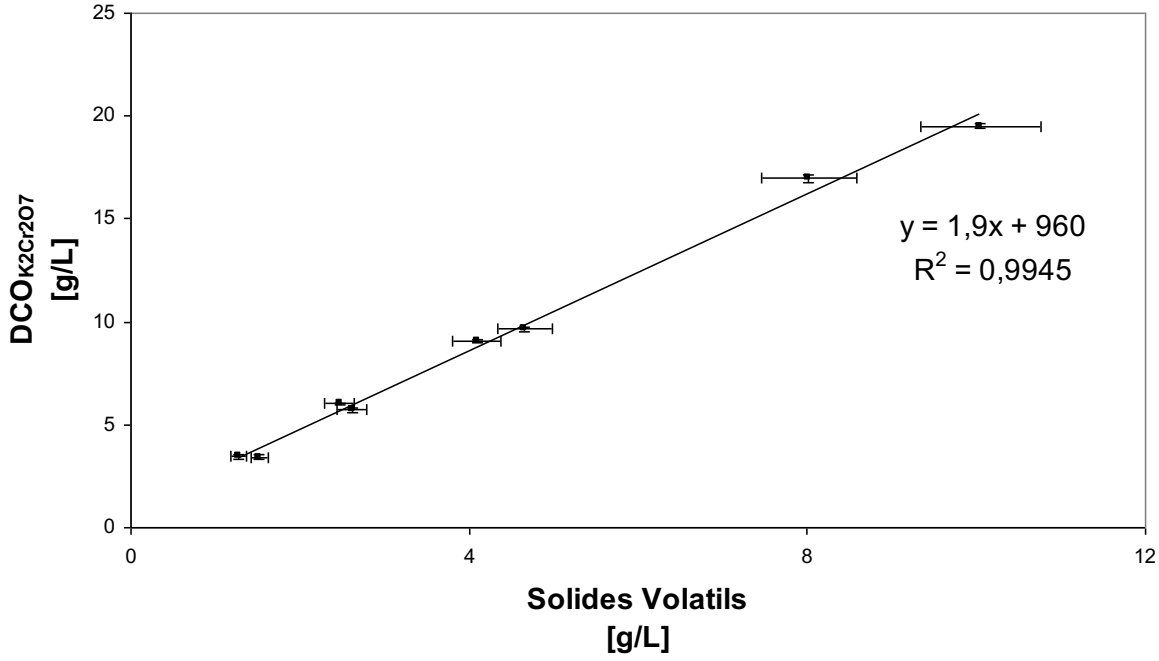


Figure 6 : Mesures de $DCO_{K2Cr2O7}$ des aliquotes ayant un pH supérieur à 9 en fonction de la teneur en solides volatils.

Discussion

La Figure 6 exprime une corrélation entre les valeurs de $DCO_{K2Cr2O7}$ et les SV, sous la forme d'une équation de premier ordre. Cette droite, établie de manière empirique, nous a servi à convertir les données de SV (mesurées sur site, avant dégradation) en DCO, pour les échantillons pour lesquels les mesures de DCO n'ont pu être réalisées.

1.4 Estimation de la dégradation des échantillons

Il nous faut maintenant vérifier l'hypothèse de la non-dégradation des aliquotes qui ont servi pour estimer la corrélation entre les SV et la DCO.

Une dégradation serait marquée par une diminution significative des SV, et donc des ST, si l'on suppose le taux de cendre constant. Il faut donc vérifier que la variation des ST entre les mesures effectuées sur place et à LLN n'est pas significative pour ces aliquotes.

1.4.1 Estimation de l'incertitude de nos mesures des ST

Les mesures de ST n'ayant pas pu être effectuées en double ou en triple, nous ne connaissons donc pas leur marge d'incertitude. Nous avons donc utilisé d'autres

données pour estimer l'incertitude pesant sur nos mesures de ST. Comme vu dans le Matériel et Méthodes au point 2.1, nous avons utilisé deux méthodes différentes pour la mesure des solides totaux. La première utilisait un Erlenmeyer et la deuxième des creusets métalliques afin de pouvoir les porter à 450°C, pour mesurer les SV. Afin de valider les mesures effectuées avec la première méthode, nous avions ré-effectué la mesure à l'aide de la deuxième méthode sur une série de 6 échantillons. Nous avons donc exploité ces données pour estimer l'incertitude pesant sur nos mesures de ST (ensemble des résultats). Le Tableau 9 présente les écarts observés entre les résultats selon la méthode utilisée.

Tableau 9 : Evaluation de la variabilité des teneurs en solides totaux de 6 échantillons mesurés selon deux méthodes différentes (méthode 1: en Erlenmeyer, méthode 2: en creuset métallique)

échantillon	ST selon Méthode 1 [g_{ST}/L]	ST selon Méthode 2 [g_{ST}/L]	ST moyens (méthodes 1 et 2) [g_{ST}/L]	Ecart à la moyenne (méthodes 1 et 2) [g_{ST}/L]	Ecart relatif à la moyenne (méthodes 1 et 2) [%]	Délai entre les 2 analyses [j]	pH
EAU_0.2	6,3	5,9	6.1	0.18	-2,9	16	10
EAU_0.4	24,5	21,5	23	1.5	-6,6	16	9
EAU_0.6	14,9	15,8	15.3	0.43	2,8	16	11
EAU_1.1	1,82	1,89	1,86	0,035	1,9	7	6
EAU_1.2	3,42	3,56	3,49	0,070	2,0	7	12
EAU_1.5	2,79	2,57	2,70	0,11	-4,1	7	7

Il n'y a pas de variations significatives entre les deux méthodes, ni augmentation ni diminution. La variation maximale est de 6,6%.

Discussion

Au vu de ces résultats, les écarts entre méthodes de mesure des ST ne sont pas corrélés avec le pH ou le délai entre les deux analyses, ce qui laisse supposer que s'il y a dégradation de l'échantillon, elle est masquée par la variation due à la prise d'aliquote et l'incertitude inhérente à la méthode.

Il apparaît, selon les résultats du Tableau 9, qu'une incertitude de 6.6 % (valeur maximale de l'écart relatif) pèse sur nos résultats, et que des écarts de moins de 6.6 % en ST ne peuvent être considérés comme significatifs dans les comparaisons ultérieures.

1.4.2 Vérification de la stabilité des ST et SV au cours de la conservation

La Figure 7 compare la composition des échantillons dont la teneur en cendres a été analysée sur place avec la composition de leurs aliquotes ramenés à LLN.

Le Tableau 10 illustre les conditions de prélèvement de ces échantillons.

Tableau 10: Conditions de prélèvement des échantillons dont la teneur en cendre a été mesurée sur place

Numéro[a]	Date	Heure	Aspect visuel	Odeur	Evénement particulier connu
0.2	10.03	08h48	Gris-brun, opaque, morceaux de savon	-	
0.4	15.03	12h15	Brun-noir, croûte d'huile	-	nettoyage
0.6	17.03	08h25	Gris, mousse, peu de morceaux de savon	-	nettoyage
1.1	23.03	09h45	Brun	âcre	
1.2	23.03	11h30	Brun		
1.5	25.03	13h20	Gris		
1.8	26.03	18h35	-	âcre	
1.10	29.03	15h15	-	âcre	
2.2	05.04	08h00	Sombre	salée	

[a]: le premier chiffre correspond à une période de mesure continue, et le second au n^{ième} fût échantillonné. « 0 » lorsqu'il ne s'agit pas d'un échantillon sur une période continue.

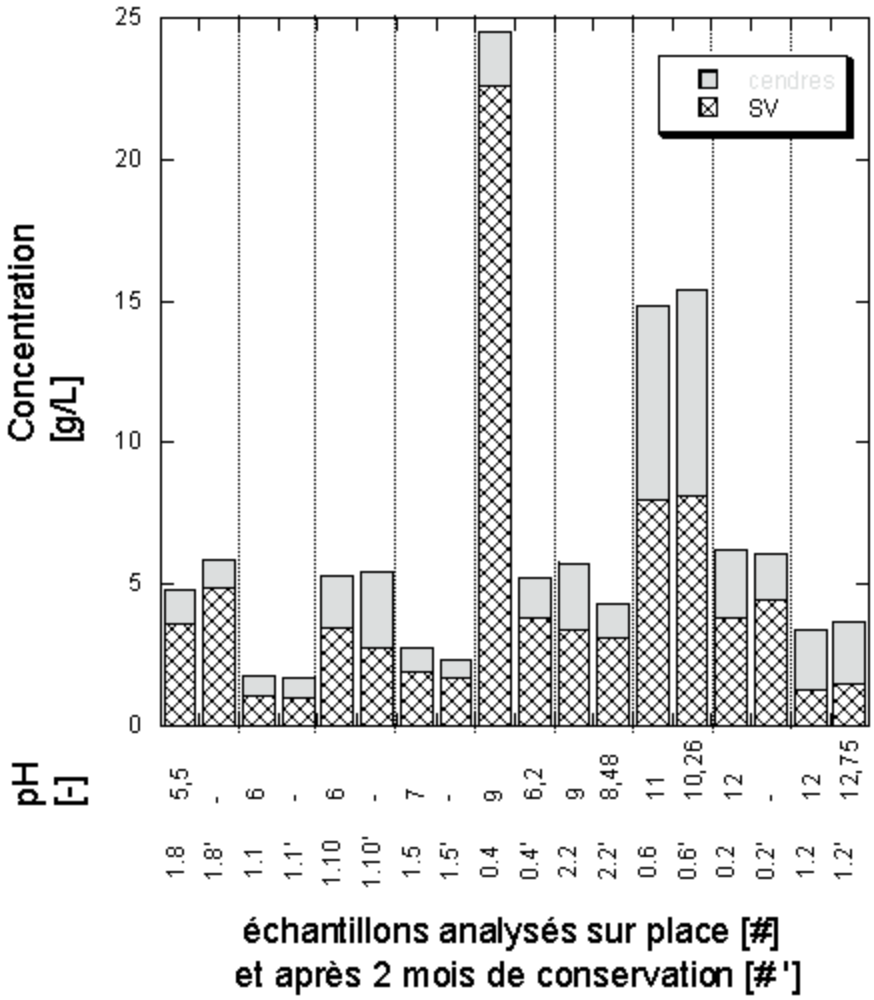


Figure 7 : pH, SV et cendres de paires d'échantillons mesurés sur place (barre de gauche de chaque paire) et de leurs aliquotes de 2 mois d'âge (barre de droite de chaque paire) .

Les échantillons ayant un pH supérieur à 9 lors de leur mesure à LLN, n'ont pas de variations significatives des ST (cendres + SV). Il y a par contre une diminution significative (>6,6%) des ST pour les échantillons 0.4, 1.5 et 2.2, dont le pH mesuré après 2 mois est inférieur à 9. Cette diminution va de pair avec la diminution de la teneur en solides volatils.

On constate une diminution de la teneur en cendre (12% en moyenne), pour la majorité des échantillons, excepté pour les échantillons 0.6 et 1.10.

Les ST ont été mesurés pour l'ensemble des échantillons sur place, et sur les aliquotes ramenés à LLN. La comparaison est présentée à la Figure 8.

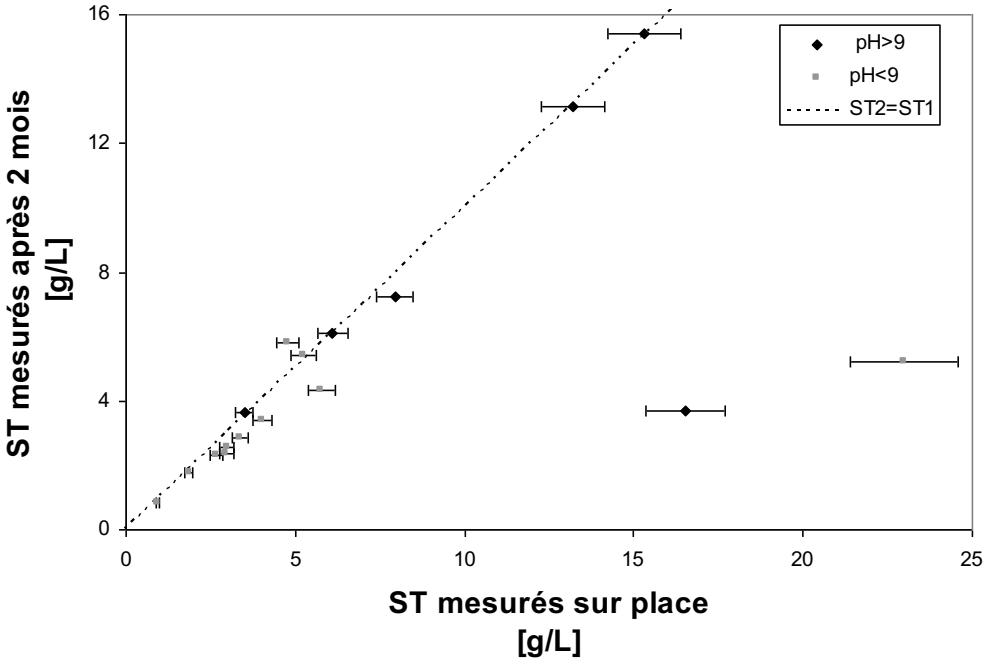


Figure 8: Comparaison des ST des échantillons mesuré sur place (ST1) et des aliquotes de 2 mois d'âge (ST2). La droite représente l'égalité des 2 mesures. La barre d'erreur correspond à l'incertitude de 6.6% estimé au point 1.4.1

La majorité des échantillons ayant un pH supérieur à 9 ont une variation non-significative des ST (p-valeur=0.54). La majorité des échantillons ayant un pH inférieur à 9 ont une variation non-significative des ST (p-valeur=0.09). On constate la présence de deux points à droite de la droite dont la mesure effectuée après deux mois est bien inférieure à celle effectuée sur place. Le point à l'extrême droite correspond à l'échantillon 0.4 de la Figure 7.

Discussion

- L'hypothèse selon laquelle les échantillons ayant un pH supérieur à 9 ne subissent pas de détérioration semble confirmée par les observations des Figure 7 et Figure 8.

- Les deux points situés tout à droite de la courbe correspondent à des échantillons très chargés. Nous avions de plus observé la présence d'une croûte d'huile figée lors de la prise d'aliquote de l'échantillon 0.4. Nous interprétons donc cette grande différence par une prise d'aliquote non représentative.

- La teneur en cendre, correspondant à la partie inorganique, devrait rester constante. Or nous observons une faible diminution, quelle que soit la variation de ST ou de pH. L'explication la plus plausible est que la combustion de la matière sèche n'était pas complète dans la méthode effectuée sur place, car à température égale (450°C), les échantillons analysés sur place ne sont resté que 4h dans le four, contre 24h pour ceux analysés à LLN.

1.4.3 Méthodologie retenue pour estimer les DCO non mesurées expérimentalement

Compte tenu que :

- Certains aliquotes sont non-représentatifs de l'échantillon initial,
- Les ST mesurés à LLN des échantillons ayant un pH inférieur à 9 n'ont pas subi une diminution significative par rapport aux ST mesuré sur place,
- Les teneurs en cendre mesurées sur place sont supérieures à celles mesurées à LLN,

Nous avons considéré que :

- Les ST mesurés sur place et à LLN sont fiables,
- Les teneurs en cendres mesurées à LLN sont fiables.

Nous avons donc :

- Calculé les SV par la différence des ST mesurés sur place et des teneurs en cendres mesurées à LLN,
- Estimé la DCO des échantillons non analysés en utilisant les SV calculés, en utilisant la droite de régression présentée à la Figure 6.

2 Caractérisation des matières transformées dans la savonnerie

Les caractéristiques moyennes - représentatives du fonctionnement annuel - des différentes matières circulant dans le procédé, sont nécessaires pour effectuer le bilan de masse et le bilan environnemental. Le but de cette section est de présenter le calcul de ces moyennes, l'évaluation de leur représentativité ainsi

qu'une comparaison avec les moyennes issues de la littérature, ou des valeurs attendues le cas échéant.

2.1 Amandes et amandes séchées

La présence de contaminants divers au sein du lot d'amandes a été remarquée lors du premier échantillonnage (voir Matériel et Méthode 1.2.1). La teneur de ces contaminants a été mesurée à chaque arrivage d'un nouveau lot dans le but d'en connaître la significativité par rapport à la masse totale du lot (Tableau 11).

Tableau 11: Lots réceptionnés ; origine et teneur en contaminants

Numéro du lot	Date de réception	Origine	Nombre d'échantillons	T_{AmC} [g $_{MF_AmC}$/ 100g $_{MF_am}$]
1	26/02	Bunyakiri,	6	14,0 ± 1,3
3	17/03	Bunyakiri,	2	15,3 ± 2,3
4	01/04	Bunyakiri,	3	13,6 ± 1
5	07/04	Bunia	3	8,7 ± 1,5

La teneur en contaminants représente entre 9 et 15 % de la masse des lots d'amandes qui arrivent à la savonnerie. Elle est du même ordre de grandeur pour les amandes provenant de Bunyakiri, elle est plus faible pour le stock provenant de Bunia.

La teneur en eau a été mesurée pour chaque lot et chaque batch sur les amandes* et contaminants (excepté pour le lot 3 et les batches 2.1, 3.1 et 3.2, pour lesquels la teneur en eau a été mesurée sur les amandes). Nous avons supposé que la perte d'humidité lors du stockage de courte durée (<3j) des lots d'amandes est négligeable par rapport à la perte au séchage, c'est pourquoi l'humidité des lots n'a été mesuré qu'une seule fois lors de leur arrivée (Tableau 12).

La teneur en cendre a été mesurée pour les 3 premiers lots et batches correspondants dans le but de restreindre le nombre d'analyses. La teneur en huile a été mesurée sur un seul lot.

Tableau 12: Caractéristiques mesurées sur l'ensemble des lots d'amandes et des batches d'amandes séchées. Les lignes correspondant aux lots sont sur fond gris.

Numéro du lot/batch	Matière	T_{eau} [g/100g$_{MF}$[c]]	T_{cendre} [g/100g$_{MS}$[c]]	T_{SV}	
				T_{huile}	T_{SVNH}
1	Am*	7,3 ± 0,3 [a]	1,99 ± 0,04 [a]	-	-
	AmC	10,4 ± 0,2 [a]	1,29 ± 0,06 [a]	-	-
1.1	AmS	4,3	1,8 ±0,2 [a]	-	-
2.1	AmS	6,5	2,1	-	-
3	Am	8,0	1,2	-	-
3.1	AmS	3,3	2,0	-	-
3.2	AmS	4,3	-	-	-
4	Am*	10,7 ± 0,3[b]	-	26,8	-
	AmC	10,6	-	-	-
4.1	AmS*	6,1 ± 0,4 [a]	-	-	-
	AmCS	5,7	-	-	-
4.2	AmS*	5,0	-	-	-
4.3	AmS*	6,5	-	-	-
4.4	AmS*	5,7	-	-	-
5	Am*	8,8 ± 0,5 [b]	-	-	-
	AmC	9,6 ± 0,5 [b]	-	-	-
5.1	AmS*	5,3	-	-	-
	AmCS	8,1	-	-	-
5.2	AmS*	6,6	-	-	-

[a] : mesure en double.
[b] : mesure en triple.
[c] : La MS ou la MF auxquelles font référence les différentes teneurs sont celles de la matière sur la même ligne.

Ces valeurs vont servir pour calculer la quantité d'eau évaporée par batch de séchage (Tableau 13), qui est requise pour évaluer le rendement énergétique de cette opération. La teneur en eau des amandes (amandes* + contaminants) est calculée sur base des teneurs en eau des amandes* et contaminants, issues du Tableau 12.

Tableau 13 : Teneur en eau des lots d'amandes, des batches d'amandes séchées et calcul de la perte d'eau au séchage. Les valeurs extrêmes sont en caractère gras. Les lignes correspondant aux lots sont sur fond gris. La MF auquel fait référence la teneur en eau est celle de la matière sur la même ligne.

Numéro du lot/batch	Matière	Durée de stockage [j]	T_{eau} [a] des lots d'Am ou des batches d'AmS [$g/100g_{MF}$]	Perte d'eau d'un batch de séchage [$g/100g_{MF_batch}$]
1	Am	/	7,7 ± 0,5	/
1.1	AmS	4	4,25± 0,03[b]	3,5
3	Am	/	8,0[b]	/
3.1	AmS	1	**3,3**[b]	4,6
3.2	AmS	3	4,3[b]	3,7
4	Am	/	10,7 ± 0,3	/
4.1	AmS	0	6,1	4,6
4.2	AmS	1	5,1 [c]	**5,6**
4.3	AmS	1	6,4 [c]	4,4
4.4	AmS	2	5,7 [c]	5,0
5	Am	/	8,8 ± 0,8	/
5.1	AmS	0	5,6	3,3
5.2	AmS	1	**6,7[d]**	**2,1**

[a] la teneur en eau des amandes est calculée sur base de la teneur en eau des contaminants et des amandes* $T_{eau_Ami} = T_{eau_AmC} * T_{AmC} + T_{eau_Ami*} * (1 - T_{AmC})$.

Symbole	Signification	Unité
T_{eau_Ami}	Teneur en eau des amandes ou amandes séchées	[g_{eau}/g_{MF}]
T_{eau_AmC}	Teneur en eau des contaminants d'amandes	[g_{eau}/g_{MF}]
T_{eau_Ami*}	Teneur en eau des amandes* ou amandes* séchées	[g_{eau}/g_{MF}]

[b] : mesure effectuée sur des échantillons d'amandes (amandes* +contaminants).
[c] : calcul effectué avec la teneur en eau des contaminants mesurée sur le batch AMS_4.1.
[d] : calcul effectué avec la teneur en eau des contaminants mesurée sur le batch AMS_5.1.
/ : pas applicable.

La teneur en eau des lots d'amandes est du même ordre de grandeur pour tous les lots, excepté pour le lot Am_4 (p-valeur<0.01). Mais ces données sont à comparer avec précaution, vu qu'à partir du lot 4, la teneur en eau des amandes* des batches et lots ultérieurs a été mesurée avec un broyage préalable à l'étuvage (comme vu au point Mise au point analytique,).

La teneur en eau des batches d'amandes séchées n'est pas corrélée avec la durée de stockage pré-séchage ; un batch d'amandes séchées plus vieux (dont les amandes sont restées plus longtemps dans le stock) n'implique pas qu'il ait une teneur en eau plus faible. Cette teneur varie du simple au double (3,3 - 6,7 $g/100g_{MF_batch}$).

Les caractéristiques moyennes issues de nos mesures sur les amandes*, amandes et amandes séchées sont comparées avec les valeurs issues de la littérature

(Tableau 14). Les caractéristiques moyennes des contaminants sont données dans le tableau récapitulatif (Tableau 23).

Tableau 14 : Comparaison des caractéristiques moyennes expérimentales et des caractéristiques de la littérature des amandes*, amandes fraîches et séchées.

Matière	caractéristiques	unités	Moyennes notre étude [a]	Moyennes littérature [b]
Amandes*				
	T_{eau}	$g/100g_{MF}$	9 ± 1,7	5,9 - 8,5
	T_{cendre}	$g/100g_{MS}$	1,6 ± 0,4	2,1
	T_{SV}	$g/100g_{MS}$	98,4 ± 0,4	97,9
	T_{huile}	$g/100g_{MS}$	26,8 [c]	49,6- 54,3
Amandes				
	T_{AmC}	$g/100g_{MS}$	13 ± 2,9	3 - 11
	T_{eau}	$g/100g_{MF}$	9 ± 1,4	-
Amandes séchées				
	T_{eau}	$g/100g_{MS}$	5 ± 1,1	3
	T_{cendre}	$g/100g_{MS}$	1,99 ± 0,08	-

[a] : moyenne et écart-type sur l'ensemble des échantillons mesurés.
[b] [Teoh et Tang, 1985].
[c] La mesure n'a été effectuée que sur un seul échantillon préalablement broyé (Am*_4).

La composition de la matière sèche (cendres + SV) que nous avons obtenue correspond à la composition issue de la littérature. Nous considérons la composition de la matière sèche (cendres + SV) comme représentative de la composition moyenne et utiliserons donc les valeurs expérimentales dans le bilan massique.

La teneur en huile expérimentale des amandes* est beaucoup plus faible que la valeur issue de la littérature. Nous considérons que la méthode d'extraction d'huile pour les amandes* n'était pas adaptée au substrat, ou que celui-ci a été mal préparé. En effet, la teneur en huile que nous avons mesuré (26,8 $g/100g_{MS_Am*}$) est inférieure à la quantité spécifique d'huile pure obtenue après pressage et clarification (38 $kg/100\ kg_{MF_Am}$ – cette valeur est présentée dans le Tableau 36). Nous utiliserons donc les valeurs issues de la littérature [Teoh et Tang, 1985] dans le bilan de masse.

La teneur en eau des amandes séchées et la teneur en contaminants des amandes sont significativement supérieures aux teneurs issues de la littérature. Cette teneur en contaminants représente une part non négligeable (9-15%) de la masse

totale des lots d'amandes entrant à la savonnerie. Elle dépend de manière significative du fournisseur. Ce problème sera repris dans la discussion générale.

La teneur en eau des amandes séchées n'est pas corrélée avec la durée de stockage pré-séchage, ce qui valide notre hypothèse de conservation de l'humidité des amandes du stock avant séchage. Cette teneur varie du simple au double, alors qu'elle devrait rester à une teneur optimale pour le pressage. L'impact de ce seuil sur la consommation énergétique est un problème qui sera repris dans la discussion générale.

Les valeurs moyennes de teneur en eau et de teneur en contaminants sont mesurées sur des lots individuels qui représentent les amandes du fournisseur principal, sur une période de 41 jours. Ils ne sont sans doute pas représentatifs du lot annuel moyen, mais en constituent cependant une bonne estimation ; nous utiliserons ces valeurs dans les bilans massiques.

2.2 Bois de chauffe

La teneur en eau a été mesurée dans le but d'estimer la qualité du combustible utilisé, en particulier son pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Nous avons échantillonné un fragment de bois sur 2 bûches de deux espèces différentes, représentant la majorité des espèces utilisées. Les valeurs expérimentales sont comparées avec des valeurs issues de la littérature dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Caractéristiques mesurée sur les 2 échantillons de bois et comparaison avec des caractéristiques issues de la littérature

	Origine des données			
Caract.	**bois1**	**bois 2**	**littérature**	**unités**
T_{eau}	42,9	47,8	50- 65 [a] (bois vert) 25-35 [a] (bois ressuyé [c]) 10 [a] (bois séché)	[g/100g_{MF}]
T_{cendre}	12,1	0,7	0,3-1,4[b]	[g/100g_{MS}]
T_{SV}	87,9	99,3	98,6-99,7[b]	[g/100g_{MS}]

[a] : [Bernard et al., 2006] [b] [Bruneau, 1979].
[c] : mi-sec.

La teneur en eau du bois, très élevée, correspond presque à celle d'un bois vert. La teneur en cendres du bois 1 est nettement supérieure à la teneur issue de la littérature : nous considérons qu'elle découle d'une erreur de mesure et prendrons la valeur de 0,7 g/100g_{MS}.

2.3 Tourteaux huileux et secs

Les échantillons ont été recueillis dans les mêmes conditions (voir Matériel et Méthode, point 1.2.4), excepté pour l'échantillon TPS 2.1, qui a été recueilli dans le stock de tourteaux secs, et non dans les tourteaux secs correspondant au batch de pressage. Cet échantillon représente donc une moyenne de plusieurs batches de pressage (Tableau 16).

La teneur en huile sur les tourteaux secs n'a pas été mesurée par négligence.

Tableau 16 : Caractéristiques des tourteaux mesurées sur l'ensemble des batches de pressage

Matière	Numéro du batch	T_{eau} [g/100g$_{MF}$]	T_{cendre} [g/100g$_{MS}$]	T_{SV} [g/100g$_{MS}$]	
				T_{huile}	T_{SVNH}
TPH	1.1	4,4	4,6	48,5	46,9
	2.1	4,3	3,9	-	-
	3.1	4,4	3,2	39,8	57,0
	4.1	4,1	-	-	-
	4.2	5,0	-	43,9	-
	Moyenne	4,4	3,9	44,1	51,9
	Écart-type	0,3	0,7	4	4 [a]
TPS	2.1	4,0	3,0	-	-
	3.1	5,1	3,4	-	-
	3.2	5,2	3,2	-	-
	4.1	9,6	-	-	-
	4.2	5,6	-	-	-
	Moyenne	5,9	3,2	-	-
	Écart-type	2	0,2		

[a] :écart moyen
- : non mesuré

La teneur en eau et la teneur en cendres sont constantes entre les différents batches de tourteaux produits, sauf pour l'échantillon TPS 4.1. La teneur en huile des TPH varie entre 39.8 et 48.5 g/100gMS.

Discussion

Les moyennes expérimentales issues de ces mesures sont comparées avec celles de la littérature dans le Tableau 17. Nous n'avons pu trouver dans cette dernière de références explicites à ce que nous avons nommé tourteaux huileux.

Tableau 17: Comparaison des caractéristiques moyennes expérimentales et des caractéristiques de la littérature des tourteaux secs

		Origine des données	
Caractéristiques	**unités**	**notre étude [a]**	**littérature**
T_{eau}	$g/100g_{MF}$	5,9 ± 2	6,4[b] -7,92[c]
T_{cendre}	$g/100g_{MS}$	3,2 ± 0,2	4,2[b] - 4,6[c]
T_{SV}	$g/100g_{MS}$	96,8 ± 0,2	95,3[c] - 95,8[b]
T_{huile}	$g/100g_{MS}$	-	8,4[b]
T_{SVNH}	$g/100g_{MS}$	-	87,4[b]

[a] : moyenne et écart-type sur l'ensemble des échantillons mesurés
[b] [Teoh and Tang, 1985] [c] [Razuan et al., 2010]

La teneur en eau expérimentale des tourteaux secs est du même ordre de grandeur que la teneur en eau de la littérature. La teneur en cendres expérimentale diffère significativement de la teneur en cendres de la littérature. La signification de la composition des tourteaux sera discutée au point Synthèse des caractéristiques retenues. Nous utiliserons les valeurs expérimentales moyennes des teneurs en eau et en cendres dans le bilan massique.

La teneur en huile des tourteaux secs ne peut pas être comparée, puisque nous ne l'avons pas mesurée. Nous utiliserons donc la valeur issue de la littérature par la suite.

2.4 Huile palmiste brute et huile palmiste purifiée

La densité de l'huile a été mesurée selon la méthode décrite dans le Matériel et Méthode au point 3.1.1, sur une seule opération de pressage. Le volume d'eau a été pesé une fois, et le volume d'huile a été pesé 4 fois. L'eau était à température ambiante, alors que la température de l'huile était de ~50°C. Cette température correspond à celle à laquelle les volumes d'huile sont habituellement mesurés à l'aide des bidons. Les résultats sont donnés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Comparaison des densités expérimentales et des caractéristiques de la littérature des huiles brutes et pures

Huile	**Densité**		
	notre étude (50°C)	**littérature (20°C)**	**unités**
brute	0,962 ± 0,005	-	$[kg_{huile}/L_{huile} * L_{eau}/kg_{eau}]$
pure	0,925 ± 0,006	0,899 – 0,914 [a,b]	$[kg_{huile}/L_{huile} * L_{eau}/kg_{eau}]$

[a] [Young, 1983] [b][Jitputti et al., 2004]

La densité de l'huile brute est plus grande que celle de l'huile pure. La densité de l'huile pure est significativement plus grande que la valeur issue de la littérature (p valeur < 0,05).

Discussion

Cette valeur plus grande peut être expliquée par une dilatation du bidon, ou par le fait que l'huile pure contient encore des impuretés. Ces valeurs serviront à estimer la masse d'huile produite annuellement à partir des volumes qui sont mesurés lors de chaque batch à l'aide de bidons.

2.5 Boues de clarification

La façon dont les boues sont rejetées dans l'environnement dépend des ouvriers en charge de l'opération. Ces ouvriers appliquent différentes méthodes sans se consulter, leur seule consigne étant de récupérer un maximum d'huile. Les échantillons ont été prélevés dans les conditions suivantes, correspondant aux conditions dans lesquelles les boues ont été rejetées dans la rigole d'évacuation :

- 1.1 : Prise sur des boues chaudes et fluides.
- 2.1 : Prise sur des boues froides et dures, ayant passé une nuit. La croûte d'huile figée qui s'est formée a été récupérée.
- 3.1 : Prise sur des boues froides mais non figées.
- 4.1 : Prise sur des boues froides et non durcies, dont le fut a été incliné.
- 4.2 : Prise sur des boues froides et non durcies.
- 5.1 : Prise sur des boues chaudes et fluides.

La composition de boues issues des différents batches de clarification est présentée à la Figure 9, et dans le Tableau 19.

La DCO a été mesurée dans le but d'estimer l'impact environnemental dans l'eau, car les boues déversées dans la rigole se jettent ensuite dans la rivière.

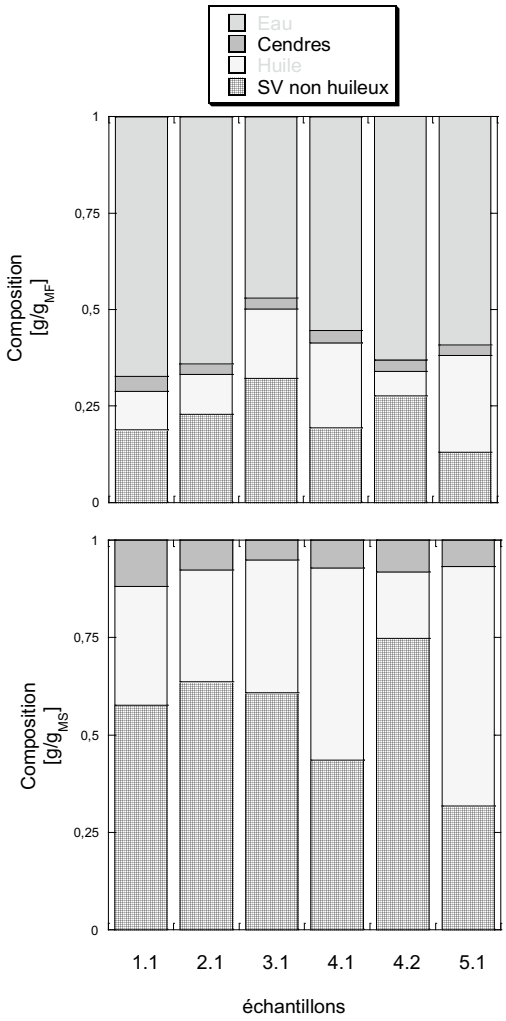


Figure 9 : Composition des boues issues des différents batches de clarification

La teneur en eau des boues varie fortement selon le batch ; elle oscille entre 0,47 et 0,67g/g_{MF}.

La composition expérimentale des boues n'a pas fait l'objet d'une comparaison avec d'autres boues de ce type, absentes dans la littérature. Dans le but de vérifier la cohérence de cette composition déterminée expérimentalement, nous avons posé deux hypothèses. (1) La composition des SVNH est semblable à celle des amandes, puisque c'est la même matière qui passe par une opération de pressage, puis par une opération de clarification. (2) Et que la teneur en protéines des amandes utilisées par la savonnerie (17g/100g_{SVNH}) et glucide (83g/100g_{SVNH}) est semblable à celle trouvée dans la littérature [Tang et Teoh, 1985]. Connaissant la DCO théorique moyenne de ces substances, nous avons calculé une DCO théorique

correspondant à cette composition hypothétique, que nous avons comparée avec la DCO observée (dernière colonne du Tableau 19).

Tableau 19 : Composition de la MS des boues de clarification en fonction de leurs conditions de rejet. Les valeurs extrêmes sont en caractère gras.

Numéro du batch	$T_{cendres}$	T_{huile} [g/g_{MS}]	T_{SVNH}	DCO observée [a] [g_{O2}/g_{MS}]	DCO théorique [b] [g_{O2}/g_{MS}]	DCO observée/ DCO théorique [%]
1.1	**0,10**	0,30	0,60	**1,38** ±0,05	1,55	89
2.1	0,08	0,29	0,64	1,681 ±0,006	1,80	93
3.1	**0,05**	0,34	0,61	1,39 ±0,03	1,69	83
4.1	0,07	0,49	0,44	1,51 ±0,06	1,93	78
4.2	0,08	**0,17**	0,75	**1,7** ±0,2	**1,36**	124
5.1	0,07	**0,61**	0,32	1,41 ±0,02	**2,15**	66
Moyenne	0,075	0,37	0,55	1,5	1,7	89
Ecart-type	0,017	0,16	0,16	0,1	0,3	20

[a] : moyenne ± écart moyen

[b] : Calculé selon la formule :

$$DCO_{théorique} = T_{SVNH} * (DCO_{glucide} * T_{glucide/SVNH} + DCO_{protéines} * T_{protéines/SVNH}) + DCO_{huile} * T_{huile}$$

$$DCO_{théorique} = T_{SVNH} * (1{,}067 * 0{,}83 + 1{,}46 * 0{,}17) + 2{,}9 * T_{huile}$$

Où

T_{SVNH} = taux de solides volatils non huileux [g_{SVNH}/g_{MS}]

$T_{glucides/SVNH}$= taux de glucide des solides volatils non huileux [$g_{glucides}/g_{SVNH}$] [Tang et Teoh, 1985]

$T_{protéines/SVNH}$= taux de protéines des solides volatils non huileux [$g_{protéines}/g_{SVNH}$] [Tang et Teoh, 1985]

T_{huile} = teneur en huile [g_{huile}/g_{MS}]

La composition de la matière sèche varie aussi fortement : la teneur en cendre est relativement constante, mais la teneur en huile varie du simple au quadruple (0,17 – 0,61 g/g_{MS}). La DCO varie entre 1,4 et 1,7 g_{DCO}/g_{MS}. Le rapport DCO $_{observée}$/ DCO $_{théorique}$ est dans la gamme 78-93 %, si l'on excepte les deux derniers échantillons.

Discussion

La composition est cohérente pour la majorité des échantillons ; le rapport DCO $_{observée}$/ DCO $_{théorique}$ est constant et correspond à la valeur théorique de l'oxydation pour cette méthode (80-100%) [Kim Y.-C et al., 2000]. Nous utiliserons les valeurs moyennes par la suite. Cette composition sera comparée à celle des amandes au point Synthèse des caractéristiques retenues .

2.6 Eaux usées

Un suivi continu des eaux usées fut établi dans le but de (1) caractériser la composition de ces eaux usées, (2) quantifier les charges de DCO et MES émises par la savonnerie dans l'environnement et (3) relier la production de ces charges polluantes avec les activités de la savonnerie.

Chaque échantillon est représentatif d'une quantité de 98L d'eau usée, récoltée dans un fût. Après chaque échantillonnage, le fût est vidé et replacé sous le tuyau d'évacuation des eaux usées, de manière à récolter celle-ci de manière continue. Cette expérience fut menée durant deux périodes, du 23 au 29/03/2010 (S1) et du 04 au 09/04/2010 (S2). Les caractéristiques des échantillons et la quantité de savon produite durant cette période sont visibles dans le Tableau 20.

Il faut noter que les quantités de savon produites durant cette période (130 kg_{savon}/jour) ne sont pas représentatives des quantités produites durant un régime normal (aux alentours de 500 kg_{savon}/jour). Les Figure 10 et Figure 11 présentent graphiquement la composition présentée Tableau 20 en fonction du volume écoulé. Les Figure 12 et Figure 13 présentent les charges cumulées en fonction du temps.

Tableau 20: Caractéristiques des échantillons d'eaux usées et quantités de savon produites durant les périodes de mesures.

Echantillon	Date	Heure	ST	Cendres totales	MES	Cendres MES	Na+	DCO	pH	Evénement particulier connu	Quantité de savon produite[d] [kg_{MF_savon}]
			[g_{ST}/L]	[$g_{cendres\ tot}/L$]	[g_{MES}/L]	[$g_{cendres\ MES}/L$]	[g_{Na+}/L]	[g_{O2}/L]	[-]		
1.1	23.03	09h45	1,8	0,8	0,9	0,4	0,1	2,9	6		
1.2	23.03	11h30	3,6	2,1	0,8	0,4	0,8	3,4 [c]	12		226
1.3	24.03	15h05	2,6	0,7	1,2	-	0,2	4,5	7		
1.4	24.03	18h10	16,5 [a]	1,2	8,8	-	0,5	22,0	12	nettoyage	108
1.5	25.03	13h20	2,3	0,6	1,4	0,3	0,2	4,2	7		
1.6	26.03	07h48	5,8[a]	0,0	0,7	0,2	-	-	13		
1.7	26.03	11h05	8,6	0,7	7,2	0,4	0,2	15,9	8		
1.8	26.03	18h35	3,0	0,7	1,6	0,4	0,2	5,4	5,5		33
1.9	27.03	12h05	6,7	4,5	1,6	0,5	-	5,0	9		
1.10	29.03	15h15	4,2	1,2	2,0	0,6	0,2	6,5	7		33
2.1	04.04	15h00	3,4	0,9	1,7	-	0,3	5,6	8		33
2.2	05.04	08h00	5,3	1,5	1,7	-	0,5	8,1	9		
2.3	05.04	14h20	5,4	1,3	2,6	-	0,6	9,1 [c]	10		
2.4	05.04	19h45	1,4	0,3	2,6	-	0,1	3,0	6		685
2.5	06.04	10h00	3,0	1,5	2,5	-	0,7	3,4 [c]	12		65
2.6	07.04	8h45	2,7	0,7	2,5	-	0,1	4,8	7		
2.7	07.04	14h05	13,1	3,1 [b]	4,1	-	1,0	19,5 [c]	9	nettoyage	
2.8	07.04	14h49	12,2	5,7 [b]	3,7	-	1,0	12,3	10	nettoyage	
2.9	07.04	16h20	41,2	12,9 [b]	3,7	-	3,1	54,8	11	nettoyage	33
2.10	08.04	10h35	7,8 [a]	3,6	2,4	-	1,3	8,9	12		442
2.11	09.04	11h30	4,7	2,0	-	-	0,8	5,7 [c]	11,26 [a]		
moyenne	/	/	7,4	2,3	2,7	0,4	0,6	10,3			
écart-type	/	/	8,7	2,9	2,1	0,1	0,7	11,8			

[a] : mesuré à LLN

[b] : estimation, par soustraction de la quantité d'acide ajouté avant la mesure de la teneur en cendres

[c] : mesure expérimentale (les autres valeurs de DCO sont estimées via la droite de régression, voir Figure 6)

[d] : sur base des registres de la savonnerie, la quantité de savon produite sur une journée

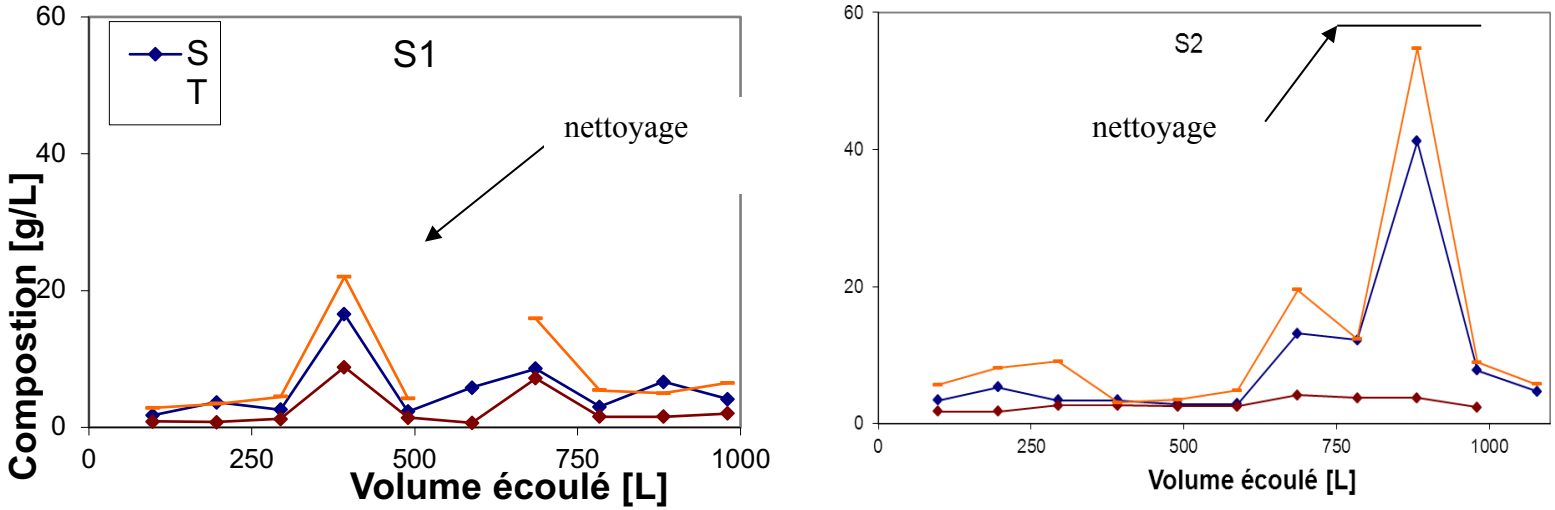


Figure 10 : Teneur en ST, MES et DCO des eaux usées écoulées du 23 au 29/03/2010 (S1) et du 04 au 09/04/2010 (S2) en fonction du volume écoulé cumulé

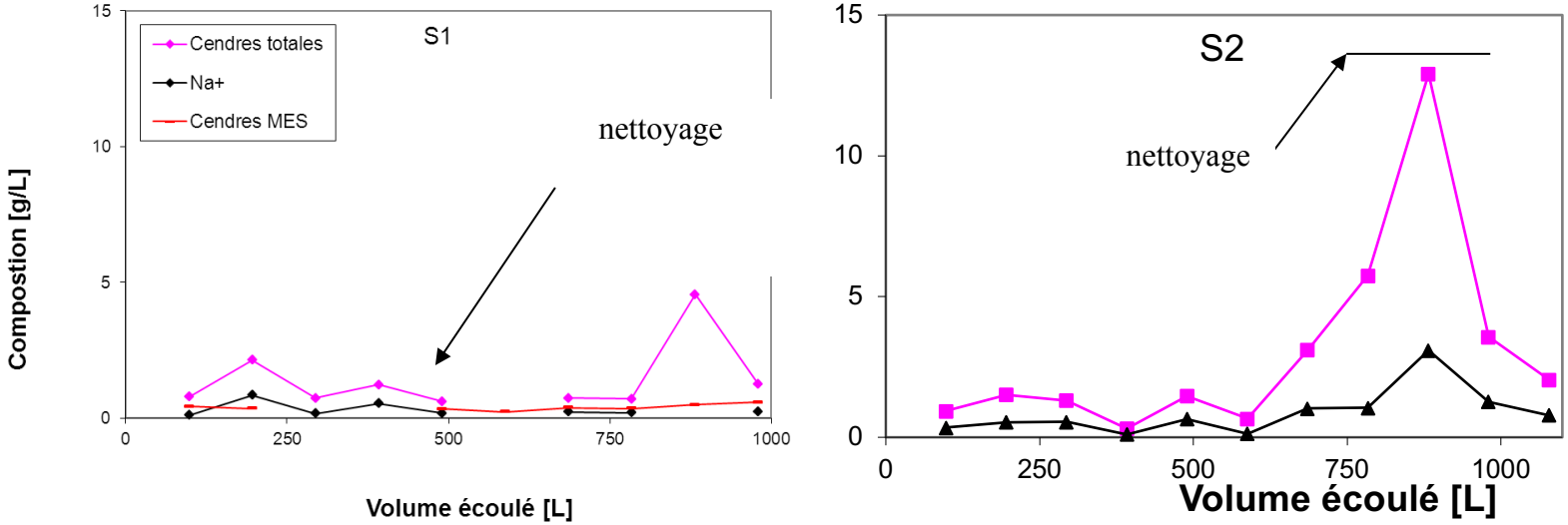


Figure 11: Teneur en cendres totales, cendres des MES et Na+ des eaux usées écoulées du 23 au 29/03/2010 (S1) et du 04 au 09/04/2010 (S2) en fonction du volumé écoulé cumulé

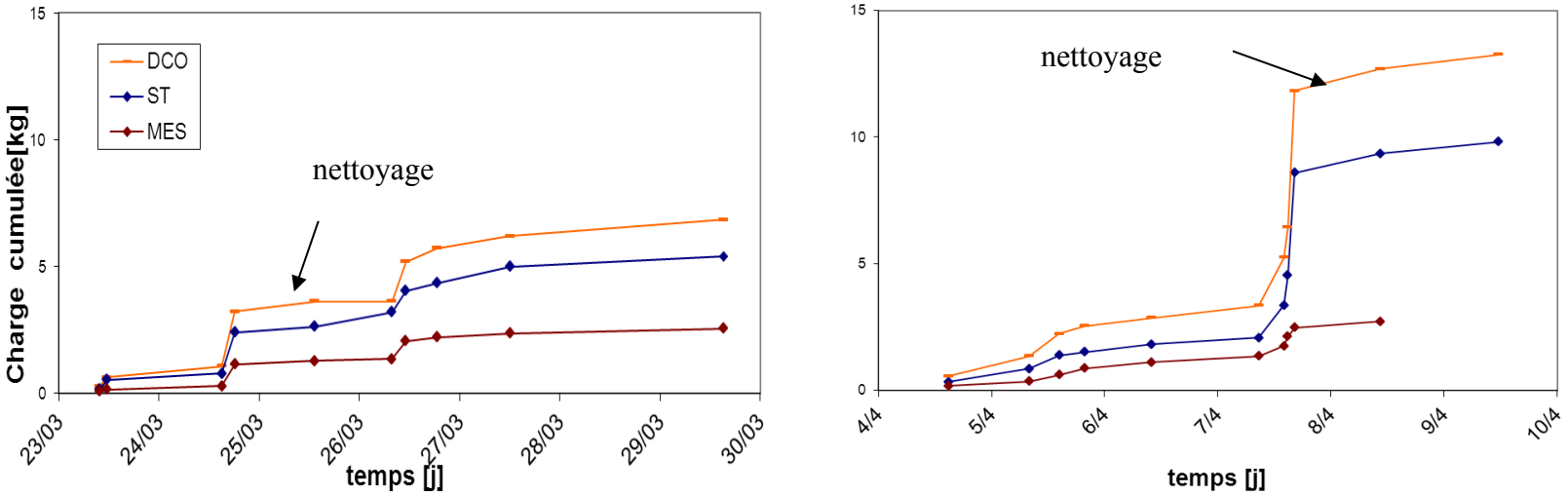


Figure 12: Charge cumulée en ST, MES et DCO des eaux de nettoyage écoulées durant (S1) et (S2) en fonction du temps

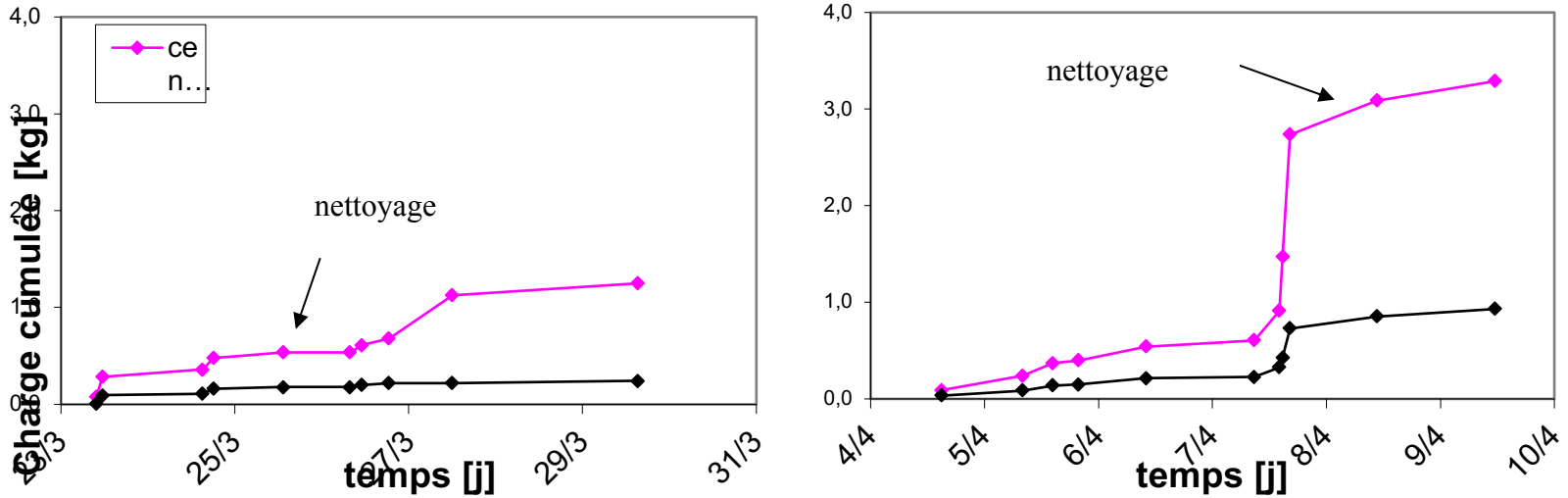


Figure 13: Charge cumulée en cendres totales et Na+ des eaux de nettoyage écoulées durant (S1) et (S2) en fonction du temps

Lors de la période S1 et S2, on observe un pic majoritaire de concentration lors du nettoyage pour les ST, MES et DCO. (Figure 8 et 9). Le Tableau 21 permet de montrer la contribution du nettoyage à la charge polluante émise durant la période de mesure.

Tableau 21: Contribution du nettoyage à la charge polluante émise durant la période de mesure

	Contribution du nettoyage à la charge polluante émise		
	S1	S2	unités
DCO	0,32	0,64	$kg_{DCO\ nettoyage}/kg_{DCO\ totale}$
ST	0,30	0,66	$kg_{ST\ nettoyage}/kg_{ST\ totale}$
MES	0,34	0,42	$kg_{MES\ nettoyage}/kg_{MEStotale}$
Cendres	0,10	0,65	$kg_{cendres\ nettoyage}/kg_{cendres\ totales}$
Na+	0,25	0,54	$kg_{Na+\ nettoyage}/kg_{Na+\ totale}$

Pour la plupart des caractéristiques mesurées, l'épisode de nettoyage contribue fortement à la charge polluante émise durant la période de mesure. Le Tableau 22 présente les quantités spécifiques de charge polluante émise.

Tableau 22: Quantités spécifiques de charge polluante émise par kilo de savon produit (sortie savonnerie)

	Quantité spécifique de charge polluante émise			
Caractéristique	S1	S2	moyenne	unités
DCO	23	14	16	g_{DCO}/kg_{savon}
ST	18	10	12	g_{ST}/kg_{savon}
MES	8	3	4	g_{MES}/kg_{savon}
Cendres	4	3	3	$g_{cendres}/kg_{savon}$
Na+	1	1	1	g_{Na+}/kg_{savon}

Les quantités spécifiques de charge polluante émises varient entre les deux périodes de mesure.

Discussion

La contribution du nettoyage à l'émission des charges polluantes est grande (minimum 30% pour la plupart des caractéristiques). Cette affirmation est à nuancer puisque les quantités de savon produites durant cette période (130 kg_{savon}/jour) ne sont pas représentatives des quantités produites durant un régime normal (environ 500 kg_{savon}/ jour).

2.7 Synthèse des caractéristiques retenues

Le Tableau 23 synthétise les valeurs retenues pour la suite de l'étude. Ces valeurs se basent sur les valeurs moyennes déterminées expérimentalement ci-dessus. Le cas échéant, des hypothèses ont été retenues sur base de valeurs de la littérature. La dernière colonne permet de comparer la fraction de matière sèche non huileuse (MSNH).

Tableau 23 : Caractéristiques moyennes des matières considérées dans les différentes étapes de la savonnerie. Les valeurs extrêmes sont en caractère gras. Les valeurs issues de la littérature sont sur fond gris. Les écart-types représentent la variabilité par batch.

	T_{eau}	$T_{cendres}$	T_{SV}		$T_{cendres}$	T_{SVNH}
			T_{huile}	T_{SVNH}		
Matière	[g/100g_{MF}]		[g/100g_{MS}]		[g/100g_{MSNH}]	
Am*	9 ± 1,7	1,6 ± 0,4	51,6	46,8	**3,31**	96,7
AmC	10,2 ± 0,6	1,29 ± 0,06	/	98,71 ± 0,06	/	/
Bois	45 ± 2	0,7	/	96	/	/
AmS*	5,8 ± 0,6	2,1	51,6	46,3	4,3	95,7
AmCS	5,7	1,29 ± 0,06	/	98,71 ± 0,06	/	/
TPS	5,9 ± 2	3,2 ± 0,2	8,5	88,3	3,5	96,5
TPH	4,4 ± 0,3	3,9 ± 0,7	44 ± 4	52 ± 4	7,0	93,0
Boues	60 ± **7**	8 ± **2**	37 ± **16**	55 ± 16	**12,7**	87,3

/ : pas applicable

La composition de la MSNH varie entre les différentes matières; les teneurs en cendres des boues et des tourteaux palmistes huileux sont significativement plus élevées (dernière colonne). Les boues ont des caractéristiques dont la variabilité par batch est sensiblement plus grande que les autres matières.

Discussion

La composition de la MSNH varie entre les différentes matières. Or nous avions fait l'hypothèse que la composition des SVNH boues était similaire à celle des tourteaux secs. Cette hypothèse n'est pas contredite par cette observation. En effet, l'augmentation de la teneur en cendres au cours du procédé ne signifie pas que la composition des SVNH ait été radicalement changée, quoi qu'elle ait pu être modifiée.

La teneur en cendres des tourteaux huileux (7g/100 g_{MSNH}) devrait être la même que celle des tourteaux secs (3,5 g/100 g_{MSNH}), puisque les deux tourteaux sont issus du pressage. Les tourteaux secs sont évacués à la fin de la vis, alors que les tourteaux huileux sont constitués des particules broyées qui accompagnent l'huile sortant par le début de la vis.

3 Bilan massique

Le but de cette section est le calcul des quantités spécifiques des matières entrantes et sortantes des étapes du procédé., exprimée en kg/100 kg_{MF_Am}.

Les quantités de matière ont été obtenues de manières différentes. Certaines sont issues de mesures ponctuelles, d'autres du registre répertoriant les quantités mensuelles, d'autres encore d'un rapport stœchiométrique. Lorsque plusieurs valeurs d'origines différentes coexistent, elles sont comparées et discutées.

3.1 Huilerie

L'inventaire détaillé des flux de matière et d'énergie de l'unité huilerie est donné sous forme de flow-sheet, à la Figure 14.

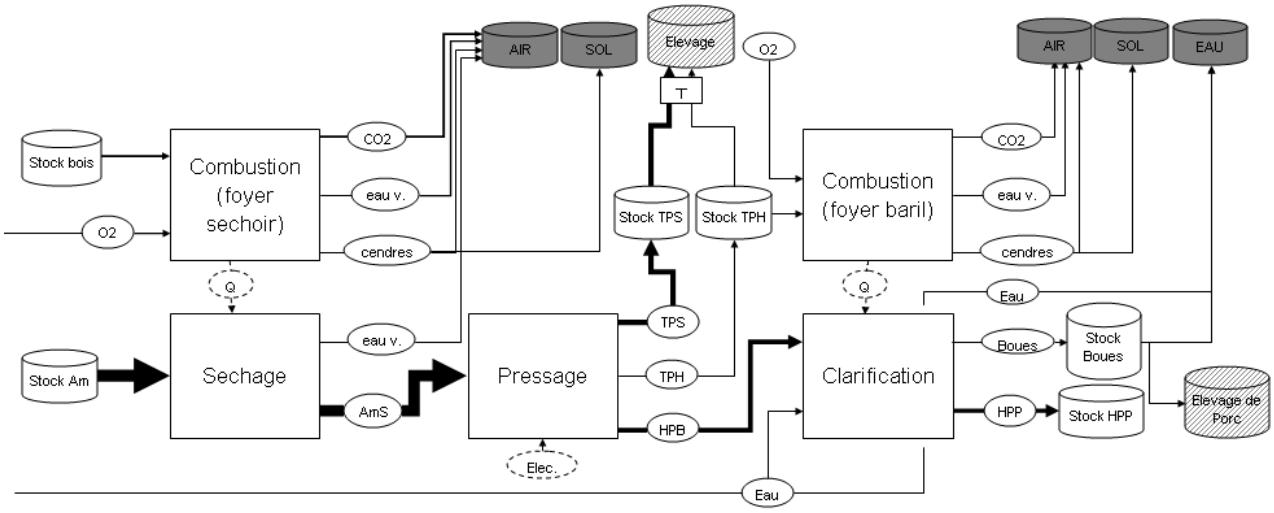


Figure 14: Flow-sheet détaillé du procédé de l'unité huilerie. Les flèches continues représentent les flux de matière, les flèches en pointillé les flux d'énergie. La grosseur des flèches continues est proportionnelle à la quantité de matière.

La procédure d'estimation des quantités spécifiques à partir des données du registre comptable pour l'unité huilerie est présentée dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Procédure d'estimation des quantités spécifiques à partir des données du registre comptable pour l'unité huilerie

Etape du procédé	Matière	Quantité mesurée	Unité	Fréquence	Procédure d'estimation de la quantité spécifique	Quantité spécifique	Unité
Séchage							
IN	Am	masse d'un lot	kg	lot		100	
	Bois	nombre de stères d'un lot	stère	lot	[kg_{MF_Bois}/100kg_{MF_Am}] = [stère/an]*[kg_{MF_bois}/stère] /[kg_{MF_Am}/an]*100 = 468*480/373000*100 La masse volumique a été calculée par la pesée d'une stère de bois.	21	kg_{MF_Bois}/ 100 kg_{MF_Am}
OUT	AmS	nombre de bacs	bac	batch	[kg_{MF_AmS}/100kg_{MF_Am}] = [kg_{MF_AmS}/ bac]*[bac/mois]/ [kg_{MF_Am}/mois]*100	89 ± 2	kg_{MF_AmS}/ 100 kg_{MF_Am}
	Eau_{vapeur}	non-mesurée	/	/	/	?	
	Cendres	non-mesurée	/	/	/	?	
	gaz	non-mesurée	/	/	/	?	
Pressage							
IN	AmS					89 ± 2	kg_{MF_AmS}/ 100 kg_{MF_Am}
OUT	TPS	masse d'un lot	kg	lot	Le passage en kg s'effectue par [kg_{MF_TPS}/100kg_{MF_Am}] = [kg_{MF_TPS}/mois]/[kg_{MF_Am}/mois]*100	45 ± 5	kg_{MF_TPS}/ 100 kg_{MF_Am}
	TPH	non-mesurée	/	/	/	?	
	HPB	nombre de bidons	bidon	batch	Le passage du nombre de bidons en litres s'effectue par l'approximation du volume d'un bidon, et le passage en kg s'effectue par la densité, que nous avons mesurée (au point 2.4) avec l'hypothèse que la densité de l'huile brute que nous avons mesurée est constante dans le temps. [kg_{MF_HPB}/100kg_{MF_Am}] = [# Bidon/batch]*[batch/mois]*[L/bidon]* [kg_{MF_HPB}/L]/[kg_{MF_Am}/mois]*100	36 ± 2	kg_{MF_HPB}/ 100 kg_{MF_Am}

Clarification							
IN	Eau	pas mesurée : proportion selon recette	bidon	batch		4,6 ± 0,3	kg_{eau}/ 100 kg_{MF_Am}
	TPH	non mesuré	/	/	/	?	
	HPB					36 ± 2	kg_{MF_HPB}/ 100 kg_{MF_Am}
OUT	HPP		bassine	batch	[kg_{MF_HPB}/100kg_{MF_Am}] = [bac de savon/mois]*[# Bassine/bac de savon]*[L/bassine]* [kg_{MF_HPB}/L]/[kg_{MF_Am}/mois]*100 Le passage en litre s'effectue par l'approximation du volume d'une bassine, et le passage en kg s'effectue par la densité, que nous avons mesurée (au point 2.4) avec l'hypothèse que la densité de l'huile pure que nous avons mesurée est constante dans le temps.	32 ± 2	kg_{MF_HPB}/ 100 kg_{MF_Am}
	Boues	/	/	/	/	?	
	cendres	/	/	/	/	?	
	Gaz	/	/	/	/	?	

/ : pas applicable

?: donnée non connue.

3.1.1 Séchage

Données : obtention, calcul, comparaison et discussion

Les mesures de quantité de matière ont été effectuées sur 4 batches consécutifs ; les résultats sont présentés dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Calcul des quantités spécifiques de l'étape de séchage

		Quantité par batch [kg/batch]				Quantité moyenne par batch	Quantité spécifique	écart type
	Matière	1.0	1.1	1.2	1.3	[kg/batch]	[kg/100kg$_{MF_Am}$]	
IN	Am	1000	999	1014	1000	1003	100	-
OUT	AmS	962	941	957	948	952	95	1

La quantité spécifique d'amandes séchées est comparée avec les quantités spécifiques déduites du registre (Tableau 26).

Tableau 26: Comparaison entre les quantités spécifiques d'amandes séchées calculées à partir des données issues de notre étude et celles déduites du registre. Moyenne et écart-type.

	Quantité spécifique		
Matière	**notre étude**	**déduite du registre**	**unités**
AmS	95 ± 1	89 ± 2	[kg/100kg$_{MF_Am}$]

La quantité spécifique d'amandes séchées que nous avons mesurée est significativement supérieure à celle déduite du registre. Cependant, les quantités déduites du registre se basent sur le calibrage du bac dans lequel les amandes séchées sont stockées avant pressage, et dont l'exactitude n'a pas été confirmée. De plus, la perte de matière que nous observons dans notre bilan est du même ordre de grandeur que la perte en eau issue nos calculs précédents (voir Tableau 23). C'est pourquoi nous utiliserons la valeur issue de notre étude dans le bilan massique.

Bilan massique

Le bilan massique des matières et constituants entrants et sortants a été calculé en utilisant les quantités spécifiques calculées ci-dessus, ainsi que les données issues de la partie caractérisation (

Tableau 27).

Tableau 27 : Bilan massique des matières et des constituants de ces matières, exprimés en quantités spécifiques. Les valeurs de la colonne grisée représentent la quantité spécifique de matière. Les valeurs des lignes représentent la quantité spécifique de constituant (eau ou MS) de la matière. Les valeurs de la ligne « total » correspondent à la quantité spécifique totale de constituant. Les valeurs de la ligne OUT –IN représentent le bilan massique de chaque constituant ou de la matière (en gris)

Matière	Eau [kg/100kg$_{MF_Am}$]	MS [kg/100kg$_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN				
Am*	7,7	79,3	87	175
AmC	1,3	11,7	13	26
TOTAL	**9**	**91**	**100**	**201**
OUT				
AmS*	4,8	77,8	83	166
AmCS	0,7	11,6	12	25
Eau_{vapeur}	3,5	0,0	4	7
TOTAL	**9**	**89**	**98**	**198**
OUT- IN	0,0	-2	-2	
(OUT- IN) / IN [%]	0,0	-0,02	-0,02	

$Am^* = (1-T_{AmC})*Am$
$AmC = T_{AmC}*Am$
$AmS^* = (1-T_{AmC})*AmS$
$AmCS = T_{AmC}*AmS$
$eau_X = T_{eau_X}*X$
$MS = X-eau_X$

Il y a une fuite de 2% dans le bilan de matière totale, qui n'est pas significative (même ordre de grandeur que l'incertitude sur la quantité d'Am).

Le bilan d'eau n'a pas été vérifié, puisque la quantité de vapeur d'eau n'a pas été mesurée, mais calculée. Cette quantité moyenne par batch est comparable avec celles calculées précédemment dans la partie caractérisation (2,1-5,6 $kg_{eau}/100kg_{MF_Am}$). Les contaminants présents dans les amandes contribuent à 13% de la masse entrante, mais à 16% de l'eau évaporée.

3.1.2 Foyer de séchage

Données : obtention, calcul, comparaison et discussion

La mesure de quantité de matière a été effectuée sur 1 batch, le résultat est présenté dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Calcul de la quantité spécifique de bois de chauffe

	matière	Quantité par batch [kg/batch]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_Am}$]
IN	Bois	85,5	6,2
	Am	1380	100

Cette quantité spécifique est comparée avec les quantités spécifiques déduites du registre (Tableau 29).

Tableau 29: Comparaison entre les quantités spécifiques de bois calculées à partir des données issues des expériences et celles issues de la consommation annuelle.

	Quantité spécifique		
Origine des données	**Notre étude**	**Déduite du registre**	**Unités**
Matière			
Bois	6,2	21,1	[$kg/100kg_{MF_Am}$]

La quantité spécifique de bois calculée à partir des données déduites du registre est significativement supérieure à celle issue de notre mesure. Y a-t-il surconsommation durant l'année entière, ou notre mesure correspond-elle à une sous-consommation ? Cette consommation faible correspond peut être à un batch d'amandes contenant peu d'humidité, ou alors les amandes n'ont pas été assez séchées. Il se peut aussi que l'entièreté du bois acheté ne serve pas qu'à la combustion du séchoir, et que la quantité spécifique issue du registre surestime la quantité de bois réellement consommée. N'ayant pas d'informations complémentaires, nous considérons que l'entièreté du bois consommé l'est au séchoir, et utiliserons donc la quantité spécifique calculée à partir du registre de la consommation annuelle 2009.

Les quantités d'O_2, de CO_2, d'eau et de cendres ont été calculées sur base de la stœchiométrie de combustion et de la composition du bois. Les résultats sont présentés dans le Tableau 30.

Tableau 30: Calcul des matières entrantes et sortantes du foyer du séchoir

	Formule	Rapport stœchiométrique [kg/kg_{SV_bois}]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{Bois}$]
IN			
O_2	8*H+2,67*C-O	1,441	73,5
OUT			
Cendres	$T_{cendres}$*MS	0,007	0,8
CO_2	3,67*C	1,859	94,8
Eau_{vapeur}	9*H_2+ T_{eau}*MF	0,576+ 0,45	74,4

Symbole	Signification	Unité
H	Teneur en H des SV du combustible	[g_H/g_{SV}]
C	Teneur en C des SV du combustible	[g_C/g_{SV}]
O	Teneur en O des SV du combustible	[g_O/g_{SV}]

Bilan massique des matières et des constituants

Les quantités spécifiques calculées dans le Tableau précédant, ainsi que les données issues de la partie caractérisation nous permettent de dresser un bilan des matières entrantes et sortantes, visible dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Calcul des quantités spécifiques des matières et constituants

	Matière	Eau	SV	Cendres	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_savon}$]
		[$kg/100kg_{MF_Am}$]				
IN						
	Bois	9,5	11,4	0,14	21	42
	O_2				16	33
OUT						
	Cendres	-	-	0,14	0,2	0,3
	CO_2	-	-	-	21	43
	Eau_{vapeur}	16,0	-	-	16	32

3.1.3 Pressage

Données et bilan massique des matières

Les mesures de quantité de matière ont été effectuées sur 4 batches consécutifs, les résultats sont présentés dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Bilan massique des matières et calcul des quantités spécifiques de l'étape de pressage

	Quantité par batch [kg/batch]				Quantité moyenne par batch	Quantité spécifique	écart type
Matière	Batch 1.0	Batch 1.1	Batch 1.2	Batch 1.3	[kg/batch]	[kg/100kg $_{MF_AmS}$]	
IN							
AmS	962	941	957	948	952	100	1
TOTAL	962	941	957	948	952	100	
OUT							
TPS	432	422	484	427	441	46,4	3
TPH	87	66	75	65	73	7,8	1
HPB	471	454	355	375	414	43,6	6
TOTAL	990	941	914	867	928	97,7	
OUT-IN	28	1	-44	-80	-24	-2,3	5

L'incertitude sur la quantité spécifique d'huile est plus élevée comparée à celles des autres matières.

Il y a une fuite de 2,3 kg par 100kg d'amandes séchées entrantes. Mais elle n'est pas significative car l'incertitude de cette fuite est du même ordre de grandeur (5kg/100Kg $_{MF_AmS}$).

Les quantités spécifiques calculées ci dessus sont comparées avec celles déduites du registre (Tableau 33).

Tableau 33 : Comparaison entre les quantités spécifiques de l'opération de pressage issue de notre étude et celles déduites du registre.

	Quantité spécifique		
Origine des données	**Notre étude**	**Déduite du registre**	**Unités**
Matière			
TPS	44 ±3	45 ± 5	[kg$_{MF_TPS}$ /100kg$_{MF_Am}$]
TPH	7 ± 1	?	[kg$_{MF_TPH}$ /100kg$_{MF_Am}$]
HPB	41 ± 6	36 ± 2	[kg$_{MF_HPB}$ /100kg$_{MF_Am}$]

La quantité spécifique de tourteaux secs calculée à partir des données du registre est du même ordre de grandeur que la quantité que nous avons mesurée. Par contre, la quantité spécifique d'huile brute calculée à partir des registres est significativement inférieure à celle issue de nos mesures.

Les quantités de tourteaux secs inscrites dans le registre ont été pesées. Ce n'est pas le cas des quantités d'huile brute qui ont été calculées à partir du registre : les

données primaires sont exprimées en nombre de bidons, et des estimations ont été faites quant à la densité et aux volumes de ces bidons pour les convertir en une unité de masse. Pour cette raison, nous utiliserons donc les quantités spécifiques issues de nos mesures dans le bilan massique des constituants.

Bilan massique des constituants

Les quantités spécifiques calculées dans le Tableau précédent, ainsi que les données issues de la partie caractérisation nous permettent de dresser un bilan des constituants entrants et sortants, visible dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Bilan massique des constituants et estimation des quantités spécifiques de l'étape de pressage

Matière	Eau	Huile	SVNH	Cendres	Quantité spécifique [kg/ 100 kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
		[kg/100 kg $_{MF_Am}$]				
IN						
AmS*	4,5	40,4	36,3	1,3	83	166
AmCS	0,7	0,0	11,5	0,2	12	25
TOTAL	**5**	**40**	**48**	**2**	**95**	**191**
OUT						
TPS	2,6	3,5	36,5	1,3	44	88
TPH	0,3	3,1	3,6	0,3	7	15
HPB	0,0	39,0	1,9	0,3	41	83
TOTAL	**3**	**46**	**41**	**2**	**93**	**186**
OUT- IN	-2	6	-6	0	-2	
$\frac{\text{(OUT- IN)}}{\text{IN}}$ [%]	-43	14	-13	0	-3	

La fuite d'eau est importante, mais connaissant les erreurs relatives des taux d'humidité (Tableau 23), elle est non significative. Idem pour les autres variations. 14% de l'huile est perdue via les tourteaux secs et huileux.

3.1.4 Clarification

Données et bilan massique des matières

Les mesures de quantité de matières ont été effectuées sur 1 batch, les résultats sont présentés dans le Tableau 35.

Tableau 35: Bilan massique des matières et calcul des quantités spécifiques de l'étape de clarification

Matière	Quantité par batch [kg/batch] 1.0	Quantité spécifique [kg/100kg$_{HPB}$]	écart type
IN			
HPB	468	100	/
eau	63	13	/
TOTAL	531	113	/
OUT			
HPP	435	93	/
Boues	98	21	/
TOTAL	533	114	/
OUT-IN	2	1	/

Les quantités spécifiques calculées ci dessus sont comparées avec celles déduites du registre (Tableau 36).

Tableau 36 : Comparaison entre les quantités spécifiques de l'opération de clarification issue de notre étude et celles déduites du registre.

	Quantité spécifique		
Origine des données	**Notre étude**	**Déduite du registre**	**Unités**
Matière			
HPB	41 ± 6	36 ± 2	[kg$_{MF_HPB}$/100kg$_{MF_Am}$]
Eau	6	4,6 ± 0,3	[kg$_{MF_eau}$/100kg$_{MF_Am}$]
HPP	38	32 ± 2	[kg$_{MF_HPP}$/100kg$_{MF_Am}$]
Boues	9	?	[kg$_{MF_boues}$/100kg$_{MF_Am}$]
Rendement HPP/HPB	0,93	0,89	[kg$_{MF_HPP}$/kg$_{MF_HPB}$]

Bilan massique

Les quantités spécifiques calculées dans le Tableau précédent, ainsi que les données issues de la partie caractérisation nous permettent de dresser un bilan des matières entrantes et sortantes, visible dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Bilan massique des constituants et estimation des quantités spécifiques de l'étape de clarification

	Matière	Eau	Huile	SVNH	Cendres	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
			[kg/100kg $_{MF_Am}$]				
IN							
	HPB	0,04	39,6	1,9	0,26	41	83
	Eau	5,55	-	-	-	6	11
	TOTAL	**5,5**	**40**	**2**	**0,3**	**47**	**94**
OUT							
	HPP	0,0	38,3	0,00	0,00	38	77
	Boues	5,1	1,3	1,9	0,3	9	17
	TOTAL	**5,1**	**40**	**2**	**0,3**	**47**	**95**
	OUT- IN	-0,5	0	0	0	0	
	(OUT- IN) / IN [%]	-0,08	0,00	0,00	0,00	0	

3.1.5 Foyer de clarification

Données : obtention et calcul

La quantité de tourteaux huileux utilisés pour alimenter le foyer sous les fûts de la clarification n'a pas été mesurée ; nous nous baserons sur l'estimation du responsable du procédé, qui estime que cette quantité ne dépasse pas le tiers des TPH produits.

Les quantités d'O_2, de CO_2, d'eau et de cendres ont été calculées sur base de la stœchiométrie de la réaction de combustion et de la composition atomique des tourteaux huileux. Pour estimer cette dernière, nous avons approximé la composition des SVNH par la composition atomique de tourteaux secs [Razuan et al., 2010] et utilisé la composition atomique de l'huile palmiste [Lin et al., 2008]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Calcul des matières entrantes et sortantes du foyer du clarificateur

	Matière	Formule du calcul stœchiométrique	Rapport stœchiométrique [kg/kg $_{SV_TPH}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_TPH}$]
IN	O_2	(8*H+2,67*C- O)*T_{SVNH} + (8*H+2,67*C- O)* T_{huile}	1,47*0,54+ 2,76*0,46	189
OUT	Cendres	T_{cendre}	0,041	4
	CO_2	(3,67*C) *T_{SVNH} + (3,67*C) * T_{huile}	1,93*0,54+ 2,67* 0,46	208
	Eau_{vapeur}	(9*H) *T_{SVNH} + (9*H) * T_{huile} + T_{eau}	0,51*0,54+ 1,07*0,46 + 0,048	75

Symbole	Signification	Unité
H	Teneur en H des SV du combustible	[g_H/g_{SV}]
C	Teneur en C des SV du combustible	[g_C/g_{SV}]
O	Teneur en O des SV du combustible	[g_O/g_{SV}]

Quantités spécifiques

Les quantités spécifiques calculées dans le Tableau précédent, ainsi que les données issues de la partie caractérisation nous permettent de dresser un Tableau des quantités spécifiques des matières entrantes et sortantes, visible dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Calcul des quantités spécifiques du foyer de clarification

	Matière	Eau	Huile	SVNH	Cendres	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
			[kg/100kg $_{MF_Am}$]				
IN							
	TPH	0,1	1	1	0,1	2	5
	O_2	-	-	-	-	5	8
OUT							
	Cendres	-	-	-	0,1	0,1	0,2
	CO_2	-	-	-	-	5,0	9
	Eau_{vapeur}	2	-	-	-	2	3

3.2 Savonnerie

L'inventaire détaillé des flux de matière et d'énergie de l'unité savonnerie est donné sous forme de flow-sheet, à la Figure 15.

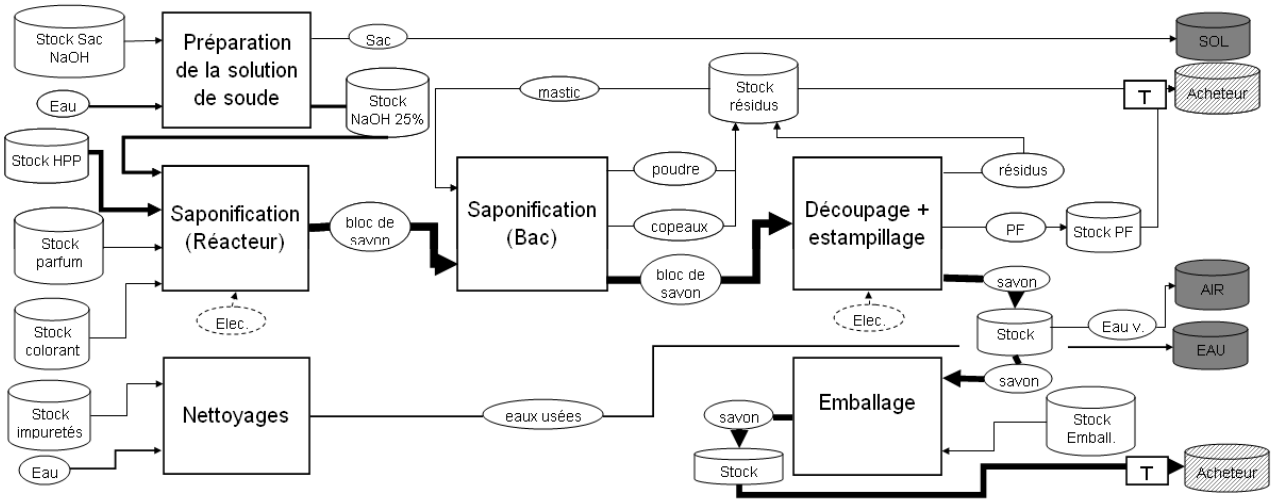


Figure 15 : Flow-sheet détaillé des procédés se déroulant au sein de l'unité savonnerie. Les flèches continues représentent les flux de matière, les flèches en pointillé les flux d'énergie. La grosseur des flèches continues est proportionnelle à la quantité de matière.

Les quantités de matières entrantes et sortantes des procédés de l'unité savonnerie n'ont pas été mesurées. Contrairement à l'unité huilerie, les quantités spécifiques sont connues et « maîtrisées », puisque les matières doivent être ajoutées en quantités connues selon la recette (Tableau 40). Les quantités de mastic, de poudre et de copeaux de savon ont été estimées sur base des quantités annuelles vendues.

Tableau 40: Proportions selon recettes

Matière	Rapport selon recette [kg/kg_{HPP}]	Quantité par batch [kg/batch]
HPP	1	173,0
NaOH 25,9%	0,668	115,5
Colorants	0,00071	0,1
Parfum	0,0043	0,7
Mastic		1,7

Le bilan massique de l'unité savonnerie est donné du Tableau 41 au Tableau 46

Tableau 41: Bilan massique de l'étape de saponification

	Matière	Eau [kg/100kg $_{MF_Am}$]	MS [kg/100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	HPP	-	37,8	37,8	77,1
	NaOH 25,9%	18,7	6,5	25,2	51,5
	Colorants	-	0,03	0,03	0,05
	Parfum	-	0,11	0,11	0,22
	Mastic	0,1	0,27	0,38	0,78
OUT					
	Poudre	0,5	1,3	1,8	3,7
	Copeaux	0,6	1,3	1,9	3,9
	Savon Bloc	17,6	42,3	59,9	122,2

Tableau 42: Bilan massique de l'étape de préparation de la soude diluée

	Matière	Eau [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	MS [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	Sac	-	0,1	0,1	0,3
	NaOH	-	6,5	6,5	13,3
	eau	18,7	-	18,7	38,1
OUT					
	NaOH 25,9%	18,7	6,5	25,2	51,5
	Sac	-	0,1	0,1	0,3

Tableau 43: Bilan massique de l'étape de découpage/estampage

	Matière	Eau [kg/100kg $_{MF_Am}$]	MS [kg/100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	Bloc de savon	17,6	42,3	59,9	122,2
OUT					
	Savon	17,3	41,6	59,0	120,4
	Savon PF*	0,1	0,1	0,2	0,4

* :PF= petit format

Tableau 44: Bilan massique de l'étape de stockage

	Matière	Eau [kg/100kg $_{MF_Am}$]	MS	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	Savon	17,3	41,6	59,0	120,4
OUT					
	Savon sec	7,3	41,6	49,0	100,0
	Eau_{vapeur}	10,0	-	10,0	20,4

Tableau 45: Bilan massique de l'étape d'emballage

	Matière	Eau [kg/100kg $_{MF_Am}$]	MS	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	Savon GF sec	7,3	41,6	49,0	100,0
	Emballage plastique	-	0,1	0,1	0,2
OUT					
	Savon GF sec emballé	7,4	41,7	49,1	100,2

Tableau 46: Bilan massique de l'étape de production de mastic

	Matière	Eau [kg/100kg $_{MF_Am}$]	MS	Quantité spécifique [kg/ 100kg $_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [kg/100kg $_{MF_savon}$]
IN					
	Poudre + copeaux	1,1	2,6	3,7	7,5
OUT					
	Mastic	0,1	0,3	0,4	0,8
	Poudre + copeaux à vendre	1,0	2,3	3,3	6,8

3.3 Transport

La quantité de mazout n'a pas été mesurée pour un transport en particulier, mais sa quantité estimée sur base de la quantité totale consommée sur l'année (registre de la savonnerie). (Tableau 47)

Tableau 47 : Calcul de la quantité spécifique de carburant consommé

	Matière	Quantité par an [kg/an]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_Am}$]
IN	Mazout	11224	3,1
	Am	1380	100

Les quantités d'O_2, de CO_2, d'eau et de cendres ont été calculées sur base de la stœchiométrie de combustion. Les résultats sont présentés dans le

Tableau 48.

Tableau 48: Calcul des matières entrantes et sortante du foyer du séchoir

		Formule	Rapport stœchiométrique [kg/kg_{MS_mazout}]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_Am}$]	Quantité spécifique [$kg/100kg_{MF_savon}$]
IN	Mazout	-	-	3,1	6,2
	O_2	8*H+2,67*C	3,469	10,8	21,6
OUT					
	CO_2	3,67*C	3,115	9,7	19,4
	Eau_{vapeur}	9*H	1,354	4,2	8,4

Symbole	Signification		Unité
H	Teneur en H du mazout	0.15	[g_H/g_{mazout}]
C	Teneur en C du mazout	0.85	[g_C/g_{mazout}]

3.4 Bilan global

Le bilan global de la savonnerie, tel qu'établi ci-dessus, est présenté à la Figure 16.

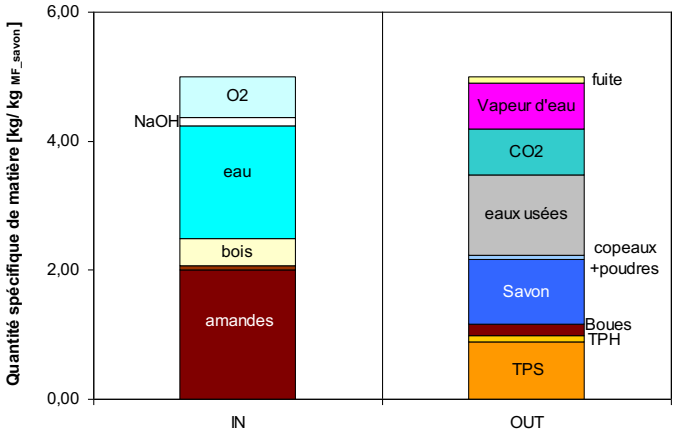


Figure 16: Bilan massique global de la savonnerie

Le bilan massique basé sur nos estimations met en évidence une « fuite » de matière de 2%. Le flow-sheet global permet de suivre l'évolution des quantités spécifiques exprimées en kg/100 kg_{MF_Am} (Figure 17).

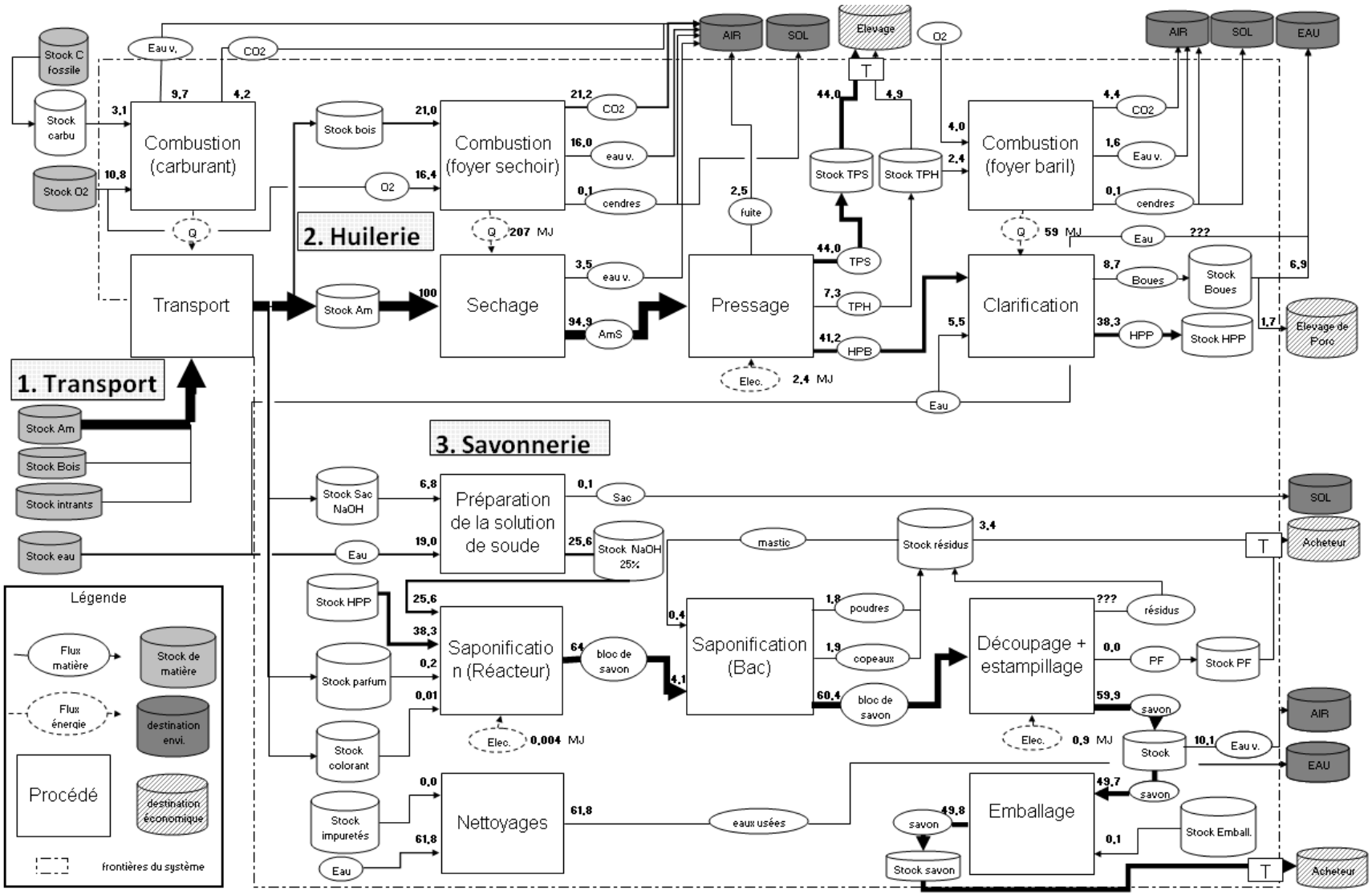


Figure 17 : Flow-sheet global de la savonnerie, avec les flux de matière exprimé en kg/100 kg_{MF_Am} et les flux d'énergie en MJ/100 kg_{MF_Am}

4 Bilan énergétique

4.1 Résultats

La consommation énergétique spécifique des étapes du procédé utilisant l'énergie électrique a été estimée par le calcul de la puissance moyenne effective et le débit de matière entrante (Tableau 49). Cette estimation suppose que la puissance moyenne effective est constante au cours du temps, et que le débit estimé est représentatif du débit réel.

Le compresseur fonctionnant par cycle de compression-détente, nous avons mesuré la consommation après un nombre entier de cycle.

Tableau 49 : Estimation de la consommation spécifique des étapes du procédé utilisant l'énergie électrique

Etape du procédé	Consommation énergétique [kWh]	Intervalle de temps [h]	Puissance moyenne effective [kW]	Débit de matière entrante	Unités	Consommation spécifique [MJ/kg $_{MF_Am}$]
Pressage	1,57	1	1,57	250	kg $_{MF_AmS}$/h	2,4 *10^{-2}
Saponification	0,05	0,28	0,018	187	L_{HPP}/batch	4,0 * 10^{-5}
Estampillage	0,23	0,88	0,26	420	savons/h	8,5 * 10^{-3}

La consommation énergétique spécifique (CES) des étapes du procédé utilisant un combustible a été estimée par les quantités spécifiques de combustible, et le PCI de ces combustibles (Tableau 50). Les hypothèses ont été posées dans le Matériel et Méthode au point 4.2).

Tableau 50 : Estimation de la consommation spécifique des étapes du procédé utilisant l'énergie calorifique

Etape du procédé	Quantité spécifique de combustible [kg_MF/100kg $_{MF_Am}$]	Com-bustible	PCI [MJ/kg $_{MF_combustible}$]	Consommation spécifique [MJ/kg $_{MF_Am}$]	Consommation énergétique spécifique (CES)	CES théorique
Transport	3,1	Mazout	42,6	1,3	/	/
Séchage	21,1	Bois	9,9	2,1	59,4 [MJ/kg $_{eau_g}$]	3,3- 6,5 [a]
Clarification	2,4	TPH	25,7	0,6	1,26 [MJ/ kg $_{HPP + eau}$]	0,18 [b]

[a] : CES d'un procédé classique de séchage par entraînement d'air [Meurens, 2009]. Ce procédé consiste en l'apport de chaleur via un gaz vecteur dont la pression partielle de l'eau est inférieure à celle du produit à sécher, ce qui permet le transfert de l'eau par le gaz vecteur et le séchage du produit.

[b] : énergie nécessaire pour faire passer le mélange (huile brute + eau) de 20 à 100°C.

La CES de l'étape de séchage est 9 à 18 fois supérieure à la CES d'un procédé classique de séchage par entraînement d'air. La CES de l'étape de clarification est 7 fois supérieure à la CES théorique. La répartition de la consommation énergétique est présentée à la Figure 18

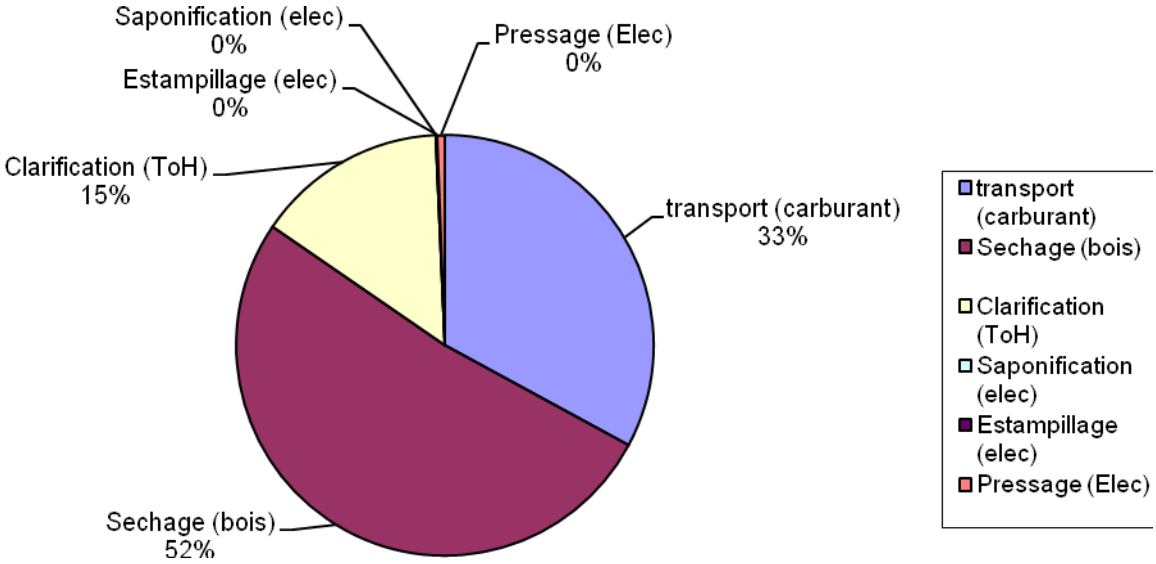


Figure 18 : Répartition de la consomation énergétique

Le type d'énergie qui est consommée majoritairement (67%) à la savonnerie est calorifique. La moitié de l'énergie consommée sert au séchage des noix, un tiers sert au transport.

4.2 Discussion

La CES de l'étape de séchage est d'un ordre de grandeur supérieur à la CES d'un procédé classique de séchage par entraînement d'air ; cette étape est donc inefficiente. La consommation de bois que nous avions mesurée était environ 3 fois inférieure à la consommation annuelle de bois. Même dans ce cas, le séchage reste inefficient.

La CES de l'étape de clarification est 7 fois supérieure à la CES théorique. Cette étape est donc inefficiente. Mais cette consommation se base sur une estimation : la consommation de tourteaux huileux a été estimée (un tiers des tourteaux huileux produit sont utilisés pour la combustion) et non mesurée.

5 Bilan environnemental

5.1 Définition du champ de l'étude

5.1.1 Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle de notre système est le kilo de matière fraîche de savon produit. Il s'agit en fait une quantité arbitraire de savon (notre flux de référence), plutôt qu'une unité répondant à une certaine fonction. L'unité fonctionnelle du LCA d'un savon se rapporte en général à un certain nombre de lavage. Dans notre contexte, le savon est utilisé autant pour le lavage du corps que pour la lessive. Nous pourrions définir l'unité fonctionnelle suivante : « laver le corps et les vêtements d'une famille kivutienne moyenne pendant un an ». L'estimation de la quantité de savon se rapportant à cette unité demanderait des hypothèses non vérifiables. Il faudra donc garder à l'esprit lors des comparaisons que la quantité de savon consommée dans les pays industrialisé sera plus importante, à unité fonctionnelle égale.

5.1.2 Délimitation des frontières du système

La frontière temporelle choisie est l'année ; c'est l'unité la plus couramment choisie dans les LCA de produits, car les données disponibles (financières et d'inventaire) sont typiquement reportées sur une base annuelle [Brunner et Rechberger, 2005]. Le choix de cette frontière est justifié par sa pertinence, bien que la temporalité des données utilisées dans le bilan de masse est hétérogène (hypothèses, expériences ponctuelles, données mensuelles ou annuelles). Cette hétérogénéité est une lacune de beaucoup de LCA [Yi and Bakshi, 2007].

La frontière spatiale choisie est représentée dans la Figure 19. Elle délimite l'extension de chaque sous-système en amont et en aval du sous-système savonnerie, chaque sous-système étant une étape du cycle de vie. L'amont comprend la production des intrants et l'aval comprend l'utilisation et la fin de vie du produit. La délimitation du sous-système savonnerie a été effectuée par le flow-sheet (Figure 17). La délimitation des autres sous-systèmes est décrite plus bas.

Pour déterminer cette frontière, c'est-à-dire pour décider si le devenir d'un déchet ou la production d'un produit doit être prise en compte, des hypothèses simplificatrices sont en général posées, à condition d'être explicitées (selon la norme ISO14001). Les hypothèses que nous avons posées l'ont été dans d'autres LCA [Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004; Gonzalez-Garcia et al., 2010], et sont les suivantes :

(1) Les procédés ayant de multiple outputs (par ex., NaOH et Cl_2 sont des co-produits) font l'objet d'une allocation en fonction de la masse de l'output ;

(2) Les intrants dont les informations sont manquantes et dont la masse est non significative par rapport à la masse totale des intrants ont été exclus du système (les colorants et parfums) ;

(3) L'étape de construction des infrastructures (savonnerie, usines produisant les intrants) est exclue du système ; cette exclusion est justifiée par le fait que les impacts environnementaux liés à la construction et à la déconstruction sont considérés comme amortis pendant leur utilisation.

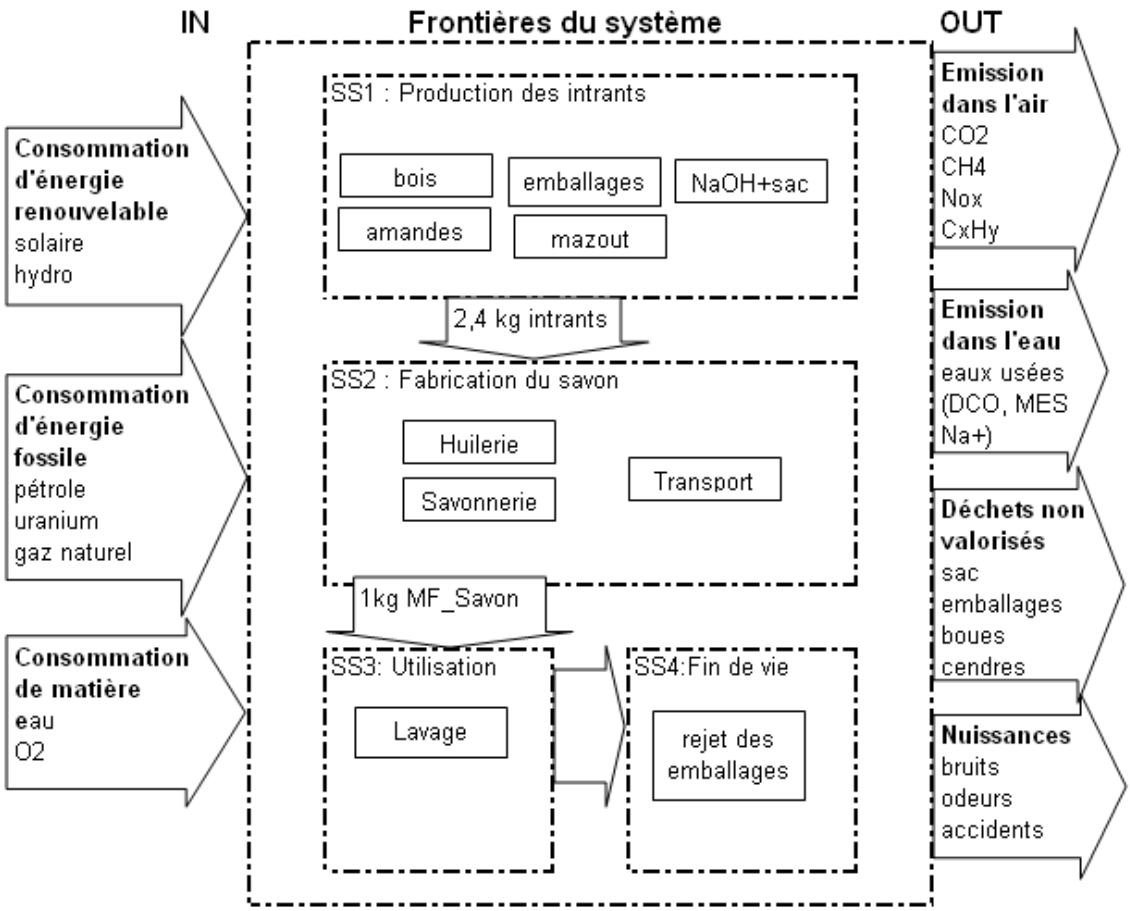


Figure 19: Frontières spatiales du système. SS = sous-système

SS1 : Production des intrants

Les procédés de production des intrants ne sont pas connus avec exactitude, nous nous sommes donc basés sur des inventaires « standards », provenant de bases de données (ELCD-European Life Cycle Database :[EPLCA project team, 2003; EPLCA project team, 2005; EPLCA project team, 1996]) ou d'inventaires de LCAs déjà effectués [de Souza et al., 2010; Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004].

La production de mazout a fait l'objet d'un inventaire du berceau à la porte (craddle to gate LCI)[EPLCA project team, 2003]. Cet inventaire comprend toutes les étapes du procédé depuis l'extraction (ce qui comprend les étapes d'exploration) jusqu'au raffinage. Le raffinage peut inclure un arrangement différent de ces étapes selon les raffineries, mais la plupart comprennent toutes ces étapes [EPLCA project team, 2003]. Nous n'avons pas tenu compte du transport du mazout de la raffinerie jusqu'à Bukavu, ne connaissant pas l'origine exacte de production lors des calculs.

Faute de données locales, la production du bois de chauffe a été assimilée à la production de bois d'épicéa pour laquelle un inventaire du berceau à la porte est disponible [EPLCA project team, 2005]. Celui-ci couvre la plantation et la croissance des arbres, la manutention, l'installation de chemins forestiers, l'application de chaux, l'éclaircissage, la récolte, le stockage du bois humide récolté et le transport. La croissance prend en compte l'incorporation de l'énergie solaire et du CO_2 atmosphérique. La fertilisation ne fait pas partie du système ; elle a été supposée comme non nécessaire par les auteurs de l'inventaire. Les opérations d'abattage et débitage sont effectuées à la tronçonneuse. L'inventaire a été utilisé afin de donner un ordre de grandeur, puisque le type de bois utilisé à la savonnerie, ainsi que la manière dont il est récolté n'est pas connu. Nous posons l'hypothèse que les impacts environnementaux liés à cet inventaire sont supérieurs aux impacts environnementaux liés à la gestion du système forestier kivutien.

La production des amandes a été assimilée à la production des amandes en Indonésie, qui a fait l'objet d'un LCA [de Souza et al., 2010]. Le système de ce LCA comprend la culture des palmiers, le transport des régimes de palmier jusqu'à l'huilerie de palme, et l'obtention des coques par défibrage des tourteaux de palme huileux. Nous avons repris les données issues de ce LCA avec nos hypothèses suivantes :

(1) la culture des palmiers est exempte d'intrants chimiques (nous avons exclu le sous-système de production des intrants chimiques) ;

(2) l'énergie utilisée pour l'étape de cuisson des régimes est renouvelable (combustible utilisé : bois ou coques).

Comme les auteurs, nous avons effectué une allocation par masse entre les deux co-produits de l'huilerie de palme : huile de palme (80kg/100kgMF_coproduits) et amandes (20 kg/100kgMF_coproduits). En effet, l'ensemble des impacts liés au système comprenant la culture et l'extraction de l'huile de palme doit être réparti entre les produits sortant du système.

La production de NaOH a fait l'objet d'un inventaire du berceau à la porte [EPLCA project team, 1996]. Le NaOH est un co-produit du Cl_2 gazeux, obtenu par un procédé d'électrolyse. L'inventaire comprend les étapes depuis l'extraction des

matières premières (NaCl), la production d'électricité primaire, jusqu'à l'électrolyse. Nous n'avons pas tenu compte du transport de la soude de la station d'électrolyse jusqu'au Congo, ne connaissant pas l'origine exacte de production lors des calculs.

La production des parfums et colorants n'a pas été inclue dans notre système à cause d'un manque de données. Nous avons supposé les quantités négligeables ($1,4*10^{-3}$ et $6,8*10^{-5}$ kg/kg MF_intrants).

La production des sacs de NaOH a été assimilée à la production de cabas souples en polyéthylène basse densité (PEBD). La production des sacs d'emballage a été assimilée à la production de sacs jetables en polyéthylène haute densité (PEHD). Ces deux types de sacs plastiques ont fait l'objet d'un LCA [Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004]. Celui-ci comprend notamment les étapes allant de l'extraction des matières premières jusqu'à la production du polymère et la fabrication des sacs.

SS2 : Fabrication du savon

La fabrication du savon a fait l'objet d'un inventaire détaillé dans les sections Bilan massique et énergétique. Celui-ci comprend l'étape de transport des intrants du fournisseur vers la savonnerie et du savon de la savonnerie vers les marchands.

La combustion de bois de chauffe au séchoir a été assimilée à combustion de bois dans un poêle pour le chauffage domestique, qui a fait l'objet d'un LCA [Soli et al., 2009]. Il s'agit d'un poêle traditionnel dont le rendement de combustion est estimé à 50%. Nous avons utilisé les données de l'inventaire du sous-système de combustion pour déterminer les quantités de gaz émis (CH_4, N_2O, NO_x, SO_x, COVnM) par unité de masse de bois brûlé. Nous considérons que les résultats obtenus ci-dessous avec ces hypothèses sont optimistes, étant donné que l'efficacité de combustion du séchoir et des foyers de clarification est inférieure à celle de ces poêles.

SS3 : Utilisation

L'utilisation consiste au lavage du linge et du corps, au sein de familles kivutiennes. Nous considérons que :

(1) les familles habitent essentiellement en milieu rural ;

(2) l'eau utilisée n'est pas chauffée ;

(3) La quantité d'eau utilisée est de 100L/kg $_{MF_savon}$.

SS4 : Fin de vie

La fin de vie du savon débute lors du rejet des eaux de lavage. Nous considérons que :

(1) l'eau est déversée sur les sols, ou directement dans les cours d'eau ;

(2) le savon et les impuretés du lavage sont bio-dégradés dans l'environnement (excepté Na^+); il n'y a pas de système de traitement des eaux usées.

La fin de vie des sacs plastiques démarre après qu'ils ont été réutilisés et usés. Nous considérons que :

(1) Les sacs plastiques ne sont pas utilisés comme combustible ;

(2) Les sacs plastiques sont jetés sur le sol ;

(3) Il n'existe pas de système de ramassage organisé pour rassembler les déchets plastiques dans des endroits appropriés pour un éventuel recyclage [Kasongo Lukongo, 2004].

5.1.3 Sélection des catégories d'impact

Une sélection de quelques catégories est nécessaire ; nous ne disposons pas du temps et de données suffisantes pour évaluer toutes les catégories d'impacts. La sélection a été effectuée sur base des critères de pertinence et de faisabilité. La faisabilité d'utilisation d'une catégorie est déterminée par les quantités et la disponibilité des données nécessaires à entrer dans le modèle. La pertinence des catégories d'impacts est donnée dans le Tableau 51 et le Tableau 52. Les aspects environnementaux présentés dans le Tableau 52 sont issus de ceux définis par L'EMAS (Eco-management and audit scheme)[5].

[5] Définit à l'annexe I du règlement (CE) N°1221/2009 du parlement européen et du conseil du **25 novembre 2009**

Tableau 51 : Catégories d'impacts liées au sous système « production des intrants »

PRODUCTION des INTRANTS	Catégories d'impacts liées
Mazout	2
Amandes	1, 3, 8, 10
Bois	1, 3, 10
NaOH	3, 4, 5, 7, 8, 9
Sac NaOH	2, 3, 5, 9
Parfum	/
Colorant	/
Emballage	2, 3, 5, 9

Tableau 52 : Catégories d'impacts liées au sous système savonnerie, utilisation et fin de vie

	Consommation		Emission			Déchet non valorisé	Nuisance	Risques
	Energie	Matière 1ère	Air	Eau	Sol			
TRANSPORT	2 Q		3, 5, 9					accidents
PRODUCTION								
Séchage	1 Q	O2	3, 5			cendres	11 fumées	blessures brûlures
Pressage	El		3, 5				11 fumées bruit	blessures
Clarification	1 Q	eau, O2	3, 5	6, 8	Huile 10	boues cendres	11 fumées	brûlures
NaOH		eau				sac NaOH	11 vapeurs	brûlures
Saponification	El							brûlures
Découpe/E	El							
Emballage								
Nettoyage		eau		8	Na+ 10			
UTILISATION	/	eau	/	/	/	/		
FIN DE VIE				8	Na+ 10	emballage		
Catégories d'impacts liées (∑)	**1,2**	**/**	**3, 5, 9**	**6, 8**	**10**	**/**	**11**	**/**

Q : combustible
El : électrique

Ces deux critères sont qualitatifs et subjectifs, ils ne font pas partie de la méthode du LCA, mais ils permettent de justifier sommairement le choix de certaines catégories et le rejet d'autres.

Les catégories pertinentes et faisables ont été sélectionnées. Les catégories pertinentes mais non faisables ne sont pas utilisées mais les impacts relatifs à ces catégories sont estimés dans la mesure du possible en quantifiant les émissions du système. (Tableau 53)

Tableau 53 : Sélection des catégories d'impacts environnementaux utilisées dans notre étude. Les catégories choisies sont en caractère gras. Les catégories pertinentes mais non faisables sont estimées par des aspects environnementaux liés.

Catégorie d'impact	Numéro	Pertinence					Faisa-bilité	Aspects environne-mentaux liés
		SS 1	SS 2	SS3	SS 4	total		
Ressources biotiques	1	X	X			OUI	NON	non évalué
Ressources abiotiques	2	X	X	X		OUI	OUI	
Réchauffement climatique	3	X	X			OUI	OUI	
Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	4	X				NON	OUI	
Acidification atmosphérique	5	X	X			OUI	OUI	
Eutrophisation (aquatique et terrestre)	6	X	X		X	OUI	NON	non évalué
Toxicité humaine	7	X				NON	NON	
Ecotoxicité	8	X	X		X	OUI	NON	émission de DCO et MES
Production d'oxydants photochimique	9	X	X			OUI	OUI	
Utilisation des sols	10	X	X		X	OUI	NON	émission de Na+
Nuisances (bruit, odeur, chaleur, radiations)	11		X			OUI	NON	nuisances et risques
Production de déchets	12	X	X			OUI	OUI	

Les catégories choisies (2, 3, 5, 9, 12) estiment l'impact en début de chaîne causale, ce qui simplifie les modèles qui les sous-tendent et diminue le nombre

d'hypothèses. Les ressources abiotiques consommées (2) (excepté l'eau) sont essentiellement des combustibles, et les quantités de matière seront converties en énergie par leur PCI. Cette catégorie ne contient donc pas les impacts dus à l'épuisement de réserves autres que les combustibles fossiles (tels que les minerais). La production de déchets (12) comprend les déchets non valorisés (mis en décharge, ou rejetés sans traitement dans l'environnement, tels que les boues de clarification).

L'estimation de l'impact de la consommation des ressources biotiques (1) (notamment la consommation de bois) aurait nécessité une connaissance plus grande des conditions d'exploitation des ressources forestières de la région. Néanmoins, la consommation des combustibles biotiques sera intégrée de manière spécifique dans la catégorie des ressources abiotiques en transformant leur quantité de matière en énergie par leur PCI.

L'impact d'eutrophisation (6) n'est pertinent que pour le rejet des boues de clarification. En effet, les quantités de phosphore et d'azote dans les rejets d'eau usées sont supposées inexistantes, et la DCO n'est pas considérée comme cause d'eutrophisation, bien que certains indicateurs l'englobent dans cette catégorie d'impact [Pennington et al., 2004].

L'impact d'écotoxicité (8) demande la connaissance des espèces vivantes présentes dans les cours d'eau et le lac avoisinant, ainsi que les PNECs spécifiques à chaque espèce et chaque type de substance toxique. Nous estimerons cette catégorie par les quantités de DCO et de MES émise dans l'eau.

L'impact des nuisances (11) aurait été difficile à calculer, que ce soit en volume d'air pollué ou de l'exposition à la pollution sonore. Une énumération qualificative sera donc effectuée.

Les indicateurs utilisés pour les catégories d'impacts sélectionnées sont présentés dans le Tableau 54.

Tableau 54: Indicateurs utilisés et leurs facteurs de caractérisation

Catégorie d'impact	Indicateur	Unité	Substance	Facteur de caractéri-sation	Source
Ressources abiotiques	Consommation de ressources fossiles	MJ	Mazout Bois TPH	$PCI_{substance}$	/
	Consommation d'eau	kg_{eau}	eau	/	/
Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement global	$kg_{eq.CO2}$	CO_2 CH_4 N_xO	1 23 296	IPCC ,2001
Acidification atmosphérique	Potentiel d'acidification	$g_{eq.H+}$	NO_x SO_x	0,022 0,031	Heijungs et al., 1992
Production d'oxydants photochimiques	Formation d'oxydant photochimique	$g_{eq.C2H2}$	VOCnM	0,377	Ecobilan Pricewaterhous eCoopers, 2004
Production de déchets	Déchets non valorisés produits	$kg_{déchet}$	/	/	/
Ecotoxicité	DCO	kg_{DCO}	/	/	/
	MES	kg_{MES}	/	/	/
Utilisation des sols	Na+	kg_{Na+}	/	/	/
Nuisances (bruit, odeur, chaleur, radiations)	Observation qualitative	/	/	/	/

5.2 Inventaire

L'inventaire du cycle de vie est présenté du Tableau 55 au Tableau 58. Les substances sélectionnées dans cet inventaire sont les facteurs majoritaires d'impacts pour les catégories d'impacts sélectionnées.

Tableau 55 : Inventaire du SS1 (l'étape de production des intrants), exprimé par quantité spécifique d'intrant.

Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Intrants Mazout	Am	Bois	NaOH	Sac	Emballage
Source bibliographique			[1]	[2] [3]	[4]	[5]	[6]	[6]
Energie non renouvelable	charbon brown	MJ/kg intrant	4,8E-02	/	2,6E-04	1,6E-04	/	/
	charbon hard	MJ/kg intrant	1,3E-01	/	3,0E-04	3,7E+00	/	/
	pétrole	MJ/kg intrant	5,0E+00	/	9,2E-02	2,1E+00	/	/
	gaz naturel	MJ/kg intrant	2,7E+00	/	6,0E-03	8,1E+00	/	/
	uranium	MJ/kg intrant	2,5E-01	/	4,5E-04	5,5E+00	/	/
	TOTAL	MJ/kg intrant	8,1E+00	9,0E-01	9,9E-02	1,9E+01	7,4E+01	7,3E+01
Energie renouvelable	géothermie	MJ/kg intrant	1,2E-03	/	1,6E-07	8,5E-02	/	/
	hydro	MJ/kg intrant	5,6E-02	/	8,0E-05	1,0E+00	/	/
	solaire	MJ/kg intrant	4,8E-03	/	9,6E+00	<	/	/
	éolien	MJ/kg intrant	5,4E-03	/	2,4E-05	<	/	/
	bois	MJ/kg intrant	1,3E+00	/	3,6E-08	1,4E-01	/	/
	TOTAL	MJ/kg intrant	1,3E+00	6,8E+00	9,6E+00	1,2E+00	1,3E+00	1,0E+00
Consommation d'eau	eau surface	kg/ kg intrant	8,5E-01	?	1,6E-03	/	/	/
	eau rivière	kg/ kg intrant	-5,7E-01	?	-1,4E-03	/	/	/
	eau mer	kg/ kg intrant	5,2E-02	?	<	/	/	/
	eau sous sol	kg/ kg intrant	3,2E-02	?	7,4E-01	/	/	/
	TOTAL	kg/ kg intrant	3,7E-01	?	7,4E-01	9,6E+00	1,2E+01	1,3E+01
Réchauffement climatique	CO2	kg/ kg intrant	3,0E-01	/	6,8E-03	1,1E+00	2,4E+00	2,6E+00
	CH4	kg/ kg intrant	3,4E-03	/	8,3E-06	1,2E-02	8,0E-03	8,6E-03
	N2O	kg/ kg intrant	7,0E-06	/	1,1E-08	8,7E-13	6,5E-06	1,7E-05
	CO2e	kg/ kg intrant	3,8E-01	6,5E-02	7,0E-03	1,4E+00	2,6E+00	2,8E+00
Acidification atmosphérique	H+	kg/ kg intrant	9,3E-11	?	2,9E-13	4,2E-13	?	?
	Nox (NO2)	kg/ kg intrant	8,8E-04	3,8E-04	7,6E-05	3,0E-03	7,0E-03	6,9E-03
	Sox	kg/ kg intrant	1,8E-03	1,7E-04	9,3E-06	4,8E-03	6,4E-03	6,0E-03

Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Mazout	Am	Bois	NaOH	Sac	Emballage
Production d'oxydants	VOCnM	kg/ kg $_{intrant}$	2,6E-04	?	6,2E-05	6,4E-04	1,4E-03	5,8E-03
Ecotoxicité	DCO	kg/ kg $_{intrant}$	1,4E-04	?	2,3E-07	4,6E-06	1,3E-03	1,3E-03
	MES	kg/ kg $_{intrant}$	2,5E-03	?	7,9E-06	3,5E-03	3,9E-05	7,5E-04
	Na+	kg/ kg $_{intrant}$	7,4E-05	?	2,3E-07	3,9E-02	1,7E-03	1,3E-03
Déchets Type de déchet		kg/ kg $_{intrant}$	<	?	<	1,1E-03 (plastiques)	4,5E-06 (municipaux)	9,5E-06 (municipaux)

[1] [EPLCA project team, 2003]
[2] [Yusoff and Hansen, 2007]
[3] [de Souza et al., 2010]
[4] [EPLCA project team, 2005]
[5] [EPLCA project team, 1996]
[6] [Ecobilan PricewaterhouseCoopers, 2004]
? : donnée non trouvée
< :quantité négligeable
/ : pas applicable

Tableau 56 : Inventaire du SS1 (l'étape de production des intrants)

Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Mazout	Am	Bois	NaOH	Sac	Emballage
Energie non renouvelable	charbon brown	MJ/kg $_{MF_savon}$	3,0E-03	/	1,1E-04	2,1E-05	/	/
	charbon hard	MJ/kg $_{MF_savon}$	8,0E-03	/	1,3E-04	5,0E-01	/	/
	pétrole	MJ/kg $_{MF_savon}$	3,1E-01	/	3,9E-02	2,8E-01	/	/
	gaz naturel	MJ/kg $_{MF_savon}$	1,7E-01	/	2,5E-03	1,1E+00	/	/
	uranium	MJ/kg $_{MF_savon}$	1,6E-02	/	1,9E-04	7,3E-01	/	/
	TOTAL	MJ/kg $_{MF_savon}$	5,1E-01	1,8E+00	4,2E-02	2,6E+00	2,0E-01	1,2E-01
Energie renouvelable	géothermie	MJ/kg $_{MF_savon}$	7,7E-05	/	6,8E-08	1,1E-02	/	/
	hydro	MJ/kg $_{MF_savon}$	3,5E-03	/	3,4E-05	1,3E-01	/	/
	solaire	MJ/kg $_{MF_savon}$	3,0E-04	/	4,1E+00	<	/	/
	éolien	MJ/kg $_{MF_savon}$	3,4E-04	/	1,0E-05	<	/	/
	bois	MJ/kg $_{MF_savon}$	7,8E-02	/	1,5E-08	1,9E-02	/	/
	TOTAL	MJ/kg $_{MF_savon}$	8,2E-02	1,4E+01	4,1E+00	1,6E-01	3,4E-03	1,6E-03

Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Mazout	Am	Bois	NaOH	Sac	Emballage
Consommation d'eau	eau surface	kg/kg $_{MF_savon}$	5,3E-02	?	6,7E-04	/	/	/
	eau rivière	kg/kg $_{MF_savon}$	-3,5E-02	?	-5,8E-04	/	/	/
	eau mer	kg/kg $_{MF_savon}$	3,3E-03	?	0,0E+00	/	/	/
	eau sous sol	kg/kg $_{MF_savon}$	2,0E-03	?	3,1E-01	/	/	/
	TOTAL	kg/kg $_{MF_savon}$	2,3E-02	?	3,1E-01	1,3E+00	3,3E-02	2,2E-02
Réchauffement climatique	CO2	kg/kg $_{MF_savon}$	1,9E-02	/	2,9E-03	1,5E-01	6,4E-03	4,1E-03
	CH4	kg/kg $_{MF_savon}$	2,1E-04	/	3,5E-06	1,5E-03	2,1E-05	1,4E-05
	N2O	kg/kg $_{MF_savon}$	4,3E-07	/	4,4E-09	1,2E-13	1,7E-08	2,7E-08
	CO2e	kg/kg $_{MF_savon}$	2,4E-02	1,3E-01	3,0E-03	1,9E-01	6,9E-03	4,5E-03
Acidification atmosphérique		kg/kg $_{MF_savon}$						
	H+		5,8E-12		1,2E-13	5,5E-14		
	Nox (NO2)	kg/kg $_{MF_savon}$	5,5E-05	7,6E-04	3,2E-05	4,0E-04	1,9E-05	1,1E-05
	Sox	kg/kg $_{MF_savon}$	1,1E-04	3,3E-04	3,9E-06	6,4E-04	1,7E-05	9,6E-06
Production d'oxydants	VOCnM	kg/kg $_{MF_savon}$	1,6E-05	?	2,6E-05	8,5E-05	3,6E-06	9,2E-06
Ecotoxicité	DCO	kg/kg $_{MF_savon}$	8,5E-06	?	9,8E-08	6,1E-07	3,5E-06	2,1E-06
	MES	kg/kg $_{MF_savon}$	1,6E-04	?	3,3E-06	4,6E-04	1,1E-07	1,2E-06
	Na+	kg/kg $_{MF_savon}$	4,6E-06	?	9,8E-08	5,2E-03	4,7E-06	2,0E-06
Déchets		kg/kg $_{MF_savon}$	<	?	<	1,5E-04	1,2E-08	1,5E-08
Type de déchet						(plastiques)	(municipaux)	(municipaux)

? : donnée non trouvée
< : quantité négligeable
/ : pas applicable

Tableau 57 : Inventaire du SS2 (Fabrication du savon)

			TRANSPORT	HUILERIE			SAVONNERIE				
Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Transport	Séchage+ foyer	Pressage	Clarification+ foyer	Prépa NaoH	Saponification	Découpe/ estampe	Emballage	Nettoyage
Energie non renouvelable	mazout	MJ/kg $_{MF_Savon}$	2,65E+00								
Energie renouvelable	hydro	MJ/kg $_{MF_Savon}$		4,17E+00	4,79E-02	1,19E+00		8,02E-05	1,71E-02		
Consommation d'eau	eau	kg/kg $_{MF_Savon}$				1,12E-01	3,81E-01				1,24E+00
Réchauffement climatique	CO2	kg/kg $_{MF_Savon}$									
	CH4	kg/kg $_{MF_Savon}$									
	N2O	kg/kg $_{MF_Savon}$									
	CO2eq.	kg/kg $_{MF_Savon}$	1,96E-01 [a]	8,63E-02 [b]		1,72E-02 [c]					
Acidification atmosphérique	H+	kg/kg $_{MF_Savon}$									
	Nox (NO2)	kg/kg $_{MF_Savon}$	1,71E-03 [a]			1,81E-03 [d]					
	Sox	kg/kg $_{MF_Savon}$	6,23E-06 [a]			1,45E-05 [d]					
	H+ eq.	$g_{H+eq.}$/kg $_{MF_Savon}$		1,33E-02 [b]							
Production d'oxydants	COVnM	kg/kg $_{MF_Savon}$	1,20E-04 [a]								
	C_2H_2 eq	$g_{C2H2eq.}$/kg $_{MF_Savon}$		6,48E+00 [b]		1,29E+00 [c]					
Ecotoxicité	DCO	kg/kg $_{MF_Savon}$				8,63E-02					1,21E-02
	MES	kg/kg $_{MF_Savon}$				5,71E-02					3,18E-03
	Na+	kg/kg $_{MF_Savon}$									7,09E-04
Déchets		kg/kg $_{MF_Savon}$				1,41E-01					

[a] : [EPLCA project team, 2007] [b]: [Solli et al., 2009] [c] : estimation basée sur la combustion du bois [Solli et al., 2009]

[d] : estimation basée sur la combustion du bois, et les teneur en azote et en soufre des tourteaux huileux [Mahlia et al., 2001 ; Bruneau, 1979]

Tableau 58 : Inventaire du SS3 et SS4 (Utilisation et fin de vie)

			Sous système	
Type d'impact	Cause : substance/ énergie	Unité	Utilisation	Fin de vie
Energie non renouvelable	/			
Energie renouvelable	/			
Consommation	eau	L/kg	1,00E+02	
Réchauffement climatique	/			
Acidification atmosphérique	/			
Production d'oxydants	/			
Ecotoxicité	DCO	kg/kg $_{MF_Savon}$		2,24E+00
	MES	kg/kg $_{MF_Savon}$		7,60E-03[a]
	Na+	kg/kg $_{MF_Savon}$		7,67E-02

[a] : estimation sur base de la MES d'eau grises [Eriksson et al., 2002]

5.3 Évaluation des impacts environnementaux du savon

5.3.1 Calcul des indicateurs par catégorie d'impact

Les données issues de l'inventaire, ainsi que les facteurs de caractérisation présentés dans le Tableau 54, permettent le calcul des indicateurs par catégorie d'impact pour chaque étape du cycle de vie selon la formule :

$$indicateur = \sum_{s} f_s \times Q_s$$

Où :

Symbole	Signification
f_s	Facteur de caractérisation de la substance « s »
Q_s	quantité spécifique d'une substance « s » émise

Les résultats pour chaque catégorie d'impact sont visibles de la Figure 20 à la Figure 25. La contribution des étapes aux émissions de DCO, MES et Na+ dans l'eau est visible dans la Figure 27.

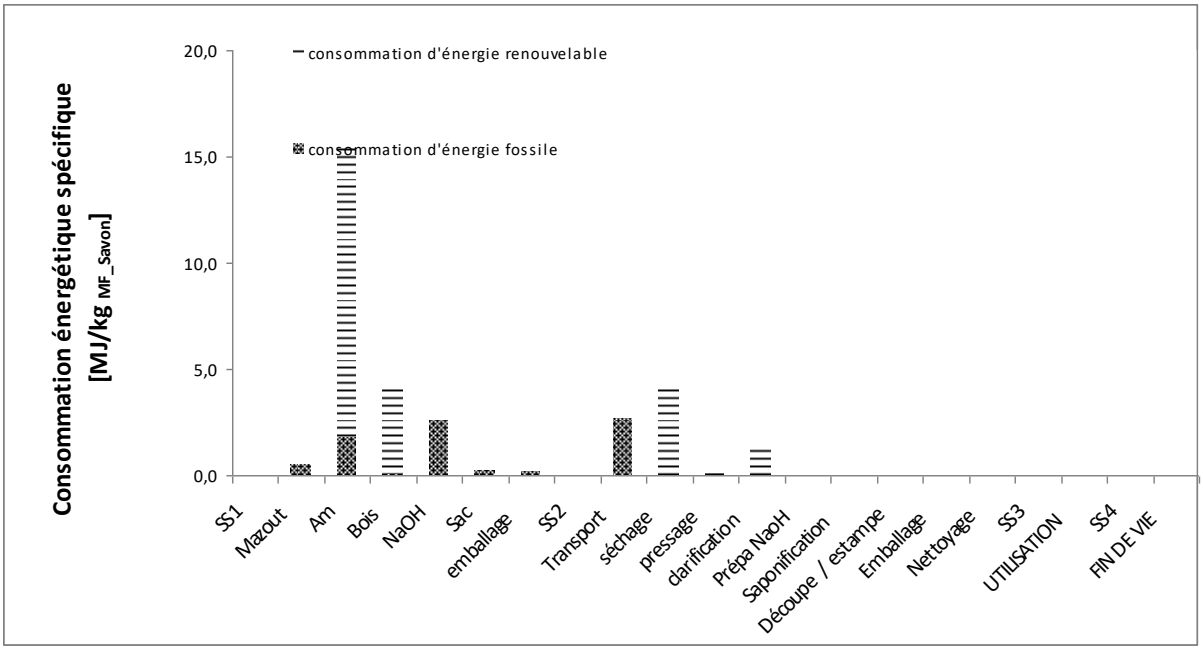


Figure 20: Consommation de ressources énergétiques (fossile et renouvelable) par étape du cycle de vie du savon

La production des amandes est l'étape la plus consommatrice en énergie, suivie par le séchage. Le transport (34 %), la production du NaOH (33%) et des amandes (23%) totalisent 90% de la consommation d'énergie fossile du cycle de vie.

La catégorie énergie renouvelable contient des types d'énergie dont le caractère renouvelable n'est pas certain avec la même précision. Nous avons supposé la consommation des ressources biotiques comme étant renouvelable, dans l'hypothèse d'une bonne gestion des ressources forestières.

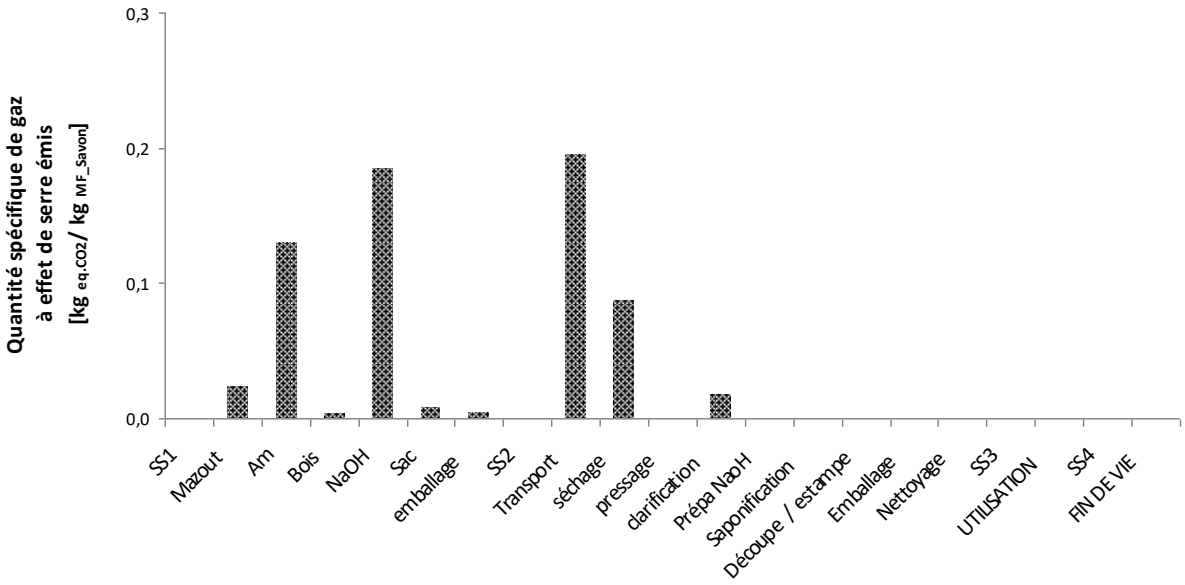


Figure 21: Contribution au réchauffement climatique par étape du cycle de vie du savon

Le transport (30%), la production de NaOH (28%), la production d'amande (20%) et le séchage (13%) sont les étapes émettant la majorité (91%) des gaz à effet de serre.

Malgré que le fait que le CO_2 émis par la combustion du bois et des tourteaux huileux rentre dans un cycle court (à condition que l'hypothèse d'une bonne gestion forestière soit correcte), d'autres gaz à effet de serre y sont produits (CH_4 et N_2O), ce qui explique la contribution significative des étapes de séchage et de clarification à l'émission de gaz à effet de serre.

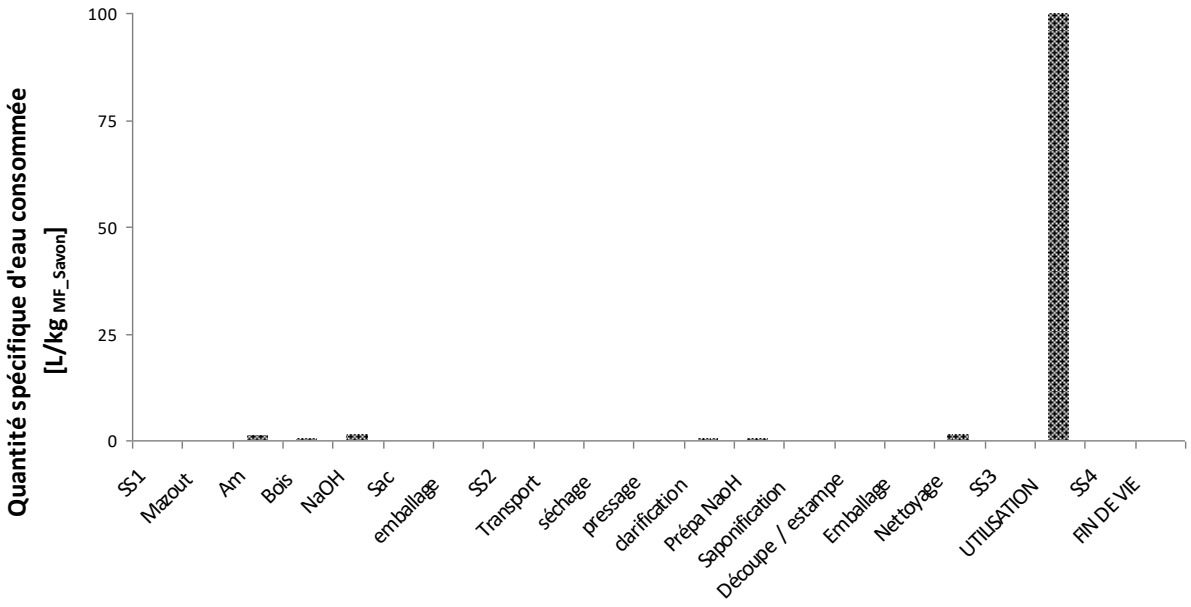


Figure 22: Consommation d'eau (totale, origine non spécifiée) par étape du cycle de vie du savon

La majorité de l'eau (95%) est consommée lors de l'utilisation, même en supposant une quantité minimale d'eau utilisée (100L/kg $_{MF_savon}$).

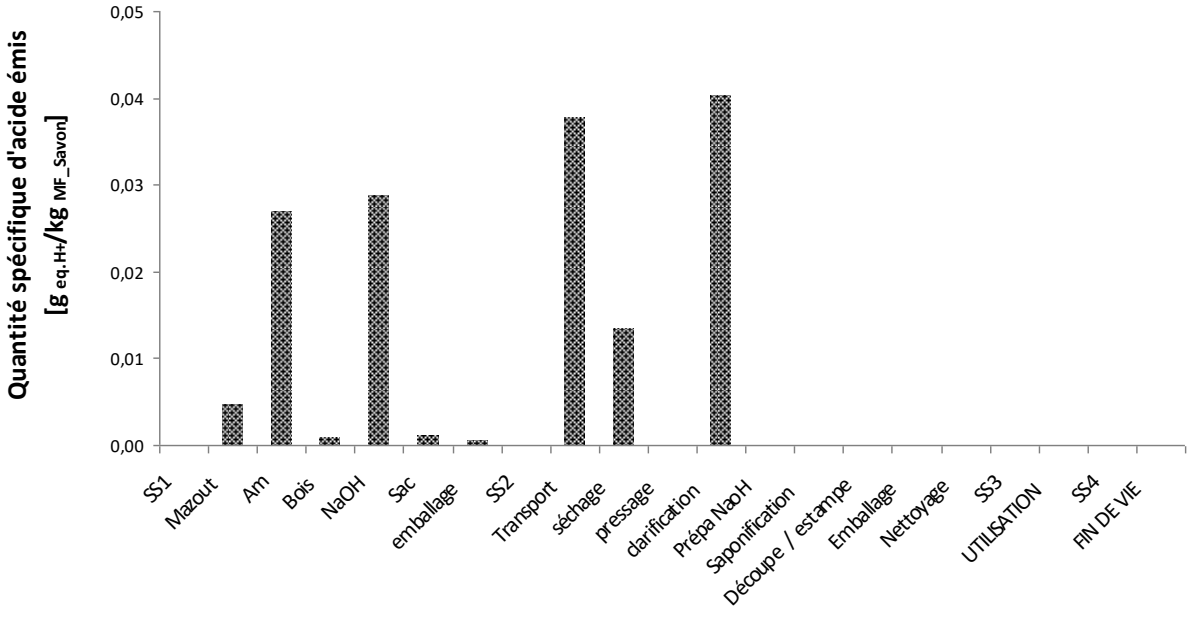


Figure 23: Contribution à l'acidification atmosphérique par étape du cycle de vie du savon

La clarification (26%), le transport (25%), la production de NaOH (19%) et d'amandes (17%) et le séchage (9%) sont les étapes contribuant de façon majoritaire (96%) à l'acidification atmosphérique.

Ce sont les étapes impliquant des processus de combustion qui contribuent le plus à l'acidification atmosphérique. Le fait que la clarification contribue plus largement à l'acidification atmosphérique que l'étape de transport ou la combustion du bois dépend de la qualité du combustible brûlé. En effet, l'émission d'oxydes d'azote (NO_x) dépend essentiellement de la teneur en azote du combustible, qui est beaucoup plus élevée dans les cas des tourteaux huileux que dans le cas du bois ou du diesel.

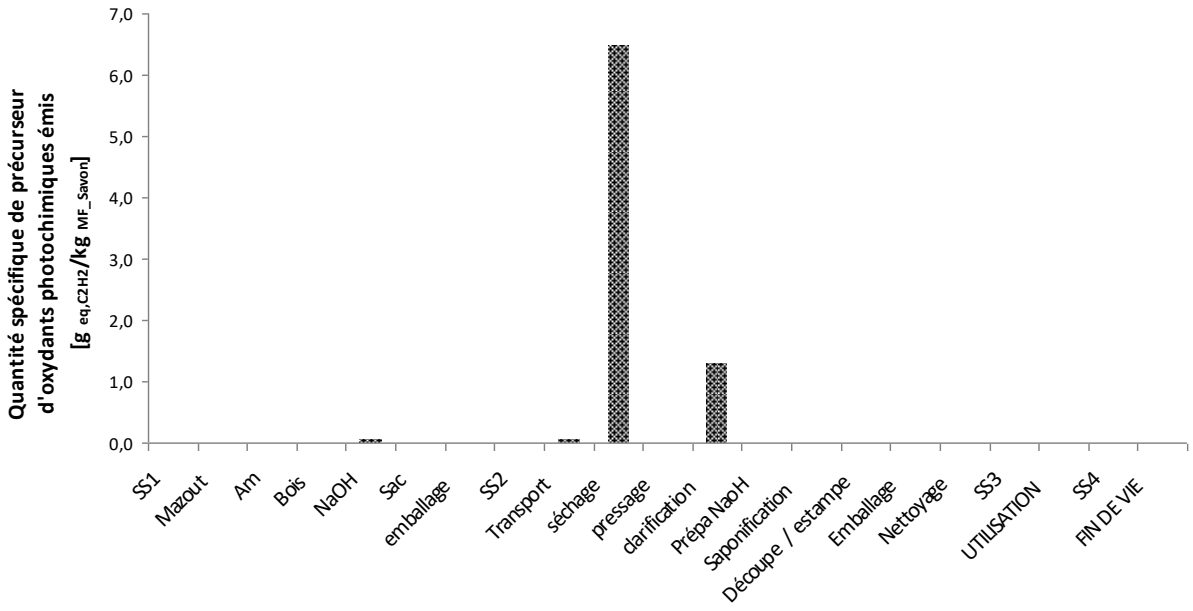


Figure 24 : Production d'oxydants photochimiques par étape du cycle de vie du savon

Deux étapes contribuent majoritairement (98%) à l'émission d'oxydants photochimiques : le séchage (82%) et la clarification (16%).

Les composés organiques volatils non méthane, (COVnM) responsables de la production d'oxydants photochimiques, sont émis dans des conditions de mauvaise combustion (température du foyer pas assez élevée, mauvaise alimentation en oxygène) et dépendent du type de combustible brûlé. La contribution majeure des deux étapes impliquant une combustion de biomasse n'est donc pas surprenante. Il faut en outre se rappeler que nous avons assimilé les étapes de combustion à la combustion dans un poêle, probablement plus efficiente. Il faut donc considérer qu'en pratique, la savonnerie a des émissions d'oxydants photochimiques plus élevées que calculé ici.

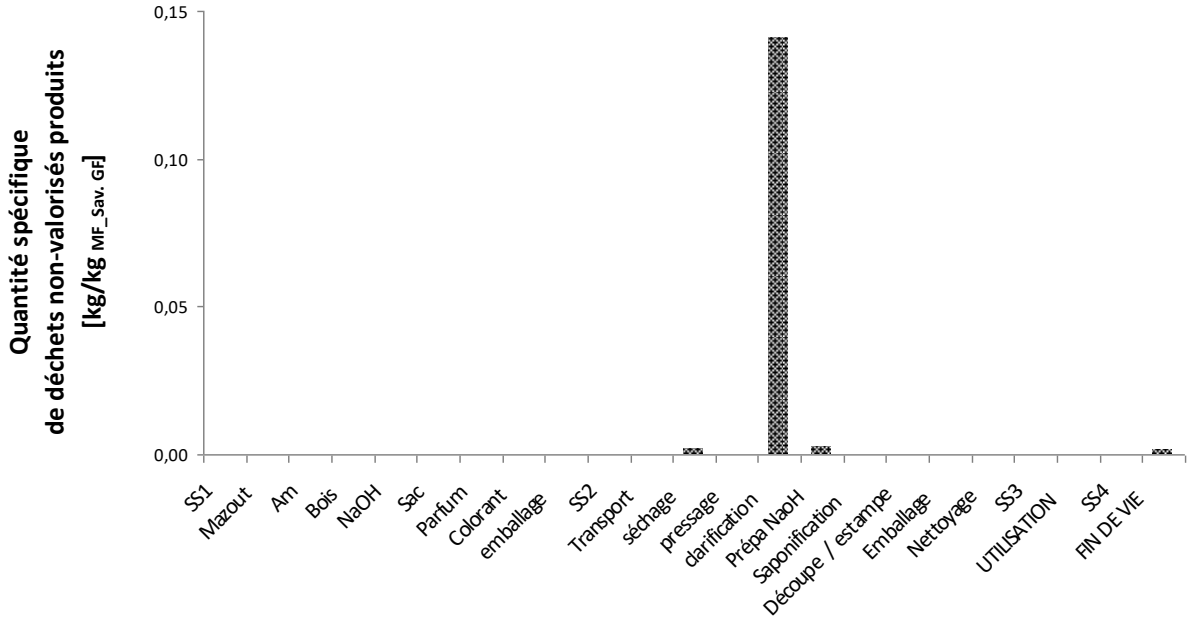


Figure 25: Production de déchets non valorisés par étape du cycle de vie du savon

La majorité (96%) des déchets non valorisés est produite à l'étape de clarification. Il s'agit des boues de clarification.

5.3.2 Contribution relative des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux

La contribution relative des sous systèmes du cycle de vie aux impacts environnementaux classées par catégorie est présentée à la Figure 26.

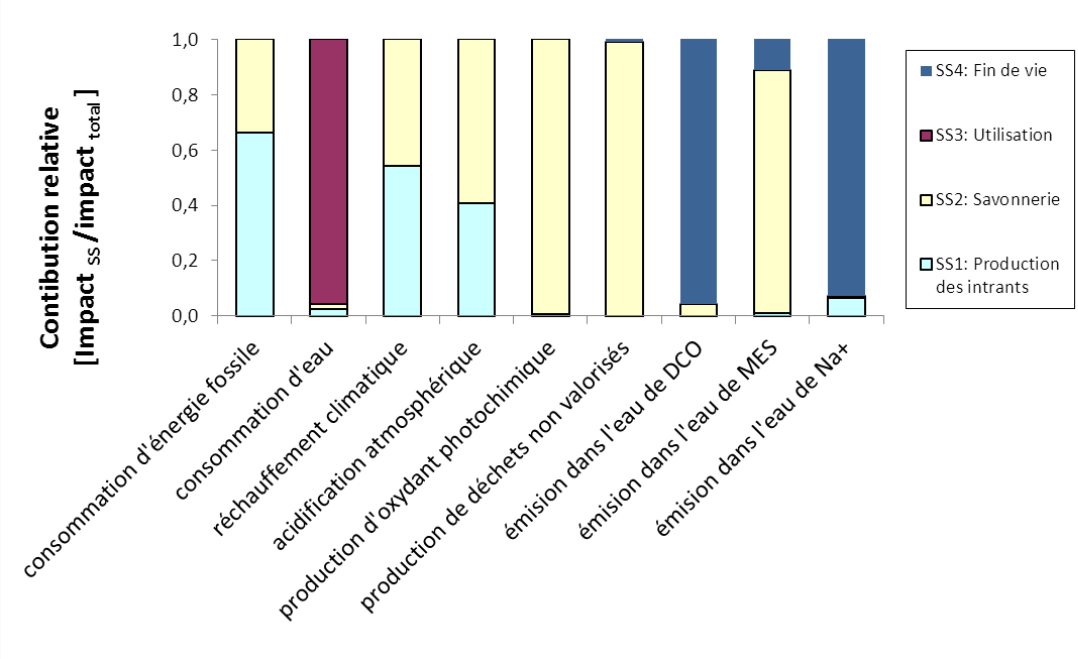


Figure 26: Contribution relative des sous-systèmes du cycle de vie aux impacts environnementaux

La contribution relative des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux classées par catégorie est présentée à la Figure 27.

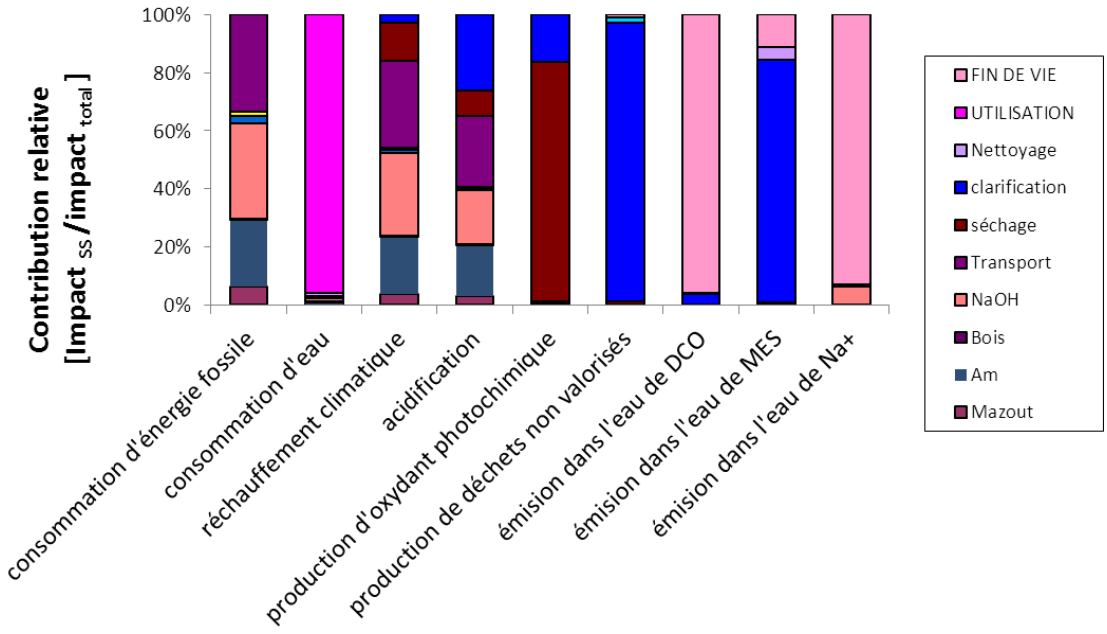


Figure 27: Contribution relative des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux

Le sous-système savonnerie contribue de manière majoritaire aux catégories d'impact de production d'oxydants photochimiques (99%) et de déchets non valorisés (99%), ainsi qu'à l'émission de MES (99%). Il contribue de manière significative aux catégories d'impact d'acidification atmosphérique (59%), de réchauffement climatique (46%) et de consommation de ressources fossiles (34%).

Le sous-système de production des intrants contribue de manière significative aux catégories d'impact de consommation de ressources fossiles (66%), de réchauffement climatique (54%) et d'acidification atmosphérique (41%).

Le sous-système utilisation contribue majoritairement (>99%) à la consommation d'eau.

Le sous-système fin de vie contribue majoritairement à l'écotoxicité par l'émission dans l'eau de DCO (96%) et Na+ (93%).

Le Tableau 59 permet d'établir un classement qualitatif des étapes du cycle de vie contribuant le plus à l'impact environnemental du savon, en fonction du nombre

de catégories d'impact pour lesquelles ces étapes ont une contribution significative.

Tableau 59 : Classement qualitatif des étapes du cycle de vie contribuant le plus à l'impact environnemental du savon. Les étapes sont classées en fonction du nombre de catégories d'impact pour lesquelles ces étapes ont une contribution significative (>5%). Les contributions relatives majoritaires sont en caractère gras.

Etape du cycle de vie	Catégorie d'impact/ aspect environnemental	Contribution relative
Clarification	Production de déchet non valorisé	**96**
	Emission dans l'eau de MES	**94**
	Acidification atmosphérique	26
	Production d'oxydant photochimique	16
Transport	Consommation de ressources fossiles	34
	Réchauffement climatique	30
	Acidification atmosphérique	25
Production de NaOH	Consommation de ressources fossiles	33
	Réchauffement climatique	28
	Acidification atmosphérique	19
Production d'amandes	Consommation de ressources fossiles	23
	Réchauffement climatique	20
	Acidification atmosphérique	17
Séchage	Production d'oxydant photochimique	**82**
	Réchauffement climatique	13
	Acidification atmosphérique	9
Fin de vie	Emission dans l'eau de DCO	**96**
	Emission dans l'eau de Na+	**93**
Utilisation	Consommation d'eau	**96**

Ce classement qualitatif permet de mettre en évidence les étapes de la savonnerie dont la contribution aux impacts environnementaux du cycle de vie est significative : la clarification, le transport et le séchage.

La production de NaOH contribue de manière significative à la consommation de ressources fossiles, au réchauffement climatique et à l'acidification atmosphérique. Nous avons exclus son transport vers le sud-kivu de notre cycle de vie, sa contribution à ces trois catégories d'impact doit donc être revue à la hausse.

5.3.3 Risques et nuisances liés aux conditions de travail

Certains ouvriers ont les jambes et les avant-bras découverts, d'autres sont entièrement protégés par des salopettes. La plupart portent des sandales ouvertes.

Le transport manuel des amandes du camion jusqu'au lieu de stockage peut présenter des risques de blessures musculaires : les charges transportées par sac vont de 50 à 100 kg.

Le séchoir présente des risques d'incendie : la savonnerie en a eu deux en quatre ans. La cause supposée est la suivante : il y aurait eu une fuite dans la conduite métallique à travers laquelle passent les gaz de combustion, située à l'étage inférieur du séchoir. Les gouttelettes d'huile dégagées par les amandes en séchage auraient propagé le feu du foyer jusque dans la conduite, et ensuite vers l'étage supérieur. De plus, le séchage expose les ouvriers à des nuisances respiratoires dues aux fumées produites par la combustion.

La presse présente des risques de blessures par les courroies en mouvement qui ne sont pas protégées lors du pressage. Il y a des nuisances sonores : le bruit de la presse en fonctionnement est tel qu'il faut crier pour se faire comprendre. Il y a aussi des nuisances respiratoires dues à la fumée et à la poussière. Ces nuisances vont de la gêne respiratoire à la quinte de toux.

La clarification présente des risques de brûlures (par renversement du fût) et d'incendie (huile sur le foyer de combustion). Elle expose les ouvriers à des nuisances respiratoires dues aux fumées produites par la combustion.

La préparation de la soude présente des risques de brûlure classique (la dissolution est exothermique, l'eau atteint 100°C) et de brûlure chimique. Les ouvriers sont équipés de gants et parfois de masques, mais n'ont pas de chaussures de sécurité (Figure 28). Il y a des nuisances dues aux vapeurs qui se dégagent lors de la dissolution de la base.



Figure 28 : Ouvrier préparant la solution de soude.

Discussion

Cette description, qualitative, montre que l'équipement et la formation des ouvriers ne sont pas toujours adaptés à la tâche qui leur incombe. Bien que n'ayant pas un impact « environnemental » direct, l'exposition des ouvriers aux risques et aux nuisances peut avoir des impacts sociaux. Ce thème n'a cependant pas été développé de manière plus approfondie dans le cadre du présent mémoire.

6 Propositions d'amélioration du procédé pour en réduire les impacts environnementaux

L'objectif de ce travail est la proposition de solutions qui permettent d'améliorer les performances environnementales de la savonnerie FOMULAC tout en améliorant si possible ses performances techniques.

6.1 Réduction des consommations énergétiques et choix des combustibles

Le bilan énergétique a mis en évidence les étapes contribuant majoritairement à la consommation énergétique de la savonnerie (voir Figure 18) : il s'agit des étapes de séchage (52%), de transport (33%) et de clarification (15%), représentant

presque la totalité des consommations prises en compte. Des problèmes de consommations anormalement élevées ont été mis en évidence à ces étapes (voir Tableau 50). De plus, ces trois étapes contribuent chacune de manière significative dans le cycle de vie aux catégories d'impact liées à l'émission de gaz de combustion (réchauffement climatique, acidification atmosphérique et production d'oxydant photochimiques) (voir Tableau 59). La plupart des solutions proposées ci-dessous pour réduire la consommation énergétique réduisent donc ces impacts par la même occasion.

6.1.1 Séchage

La consommation énergétique du séchage des amandes dépend des facteurs suivants : les taux d'humidité respectifs des amandes fraîches et séchées, le rendement énergétique du séchoir et le type de combustible utilisé. Les pistes de solutions envisagées sont les suivantes :

- Séchage solaire avec ou sans séchoir
- Optimisation du taux d'humidité des amandes séchées
- Retrait des contaminants
- Séchage du combustible bois
- Valorisation des résidus (coques de noix) comme combustible
- Amélioration du séchoir actuel

Séchage solaire avec ou sans séchoir. Cette solution consiste à n'utiliser le séchoir actuel qu'en cas de besoin, et de favoriser le séchage des noix par le soleil. Le séchage pourrait être optimisé par la création d'un séchoir solaire rudimentaire, direct ou indirect, avec convection naturelle ou forcée [Bassey et Schmidt, 1986]. L'application de cette solution aux conditions locales doit encore faire l'objet de recherche : l'humidité de l'air, la vitesse de séchage, le dimensionnement. Cette solution permettrait une diminution de 100% de la consommation actuelle de bois, la suppression des risques d'incendie et une diminution de 100% de tous les impacts environnementaux pour lesquelles le séchage a une contribution significative : production d'oxydants photochimiques (82%), réchauffement climatique (13%) et acidification atmosphérique (9%).

Optimisation du taux d'humidité des amandes séchées. Le taux d'humidité des amandes séchées sortant du séchoir varie entre 3.3 et 6.7 %. Pour un taux d'humidité des amandes fraîches de 9%, la perte en eau au séchage varie entre 2,3 et 5,7 % : du simple au double. Une solution serait de fixer un seuil maximal du

taux d'humidité des amandes séchées. Cette mesure est difficilement applicable en pratique, puisqu' il n'y a pas d'instrument de contrôle, les teneurs en eau des amandes entrantes et sortantes du séchoir étant inconnues. Le séchage est stoppé lorsque la résistance mécanique des amandes est jugée suffisante par les ouvriers, qui testent cette résistance en les croquant sous la dent. Il faudrait évaluer si ce critère du test de résistance est objectif.

Retrait des contaminants. Les amandes ont un taux de contaminants de 13 kg/ 100 kg_{MF_Am}, ce qui représente 16% de l'eau contenue dans les lots d'amandes. Le retrait de ces contaminants permettrait donc une diminution de 16% de la consommation actuelle de bois. Ce retrait peut être effectué par un tamisage, dont le seuil de coupure sera déterminé par le profil de répartition de taille des amandes. Le taux de contaminant dépendant des fournisseurs, il serait possible de sélectionner ces fournisseurs sur base de ce taux. Parmi les lots d'amandes échantillonnés, ceux provenant de Bunia contenaient significativement moins de contaminants.

Séchage du combustible bois. La consommation du séchoir actuel est de 21,1 kg $_{MF_bois(45\%humidité)}$/100 kg $_{MF_Am}$ ce qui représente 2,1 MJ/kg $_{MF_Am}$, Ce bois a un taux d'humidité de 45%, ce qui correspond presque à du bois vert. Cette quantité d'eau a un effet néfaste sur la combustion : elle absorbe la chaleur dégagée par la combustion de la MS du bois, ce qui diminue la température du foyer et le PCI (9,9 MJ/kg $_{MF_bois(45\%humidité)}$, comparé à 19,8 MJ/kg $_{MS_bois}$). Effectuer le séchage du bois avant sa combustion, en rabaissant le taux d'humidité à 20%, permettrait d'augmenter le PCI jusque 15,4 MJ/kg $_{MF_bois(20\%)}$ et d'obtenir une consommation de 13,5 kg $_{MF_bois(20\%)}$/100 kg $_{MF_Am}$, soit une diminution de 35% de la consommation actuelle de MF de bois (7% sur la MS).

Utilisation d'un autre combustible. Les candidats se trouvent parmi les résidus produits par l'huilerie de palme (essentiellement les fibres et les coques). Le PCI des coques (10% d'humidité) est de 17,5 MJ/kg $_{MF_coques}$[Mahlia et al., 2001], ce qui nécessiterait 13 kg_{MF_coques}/100 kg_{MF_Am}. Cette quantité est inférieure à la quantité moyenne de contaminants dans les lots d'amandes, et ces contaminants sont majoritairement constitués de coques : 13 kg_{MF_AmC}/100 kg_{MF_Am} soit 15 kg_{MF_AmC}/100 kg_{MF_Am*} une fois que les contaminants auront été retirés. L'utilisation de ce combustible est donc possible. Cette solution permettrait une

diminution de 100% de la consommation actuelle de bois, mais les gaz issus de la combustion des coques provoqueront un impact environnemental d'acidification atmosphérique plus élevé, étant donné que la teneur en azote des coques est supérieure à celle du bois d'environ un ordre de grandeur [Mahlia et al., 2001 ; Bruneau, 1979]

Amélioration du séchoir actuel. Le séchoir actuel est similaire à un séchoir classique à entraînement d'air, mais son rendement énergétique est catastrophique, puisque sa consommation d'énergie spécifique est 9 à 18 fois supérieure à celle d'un séchoir classique (voir point 4. Bilan énergétique). Une analyse précise des causes de l'inefficacité du séchoir serait nécessaire. Selon notre première approche (non approfondie), des améliorations pourraient probablement être trouvées en suivant les pistes suivantes :

- Améliorer la combustion en remplaçant le foyer actuel par une chambre de combustion optimisée, qui permettrait une combustion plus avancée des gaz émis. Cette solution pourrait s'inspirer du design de poêles à bois pouvant être constitués facilement à partir de récipients métalliques cylindriques [Reed and Larson, 1996] ;
- Améliorer le transfert de chaleur entre la conduite transportant les gaz chauds et l'air asséchant par l'ajout d'ailettes métalliques ;
- Améliorer le transfert d'eau en améliorant la convection naturelle de l'air asséchant, ou en passant à une convection forcée à l'aide d'un ventilateur.

La solution la plus avantageuse est l'utilisation d'un séchoir solaire, que ce soit d'un point de vue économique ou environnemental. Elle semble réaliste et peu coûteuse [Bassey et Schmidt, 1986], mais il est nécessaire de mieux connaître les taux d'humidité et températures de l'air, ainsi que le nombre d'heure d'exposition au soleil. Une solution intermédiaire serait de conserver le séchoir actuel mais de le modifier de manière à le combiner avec le séchage solaire.

L'utilisation des coques comme combustible est plus avantageuse que l'utilisation du bois dans le cas où le séchoir est toujours utilisé**.** D'un côté, la consommation de bois est une perte économique, car la savonnerie achète un combustible noble plutôt que de valoriser un résidu de l'huilerie de palme, qui se retrouve sous forme de contaminants dans les amandes. De plus, le bois peut être beaucoup mieux

valorisé comme combustible pouvant apporter des températures élevées (ce que ne nécessite pas le séchage). D'un point de vue environnemental, les gaz issus de la combustion des coques provoqueront un impact environnemental d'acidification atmosphérique plus élevé, mais cet impact environnemental nous semble moins significatif que le gain économique issu de la valorisation des coques.

6.1.2 Transport

La consommation énergétique de l'étape transport correspond à 33% de la consommation totale d'énergie à la savonnerie. De plus, elle contribue de manière significative dans le cycle de vie à la consommation de ressources fossiles (34%). Cette consommation dépend notamment des facteurs suivants : le type de moteur, l'état de la route, le comportement des chauffeurs, la masse des matières transportées. Les trois premiers facteurs sont difficilement maîtrisables. Par contre, trois matières contribuent à la majorité (94%) de la masse totale des matières transportées : les amandes (55%), le savon (28%) et le bois (12%).

Les amandes ont un taux de contaminants de 13 % et un taux d'humidité de 9 %. Ce surplus de masse n'est pas négligeable : la suppression des contaminants permettrait une diminution de 7 % de la masse totale de matières transportées (amandes + bois?) et effectuer l'étape de séchage avant le transport permettrait une diminution de 2%. Le triage des contaminants avant transport n'a pas de sens si ces contaminants sont utilisés comme combustible à la savonnerie.

Le savon a un taux d'humidité de 15%, mais celui-ci ne peut pas être réduit davantage, sous peine de dégrader ses propriétés.

Le bois n'est plus nécessaire dans le cas de certaines solutions proposées pour le séchage. Cela permettrait une diminution de 12% de la masse totale transportée. En continuant à utiliser le bois comme combustible, son séchage jusqu'à 20% d'humidité avant transport permettrait de réduire la masse totale transportée de 4%.

6.1.3 Clarification

La consommation énergétique de l'étape de clarification correspond à 15% de la consommation totale d'énergie à la savonnerie. Le mélange eau/huile brute est porté jusqu'à ébullition, puis la combustion est stoppée et la sédimentation

démarre. Nous supposons que l'augmentation de température permet 3 processus :

(1) Conserver l'huile sous forme liquide (T_{fus} =27°C [Young, 1983]) ;

(2) Assurer un mélange eau-huile par convection pour permettre un transfert de masse des impuretés hydrophiles de l'huile vers l'eau ;

(3) Accélérer la vitesse de chute des particules en diminuant la viscosité de l'huile.

Les processus (1) et (3) pourraient se contenter d'une température un peu plus élevée que la température de fusion totale. Le processus (2) peut être assuré par d'autres moyens. Le processus (3) -la sédimentation- n'est pas le seul procédé qui permette une séparation physique des particules, et il y a d'autres facteurs que la température sur lesquels l'opérateur peut jouer : la surface du décanteur, la force de gravitation et le diamètre des particules. Les pistes de solutions envisagées sont les suivantes :

- **Utilisation d'un autre procédé de séparation physique**. Dans les huileries palmistes indonésiennes, la clarification est effectuée en deux étapes : la première consiste en un décanteur ou un filtre, la seconde un pressage par filtre presse [Teoh and Tang, 1985]. Il n'y a pas d'eau mise en œuvre.
- **Optimisation de la sédimentation par d'autres paramètres** : augmenter la force de gravitation par centrifugation, augmenter le diamètre des particules par floculation ou augmenter la surface du décanteur (en utilisant des demi-fûts coupé longitudinalement).
- **Diminution de consommation énergétique actuelle**
    - **Abaissement de la température** : La température à laquelle est porté le mélange est d'environ 100°C. Il n'est sans doute pas nécessaire d'atteindre une température si élevée. La solution serait de diminuer la température jusqu'à une température optimale à déterminer. Avec une température de 37°C (10°C au dessus du point de fusion), la consommation théorique serait réduite de 78%.
    - **Amélioration de l'efficacité du foyer de clarification**. L'efficacité du processus est faible, puisque sa consommation énergétique

spécifique est 7 fois supérieure à la consommation théorique. Une analyse précise des causes de cette inefficacité serait nécessaire pour voir quel paramètre améliorer (transfert de chaleur ou efficacité de combustion). La combustion pourrait être améliorée en changeant la configuration du foyer actuel (situé entre les parpaings sous le fût) en utilisant un poêle à bois de plus petite dimension, similaire à celui déjà proposé pour le séchoir [Reed and Larson, 1996].

- **Utilisation d'une quantité calculée de combustible.** Actuellement, les quantités de combustible ajoutées ne sont pas calculées. Le combustible est ajouté au fur et à mesure de la combustion, et en trop grande quantité : le foyer est éteint avec de l'eau pour stopper la combustion.
- Utilisation des coques comme combustible. Actuellement, les tourteaux huileux sont utilisés à raison de 2,4 kg MF_TPH/100 kgMF_Am, ce qui représente 0,6 MJ/kg_{MF_Am}. Le remplacement par les coques nécessiterait 3,7 kg_{MF_coques}/100 kg_{MF_Am}. De plus, les gaz issus de la combustion des coques provoqueront un impact environnemental d'acidification atmosphérique moins élevé, étant donné que la teneur en azote des coques est 5 fois moindre que celle des tourteaux huileux [Mahlia et al., 2001 ; Bruneau, 1979].

Le choix entre ces différentes solutions se base essentiellement sur un critère de faisabilité : l'achat d'un filtre-presse, d'une centrifugeuse ou de floculant apparaît comme un investissement non réaliste dans le contexte de la savonnerie.

Dans le cas où le procédé de sédimentation est toujours utilisé, effectuer la sédimentation dans des demi-fûts coupés longitudinalement permettrait d'effectuer la sédimentation plus rapidement. L'abaissement de la température de fonctionnement est la solution la plus facile à mettre en œuvre, et permettrait théoriquement de réduire la consommation énergétique de 78%. Mais il faudra tenir compte que la viscosité sera plus élevée, ce qui augmentera le temps de sédimentation, et donc les pertes thermiques.

6.2 Valorisation des déchets

Les boues de clarification et les cendres sont les deux déchets non valorisés majoritaires. Les boues de clarification rejetées dans la rigole correspondent à 96% du total des déchets non valorisés. De plus, elles contribuent majoritairement à l'émission de MES dans l'eau (voir Tableau 59). Deux solutions peuvent être envisagées :

- **Utilisation des boues comme aliment**. Si l'on excepte la teneur en huile élevée des boues (37 g/100 g_{MS_boue} > 8,5 g/100 g_{MS_TPS}), la composition de leur MS non huileuse est similaire à celles des tourteaux secs. Les tourteaux secs peuvent être utilisés pour l'alimentation des porcs, avec des proportions maximales de 20 g/100g de leur alimentation classique durant la phase de croissance, et 30g/100g ensuite [Rhule, 1996]. Ces tourteaux ne peuvent pas servir comme seule source d'aliment, car ils ne correspondent pas à l'aliment idéal pour les porcs. Ils présentent un grand taux de fibres, une faible disponibilité des acides aminés (74.4%), une déficience en lysine et en méthionine et une faible disponibilité en énergie [Rhule, 1996]. Des recherches sont nécessaires pour estimer l'impact de la teneur en huile élevée des boues, pour définir en quelle proportion elles peuvent être utilisées et chez quelles espèces animales elle est tolérée.
- **Utilisation des cendres comme fertilisant**. Les cendres sont actuellement non utilisées. Elles constituent cependant une source de minéraux pouvant servir de nutriment aux plantes. Les cendres de bois contiennent en moyenne 30 $g_K/kg_{cendres}$ et 3 $g_P/kg_{cendres}$ [Augusto et al., 2008] et les cendres des coques 12 $g_K/kg_{cendres}$ et 6 $g_P/kg_{cendres}$ [Schuchardt et al., 2007]. Ces deux types de cendres ont déjà été utilisés comme fertilisant, mais des recommandations pour les conditions d'application au contexte local dépendent du type de sol et du type de culture utilisée.

6.3 Amélioration de la sécurité et réduction des nuisances pour les travailleurs.

L'exposition des ouvriers et employés aux risques et aux nuisances se fait tout le long du procédé. L'estimation de cette exposition est restée qualitative, mais elle a permis de mettre en évidence que cette exposition dépend en partie de

l'équipement et de la formation des ouvriers. Nous soulignons le fait que les aspects suivants devraient faire l'objet d'une attention particulière :

- Les nuisances respiratoires;
- Les risques de brûlures et de blessures;
- Les risques de blessure par portage.

6.4 Traitement des eaux usées

La production d'eau usée ne contribue pas de manière significative aux impacts environnementaux globaux. Cependant, les impacts locaux n'ont pas été évalués quantitativement, et l'émission de la charge polluante est maîtrisable ; nous avons remarqué que la majorité de cette charge polluante (MES, DCO) est produite lors de l'étape de nettoyage. Les solutions suivantes sont proposées :

- Limiter au maximum l'utilisation d'eau pour nettoyer les surfaces et les récipients lorsque cela est possible.
- L'installation d'un décanteur-déshuileur rudimentaire permettrait de réduire la charge polluante ; la MES constitue 24% des ST, et est constituée à 85% de matière organique.

6.5 Réduction des impacts environnementaux des étapes externes à la savonnerie

D'autres étapes du cycle de vie contribuent de manière significative aux impacts environnementaux.

- La production de la soude contribue de manière significative à trois catégories d'impacts : la consommation d'énergie fossile (33%), le réchauffement climatique (28%) et l'acidification atmosphérique (19%). La contribution du transport vers le Kivu n'a pas été évaluée, mais cette contribution pourrait être réduite par le choix d'un fabricant plus local.
- Les étapes du cycle de vie comprenant la production des amandes, l'utilisation et la fin de vie du savon semblent difficilement maîtrisables.

Chapitre V : Conclusion

Un premier objectif de ce travail était d'évaluer les impacts environnementaux de la savonnerie FOMULAC. Un second objectif était de proposer des solutions permettant d'améliorer les performances environnementales de la savonnerie.

Nous avons tout d'abord établi un flow-sheet complet et détaillé du procédé utilisé par la savonnerie. Grâce à une campagne de mesure sur le terrain, nous avons pu caractériser les différents flux de matière et établir un bilan massique cohérent, les "pertes" de matière (2%) étant inférieures à l'incertitude qui pèse sur nos mesures et estimations.

Le flow-sheet et les bilans de matières nous ont servi de base pour aborder une analyse simplifiée du cycle de vie (LCA) du savon FOMULAC. Cette analyse a mis en évidence cinq étapes contribuant de façon significative à au moins trois catégories d'impacts environnementaux. Ces cinq étapes sont : la clarification, le transport, le production de NaOH, la production d'amandes et le séchage. Les résultats issus de ce LCA simplifié doivent être nuancés, car les catégories d'impacts choisies en fonction des données disponibles ne permettent pas d'estimer les impacts locaux.

Le bilan énergétique montre des problèmes de consommation de combustible anormalement élevées pour les étapes de séchage des amandes et de clarification de l'huile, contribuant respectivement à 52 et 15% de la consommation énergétique totale de la savonnerie. La solution la plus avantageuse pour le séchage serait l'utilisation d'un séchoir solaire, que ce soit d'un point de vue économique ou environnemental. Cette solution permettrait une diminution de 100% de la consommation actuelle de bois, la suppression des risques d'incendie et une diminution de 100% de tous les impacts environnementaux pour lesquels le séchage a une contribution significative dans le cycle de vie : production d'oxydants photochimiques (82%), réchauffement climatique (13%) et acidification (9%). Une solution envisagée pour réduire ces impacts est l'abaissement de la température de la clarification. Elle permettrait théoriquement de réduire la consommation énergétique de 78%. Le transport contribue quant à lui à 33% de la consommation énergétique totale de la savonnerie. La suppression

du bois de chauffe permettrait une réduction de 20% de la masse totale transportée, et le retrait des contaminants des lots d'amandes avant transport une réduction de 7%.

Le bilan massique a permis d'identifier les déchets produits par le procédé et non valorisés. Il s'agit majoritairement des boues de clarification (96%), riches en lipides, glucides et protéines. L'utilisation de ces boues pour l'alimentation des porcs, en les mélangeant aux tourteaux secs, permettrait de réduire de 83% l'émission de MES dans les eaux de surface, améliorant ainsi plusieurs aspects du bilan environnemental de la savonnerie (production d'un aliment, réduction de la pollution).

L'observation des conditions de travail a mis en évidence qualitativement des problèmes de sécurité et des nuisances pour les travailleurs. Certains aspects pourraient faire l'objet d'une amélioration : les nuisances respiratoires, les risques de brûlures et de blessure.

La production d'eaux usées ne contribue pas de manière significative aux impacts environnementaux globaux. Cependant, les impacts locaux n'ont pas été évalués quantitativement, et cette étape est maîtrisable : la majorité de la charge polluante (MES, DCO) est produite lors de l'étape de nettoyage et l'installation d'un décanteur-déshuileur rudimentaire permettrait de réduire la charge polluante ; la MES constitue 24% des ST, et est constituée à 85% de matière organique.

Références bibliographiques

Alamu O.J., Waheed M.A., Jekayinfa S.O. (2008). Effect of ethanol–palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield. Fuel 87, 1529–1533.

Al-Ghouti M., Al-Degs Y., Mustafa F. (2010). Determination of hydrogen content, gross heat of combustion, and net heat of combustion of diesel fuel using FTIR spectroscopy and multivariate calibration. Fuel 89, 193–201.

André P., Delisle C. E. et Revéret J-P. (2003). L'évaluation des impacts sur l'environnement : Processus, acteur et pratiques pour un développement durable. Presses internationales polytechniques, pp 507.

Arrieta F.R.P., Teixeira F.N., Yanez E., Lora E. and Castillo E. (2007). Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. Biomass and Bioenergy 31, 503-511.

Augusto L., Bakker M. R. & Meredieu C. (2008). Wood ash applications to temperate forest ecosystems—potential benefits and drawbacks. Plant Soil 306,181–198.

Bartz R., Heink U. and Kowarik I. (2009). Proposed Definition of Environmental Damage Illustrated by the Cases of Genetically Modified Crops and Invasive Species. Conservation Biology 24 (3), 675–681.

Bassey M. W. et Schmidt O.G. (1986). Le séchage solaire en Afrique. Compte rendu du colloque tenu à Dakar, Sénégal.

Bernard C., Rabot-Querci M.L., Rogaume Y., Rogaume C. et Zoulalian A. (2006). Optimiser la combustion pour un développement durable du bois-énergie. Oil & Gas Science and Technology 61 (2), 203-211.

Bruneau Y. (1979). La combustion efficace du bois. Compte rendu du 7ème colloque de génie rural. Université Laval, 2 février 1979.

de Souza S. P., Pacca S., de Ávila M. T. and Borges J. L. B. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. Renewable Energy 35, 2552-2561.

Dewitte J-F. (1999). Fomulac-katana, membre fondateur de Louvain developpement, Louvain développement 3, 3.

Dewitte J-F. (2006). Des premiers résultats concrets, Louvain développement 26, 6.

Dronne Y. (2005). L'huile de palme dans le marché mondial : productions et échanges. OCL 12, 96-106

Ecobilan PricewaterhouseCoopers. (2004). Evaluation des impacts environnementaux des sacs de caisse carrefour, rapport final.

EPLCA project team. (1996). Sodium hydroxide; production mix for PVC production, at plant; 100% NaOH - 1 kg (Mass). Disponible sur : http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/f7ba74a4-e81c-4084-97c9-b9dd5456446c_02.01.000.html (Dernière consultation le 26/11/2010).

EPLCA project team. (2003). Diesel; from crude oil; consumption mix, at refinery; 200 ppm sulphur. Disponible sur : http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/elcd/processes/244524ed-7b85-4548-b345-f58dc5cf9dac_02.01.000.xml (Dernière consultation le 26/11/2010).

EPLCA project team. (2005). Spruce log with bark; refostered managed forest; production mix entry to saw mill, at plant; 44% water content. Disponible sur http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/elcd/processes/c3d872b0-c18d-46a5-ac37-d1573246bfce_02.01.000.xml (Dernière consultation le 26/11/2010).

EPLCA project team. (2007). Small lorry transport; Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix ; 7,5 t total weight, 3,3 t max payload. Disponible sur : http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/b444f4d4-3393-11dd-bd11-0800200c9a66_02.01.000.html (Dernière consultation le 02/12/2010)

Eriksson E., Auffarth K., Henze M. and Ledin A. (2002). Characteristics of grey wastewater. Urban Water 4, 85–104.

Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., Guine J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D. and Suh S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management 91, 1-21.

Gawad S. and Shafy M. (2002). Pollution control of industrial wastewater from soap and oil industries: a case study. Water Science and Technology 46 (4–5), 77–82.

Gonzalez-Garcia S., Moreira M. T., Artal G., Maldonado L. and Feijoo G. (2010). Environmental impact assessment of non-wood based pulp production by soda-anthraquinone pulping process. Journal of Cleaner Production 18, 137–145.

Heijungs R, Guinee J, Huppes G, Lankreijer RM, Udo de Haes HA, Wegener Sleeswijk A, et al. (1992). Environmental life cycle assessment of products. Guide and background. Leiden, Netherlands: Centre of Environmental Science Leiden University.

IBP (International Biological Programme). (1969). Methods for chemical analysis of fresh water. IBP handbook n° 8. Blackwell scientific publication.

IPCC (International Pannel on Climate Change). (2000). Special Report on Emissions Scenarios. Disponible sur : http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/

IPCC (International Pannel on Climate Change). (2001). Climate change 2001 IPCC third assessment report. Disponible sur: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/

Jayed M.H., Masjuki H.H., Saidur R., Kalam M.A., Jahirul M.I. (2009). Environmental aspects and challenges of oilseed produced biodiesel in Southeast Asia. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2452–2462.

Jitputti J., Kitiyanan B., Bunyakiat K., Rangsunvigit P., Jenvanitpanjakul P. (2004). Transesterification of Palm Kernel Oil and Coconut Oil by Difference Solid Catalysts. The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE) Hua Hin, Thailand. 267-271.

Johansson L. S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. Atmospheric Environment 38, 4183–4195.

Kasongo L. Z. (2004). Les déchets des emballages en plastique sur les rues de Bukavu ; essai d'une explication " économico-écologique ". Document non publié.

Kienzle E., Schrag I., Butterwick R., Opitz B. (2001). Calculation of gross energy in pet foods: new data on heat combustion and fibre analysis in a selection of foods for dogs and cats. Journal of animal physiology and animal nutrition 5-6,148-57.

Kim Y.-C., Sasaki S., Yano K., Ikebukuro K., Hashimoto K. and Karube I. (2000). Relationship between theoretical oxygen demand and photocatalytic chemical oxygen demand for specific classes of organic chemicals. Analyst 115 (11), 1915-1918.

Lakshminarayana P., Subbarao R., Sita Rama Sastry Y., Chandrasekhara Rao T., Kale V. and Vijayalakshmi P. (1982). Composition of fatty acids obtained by decomposition of castor oil fatty acid estolides. Journal of the American Oil Chemists' Society 59 (5), 238-240.

Lin B-F., Huang J-H and Huang D-Y. (2008). Effects of Biodiesel from Palm Kernel Oil on the Engine Performance, Exhaust Emissions, and Combustion Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine. Energy & Fuels 22, 4229–4234.

Louvain Développement (Louvain coopération au Développement). (2008). Rapport semestriel n°1 : l'Economie au service de la santé : Renforcement de l'impact social et de la responsabilité environnementale d'une savonnerie à finalité sociale au Sud-Kivu (R.D. Congo).

Mahlia T.M.I., Abdulmuin M.Z., Alamsyah T.M.I and Mukhlishien D. (2001). An alternative energy source form palm waste industry for Malaysia and Indonesia. Energy conversion and manadgment 42, 2109-2118.

Manuilova A., Suebsiri J. and Wilsona M. (2009). Should Life Cycle Assessment be part of the Environmental Impact Assessment? Case study: EIA of CO2 capture and storage in Canada. Energy Procedia 1, 4511-4518.

Mercangöz M., Küsefo S. L., Akman U. and Hortaçsu Ö. (2004). Polymerization of soybean oil via permanganate oxidation with sub/supercritical CO2. Chemical Engineering and Processing 43(8), 1015-1027.

Meurens M. (2009). Cours de génie des procédés: Opération unitaire. Document non publié. Université catholique de Louvain.

Onyeike E. and Acheru G. (2001). Chemical composition of selected Nigerian oil seeds and physicochemical properties of the oil extracts. Food Chemistry 77, 431–437.

Pennington D.W., Potting J., Finnveden G., Lindeijer E., Jolliet O., Rydberg T. and G. Rebitzer. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. Environment International 30, 721– 739.

Praserstan S. and Prasertsan P. (1996). Biomass residues from palm oil mills in thailand : an overview on quantity and potential usage. Biomass and Bioenergy 11 (5), 387-395.

Ramachandran S., Singh S. K., Larroche C., Soccol C. R. and Pandey A. (2007). Oil cakes and their biotechnological applications – A review. Bioresource Technology 98, 2000–2009.

Razuan R., Chen Q., Zhang X., Sharifi V., Swithenbank J. (2010). Pyrolysis and combustion of oil palm stone and palm kernel cake in fixed-bed reactors. Bioresource Technology 101, 4622–4629.

Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.-P., Suh S., Weidema B.P. and Pennington D.W. (2004). Life cycle assessment ; Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. Environment International 30, 701– 720.

Reed T. B. and Larson R. (1996). A wood-gas stove for developing countries. Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Conference, Banff, Canada, 20-24 May 1996.

Rhule S.W.A. (1996). Growth rate and carcass characteristics of pigs fed on diets containing palm kernel cake. Animal Feed Science Technology 6 (1), 167- I72.

Schuchardt F., Wulfert K. and Herawan T. (2007). Protect the environmenst and make profit from the waste in palm oil industry. Document non publié, Disponible sur : www.utec-bremen.com/ (Dernière consultation en décembre 2010).

Solli C., Reenaas M., Strømman A. H., Hertwich E. G. (2009). Life cycle assessment of wood-based heating in Norway. The International Journal of Life Cycle Assessment 14, 517–528.

Sprugel D. G. (1991). Disturbance, equilibrium, and environmental variability: What is 'Natural' vegetation in a changing environment? Biological conservation 58 (1), 1-18.

Teoh P. K. and Tang T. S. (1985). Palm Kernel Oil Extraction - The Malaysian Experience. Journal of the American Oil Chemists' Society 62 (2), 254 - 258.

Tshonda, (2010). Situation de la République démocratique du Congo en 2010. Encyclopédie de l'état du monde. Disponible sur http://www.etatdumonde.com/ (Dernière consultation en mai 2010).

Tukker A. (2000). Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review 20, 435-456.

UNDP (United Nations Development Programme). (2004). The impact of corruption on the human rights based approach to development.

Vaillancourt J-G. et Gendron C. (2007). Environnement et sciences sociales : les défis de l'interdisciplinarité. Les Presses de l'Université de Laval, pp 429.

van de Plassche EJ, de Bruijn JHM, Stephenson RR, Marshall SJ, Feijtel TCJ and Belanger SE . (1999). Predicted no-effect concentrations and risk characterization of four surfactants: Linear alkyl benzene sulfonate, alcohol ethoxylates, alcohol ethoxylated sulfates, and soap. Environmental toxicology and chemistry 18 (11), 2653-2663.

Weast R. C., Astle M. J. (1981). CRC handbooks of chemistry and physics. 61th edition, CRC press, Florida .

Wicke B., Dornburg V., Faaij A., Junginger M. (2007). A Greenhouse Gas Balance of Electricity Production from Co-firing Palm Oil Products from Malaysia, Final report. NWS-E-2007-33. Department of Science, Technology and Society, Utrecht Universiteit.

Willame J-C. (2008), Situation de la République démocratique du Congo en 2008. Encyclopédie de l'état du monde. Disponible sur http://www.etatdumonde.com/ (Dernière consultation le 20/05/2010).

Yi H.-S. and Bakshi B. R. (2007). Rectification of Multiscale Data with Application to Life Cycle Inventories. American Institute of Chemical Engineers 53 (4), 876-890.

Young F.V.K. (1983). Palm Kernel and Coconut Oils : Analytical Characteristics, Process, Technology and Uses. Journal of the American Oil Chemists' Society 60 (2), 374-379.

Yusoff S. and Hansen S. B. (2007). Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia. The International Journal of Life Cycle Assessment 12 (1), 50- 58.

Sites internet

http://www.etatdumonde.com/ (Dernière consultation en mai 2010)

http://www.rfi.fr/sciencefr/images/092/carte_rdc_provinces2006_432.jpg (Dernière consultation en mai 2010)

http://www.congonline.com/geo/climat.htm (Dernière consultation en mai 2010)

http://www.tlfq.ulaval.ca/axl/afrique/czaire.htm (Dernière consultation en mai 2010)

http://www.ecoinvent.org/home/ (Dernière consultation le 28/12/2010)

http://www.ath.be/default.asp?V_DOC_ID=3200 (Dernière consultation en mai 2010)

Textes de loi

Législation congolaise sur la gestion des eaux usées. Article 29, Section 1, Chapitre 2: De la protection de la qualité des eaux.

Règlement (CE) N°1221/2009 du parlement européen et du conseil du 25 novembre 2009