

Analyse de cycle de vie du toit vert : cas d'Antananarivo

Nantenaina Rabarison, Dominique Morau, Hery Tiana Rakotondramiarana

► **To cite this version:**

Nantenaina Rabarison, Dominique Morau, Hery Tiana Rakotondramiarana. Analyse de cycle de vie du toit vert : cas d'Antananarivo. 3ème Congrès International Plasma Energie, CIPE2016, Dec 2016, Antsiranana, Madagascar. 2016. <hal-01611872>

HAL Id: hal-01611872

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01611872>

Submitted on 6 Oct 2017

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

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

Analyse de cycle de vie du toit vert : cas d'Antananarivo

Nantenaina Tsiorimalala Rabarison¹, Dominique Morau², Hery Tiana Rakotondramiarana^{1*}

¹ Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), BP 566, Campus universitaire d'Ambohitsaina, Antananarivo (101), Madagascar

² Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, 117 Rue du Général Ailleret 97430, Le Tampon Réunion, France

* auteur correspondant : rktmiarana@yahoo.fr

RESUME

De nos jours, la protection de l'environnement est un défi international. Le toit vert est l'un des concepts innovants pour faire face à cette bataille. On observe une augmentation de son utilisation dans les zones urbaines à travers le monde. Mais une question se pose : quelles sont les conséquences sur l'environnement du cycle de vie du toit vert ? Dans cet article, les performances environnementales de deux systèmes complets de toits verts léger et lourd implantés à Antananarivo-Madagascar sont analysées et comparées dans le but de déterminer les impacts potentiels des deux systèmes de toit vert. Des solutions sont avancées pour diminuer les charges environnementales des toits verts. L'approche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été utilisée pour réaliser l'étude. Les différentes phases de l'approche : 1-définition des objectifs, 2-inventaire de cycle de vie, 3-caractérisation des impacts, 4-interprétation des résultats, ont été déroulées sur le système du toit vert. Les calculs ACV ont été effectués avec le logiciel OpenLCA. Les résultats de l'étude montrent que, les matériaux vierges et/ou importés sont les plus impactant : 1- L'utilisation du ciment, gravillon, matière plastique vierge, terre est à éviter; 2- Diminuer au maximum l'importation des matériaux surtout s'il s'agit d'un transport aérien ; 3- Choisir des engrais naturels et de l'eau de puits pour l'arrosage au cours de l'utilisation du toit vert.

Mots clés : openLCA, toit vert, impact, couche, ACV.

1. INTRODUCTION

Le toit vert est un toit avec des cultures de plante au-dessus. C'est une solution écologique dans les zones urbaines, (Catalano *et al.* 2016). Existant depuis des siècles avant Jésus Christ, ce concept est utilisé dans de nombreux pays (Canada, Chine, État unis d'Amérique et quelques pays de l'Europe). Il n'a cessé d'évoluer et apporte beaucoup d'intérêts : économie d'énergie du bâtiment pour le chauffage en hiver et diminution de la température intérieure en été (Gao *et al.* 2015); (Coma *et al.* 2016). Protection et prolongation de la durée de la membrane du toit des températures extrêmes et de leurs fluctuations (Morau *et al.* 2015). Son utilisation permet aussi d'améliorer l'isolation acoustique (Young et Ernest 2009). Une couche de canopée d'épaisseur de 12cm réduit de 40 à 50dB les nuisances sonores. Le toit vert atténue aussi l'effet îlot thermique urbain. L'étude de (Mostafa Razzaghmanesh *et al.* 2016) montre une atténuation d'îlot thermique urbain, par les toits vert face aux toits métallique, asphalte et brique. L'utilisation du toit vert contribue significativement à la rétention et la purification des eaux pluviales (Zhang *et al.* 2015); (Sajedah Sadat Ghazizadeh Hashemi *et al.* 2015). Elle permet aussi un captage de CO₂ et une amélioration de la qualité de l'air. On peut bien voir le fort accroissement de l'activité de l'homme sur l'exploitation des ressources naturelles, fabrication de matériaux, transport et construction urbaine. La quantité de ressources nouvellement découvertes ne cesse de diminuer du fait de leur caractère limité et non renouvelable (Bentley 2002). Les constructions urbaines ne cessent d'augmenter et créent des effets néfastes sur l'environnement (Yang et Li 2015). Le toit vert peut être adopté pour remédier à ces problèmes. Madagascar est dans une situation critique sur le point environnemental. Les avantages du toit vert cités précédemment peuvent contribuer à la réduction des problèmes de pollution des zones urbaines de Madagascar. Mais il est indispensable de connaître les conséquences de son mise en œuvre et de son utilisation?

Ce présent ouvrage présente l'analyse de cycle de vie des toits verts pour des cas d'étude à « Antananarivo Madagascar ». Dans l'objectif d'apporter des solutions potentielles pour améliorer les aspects environnementaux de la mise en œuvre du toit vert, de la production des matériaux utilisés dans les couches qui le compose et de choisir parmi les scénarios de mise en œuvre possibles. Il existe deux types de toit vert : extensif ou toit vert léger et intensif une version plus lourde. Ils sont constitués du bas vers le haut de couche de : structure (béton, bois ou acier) pour supporter toutes les différentes couches du toit vert, d'une membrane imperméable (caoutchouc synthétique), d'une protection anti racine (polyéthylène), d'une couche de drainage et de filtration (polyéthylène), d'un substrat de croissance (terre, engrais) et de la végétation (gazon, sédum, arbuste). Le cycle de vie de ces produits seront analysés.

2. MATERIELS ET METHODES

L'analyse de cycle de vie est une approche environnementale systémique multicritère. Il traite uniquement les impacts environnementaux d'un produit, ignorant ainsi les aspect financier, politique ou autre (RAHELIARILALAO 2009) . Elle est constituée des étapes suivantes : 1-définition de l'objectif et du champs de l'étude,2-inventaire de cycle de vie,3-caractérisation des impacts,4-interprétation des résultats(ISO 14040 2006). Elle est basée sur l'inventaire des entrées (par exemple des matières premières, le transport, le processus de production et d'énergie pour la production) et des sorties (par exemple émissions des substances dans le sol, l'eau et l'air).

Nous avons utilisé cette approche pour évaluer et comparer les impacts potentiels des différentes couches, constituant de deux complexes de toit vert un système de toit vert extensif et intensif.

2.1 Définition de l'objectif et champ de l'étude :

L'étude est réalisée dans le but d'identifier les effets néfastes pour l'environnement ,la santé humaine et l'utilisation des ressources des couches constituantes de 1m2 de toit vert implanté à Antananarivo Madagascar. Surtout d'apporter des solutions et idées pour Réduire les impacts néfastes sur ces différents aspects.

L'unité fonctionnelle utilisée ici est :«la production, le transport et L'utilisation de 1m2 du toit vert durant une période de un an, cinq ans et dix ans ». Sur les scenarios à étudier nous avons comparé deux types de toit ayant des produits constitutifs différents. A priori nous avons deux types de toit vert avec des propriétés ayant une large différence sur la quantité de produit utilisée, L'étude des deux cas permet un comparatif et nous aide à apporter une amélioration ou d'avoir des informations pour choisir l'un d'entre eux.

Concernant la frontière du système, nous avons exclus les phases de construction et fin de vie du toit vert. Les phases suivantes sont incluses dans l'étude : la production, le transport des différentes couches et l'utilisation des toits verts .En arrière-plan nous avons : l'extraction des matières premières, de l'énergie, et la production des déchets lors de la fabrication des couches du toit vert. Ces données sont déjà intégrées dans notre base de données. La figure suivante représente le processus de cycle de vie des éléments des toits verts et limite du système.

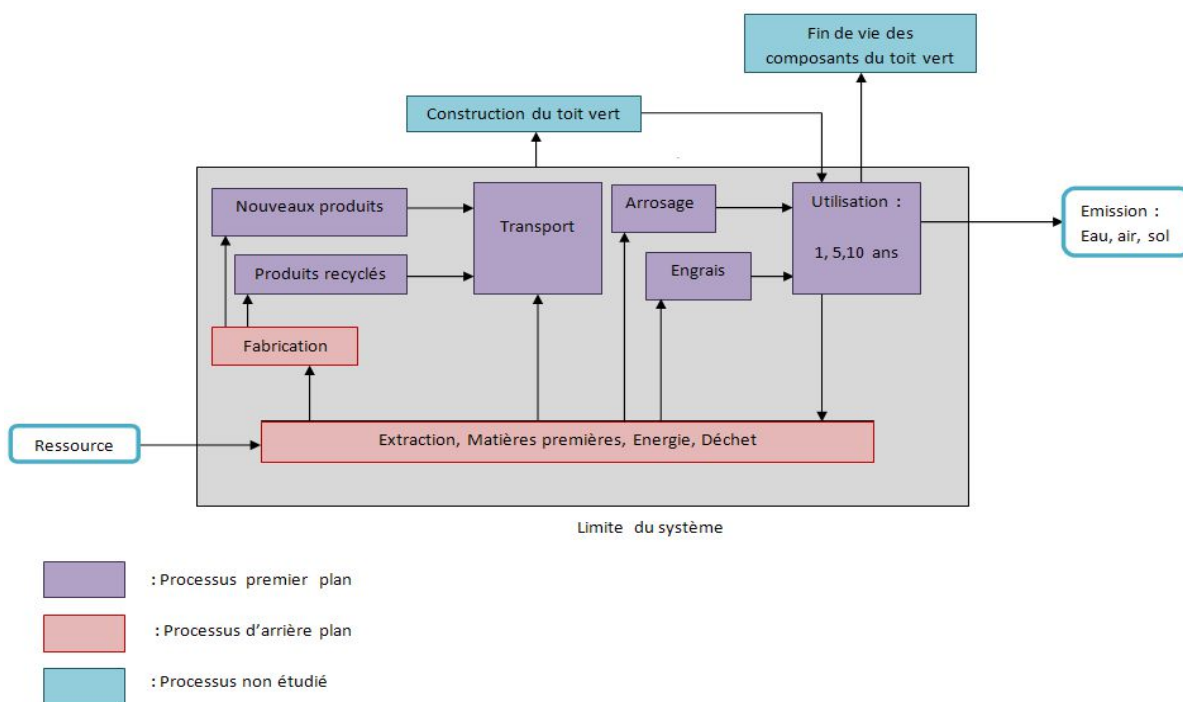


Figure 1 processus du cycle de vie des toits verts et la frontière du système.

La méthodologie de caractérisation des impacts que nous avons utilisée lors de la simulation est la méthode CML(baseline) dans le logiciel openLCA. Cette méthode de modélisation correspond à des effets de premier ordre : quantifiable et relativement direct, donc avec très peu d'incertitudes mais peu parlant(Aitor Acero et al. 2014)

2.2 Inventaire de cycle de vie

Pour réaliser tous les étapes de simulation, nous avons utilisé le logiciel OpenLCA. Tous les données utilisées sont recensées des différentes entreprises et experts comme le document réalisé par Steven Peck intitulé « Lignes directrices de conception de toits verts » qui montre la quantité des matériaux utilisés dans la conception des toits verts. Les ressources utilisées proviennent de la base de données Ecoinvent version 3.1 rajoutées dans le logiciel. Nous avons pris l'hypothèse que les couches constituant le toit vert sont celles représentées sur la figure 1.

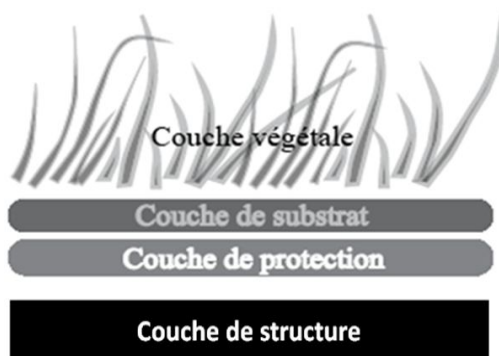


Figure 2 : les différentes couches constituant un toit vert.

Pour les caractéristiques de ces différentes couches dans les scénarios Nous avons utilisé les données provenant de (Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2015).

2.2.1 Scénario toit vert extensif

Couche végétale

Cette couche est composée d'une végétation du type herbacé (le gazon). Nous avons peu de choix sur la végétation pour ce type de toit à cause de la type de structure léger. Elle est la partie essentielle du toit vert. Très variable en quantité, car elle pousse au fil du temps. Pour notre cas, 1 kg de végétation est planté avec une épaisseur de 0,02 m.

Couche de substrat

Pour ce premier type de toit vert nous avons choisi un composte mélangé avec de la terre. Avec une quantité respectivement de 100 kg et 25 kg. Le tout d'une hauteur de 0,15 m. Le substrat est un élément essentiel pour le toit vert, il sert à la nutrition de la végétation et joue un rôle important dans la gestion des eaux pluviales.

Couche de protection

Cette couche est composée de deux matériaux plastiques. L'un est la barrière anti racine composé de polyéthylène haute densité 0,76 kg et de 0,0008 m d'épaisseur. Cette couche est nécessaire pour éviter la pénétration des racines dans la structure. L'autre est une couche de drainage et de filtration constituée de polystyrène vierge de 0,68 kg et 0,008 m. Le filtre sert à filtrer les particules fines du substrat et le drainage permet la libre circulation de l'eau et ressemble à un carton d'œuf.

Couche de structure

Cet élément est essentiel car il supporte toutes les différentes couches du toit vert. Ici nous allons utiliser du bois de pin de 25 kg et 0,15 m d'épaisseur.

Les transports de ces éléments sont présentés dans le tableau 1 .

Tableau 1 : transport des matériaux pour le toit vert extensif.

Couche	Base de données	transport, freight, lorry	transport, freight, lorry	transport, freight, light commercial vehicle-Row	transport, freight, sea, transoceanic ship-GLO
	3.5-7.5 metric ton, EURO3-RER	3.5-7.5 metric ton, EURO3-RoW	3.5-7.5 metric ton, EURO3-RoW	3.5-7.5 metric ton, EURO3-RoW	3.5-7.5 metric ton, EURO3-RoW
Végétation	-	-	-	30 km	-
Substrat	-	-	-	20 km	-
Protection	225 km	365 km-	365 km-	20 km	8938 km
Structure	-	168 km-	168 km-	20 km	-

Les éléments de maintenance lors de l'utilisation du toit durant l'unité fonctionnels sont l'arrosage et l'addition de substrat sur la couche de végétation .En termes de ressources il faut ajouter 20 kg d'engrais et 96 kg d'eau par an pour 1m2 de toit vert. Avec la base de données nous avons considéré les processus suivantes « tap water production, underground water withouttreatment-RoW » et « field Application of compost-RoW ». Les quantités d'intrants nécessaires sont calculées selon la période de la phase d'utilisation du produit considérée.

2.2.2 Scénario toit vert intensif

Les éléments sont donnés par le tableau suivant

Lors du transport seul les couches de structure et de protection changent.

Pour la couche de structure, le ciment subit 2 types de transport l'un poids lourd et l'autre voiture commerciale de distance respective de 190 km et 20 km . Nous avons pris l'hypothèse que l'acier vient de l'Afrique du sud, avec 4 types de transport : ferroviaire, maritime, poids lourd et voiture commerciale de distance respective 210 ; 2617,92 ;365 et 20 km. Le gravillon est transporté par un transport commercial routier de 20 km.

Pour la couche de protection, nous avons 20 km de transport par voiture commerciale en Europe 5655 km de transport aérienne vers Antananarivo-Madagascar et 50 km de transport par voiture commerciale.

Les éléments additionnés lors de l'utilisation du toit sont les suivantes :

150 kg d'engrais et 730 L d'eau sont utilisés en un an. Les données de processus utilisées sont processus de production de ciment, acier, gravillon, polyéthylène, polystyrène, laine, tuile concassé, engrais, buisson. Elles sont présentées dans le tableau 2

Tableau 2 : matériaux composant le toit vert intensif.

Couche	Produit	Matériaux	Poids [kg/m ²]	Epaisseur [m]
Structure	Béton	Ciment	75	0,15
		Acier	25	
		Gravillon	150	
Protection	Barrière anti racine	polyéthylène basse densité, recyclé (PEBD)	0,175	0,0002
	Drainage et filtration	polystyrène choc recyclé (HIPS)	1,252	0,0275
	Reserve d'eau	laine minérale hydrophile	6 (sec), 46 (saturé)	0,05
Substrat	Mélange de terre recyclé et engrais biologique	tuile concassé	200	0,40
		Engrais venant des poulaillers	50	
végétale	canopée	buissons à croissance faible	10	1

2.3 Evaluation des impacts

Cette étape permet de convertir les données d'inventaires en des indicateurs caractérisant les potentiels effets sur la santé humaine et l'environnement du produit au cours de son cycle de vie (ILCD Handbook 2009). Nous avons utilisé la méthode CML Baseline la version la plus récente de la méthode mise au point par l'Institut de l'environnement Sciences, Université de Leiden, Pays-Bas. Elle présente dix catégories d'impact environnementaux, mais nous ne présentons que 3 qui sont d'intérêts et pertinents pour le cas de Madagascar, ils sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : descriptions des catégories d'impacts choisies.

Catégorie d'impact	Indicateur	Unité	Description
Changement climatique-	GWP100	kg CO ₂ eq.	l'impact du produit sur le réchauffement climatique sur une période de 100 ans.
			Caractérisation des émissions de gaz à effet de serre dans l'air.
Depletion des ressources abiotique –	combustible fossile	MJ	l'utilisation de ressources naturelles abiotiques dérivées de l'extraction de minéraux et de combustibles fossiles.
Toxicité humaine	HTP inf	kg 1,4-dichlorobenzene eq.	le potentiel effet sur l'homme de substances toxiques émises dans l'air, l'eau et le sol.

Nous avons choisi le GWP avec un horizon de temps de 100 ans parce que c'est l'indicateur le plus utilisé. Il représente la durée de vie humaine et a été choisi lors du protocole de Kyoto article 5-3. Il nous faut aussi une longue durée pour visualiser le changement causé par le réchauffement (par exemple la montée du niveau de la mer).

3. RESULTATS

Dans cette section nous présentons les résultats avec quelques interprétations.

3.1 Phase 1 : Production des matériaux

Nous présentons ci-dessous leurs résultats des deux scénarios étudiés.

La production du ciment présente 53 kg eq CO₂ plus d'impact par rapport au bois tandis que l'acier ne présente que de plus 5,3 kg eq CO₂. En termes de ressources le ciment est 15 fois plus consommateur par rapport à l'acier. Sur la toxicité humaine, la production du ciment est toujours la plus impactant avec une valeur de 5,288 kg 1,4-dichlorobenzene eq. Ce sont les substances émises lors des différentes étapes de production ou de transport qui sont responsables des impacts en générale et non les substances dans le produit sauf si ce sont des substances toxiques. Le ciment est produit par combustion du calcaire et d'autres additifs à très haute température. Cette combustion rejette des cendres volantes et des particules minérales très fine qui peuvent être cancérigènes pour l'homme (García-Pérez et al. 2015).

Couche de protection : les matériaux utilisés pour le toit vert extensif sont plus impactant par rapport à celui du toit vert intensif. Ceci est causé par le fait qu'on utilise des matériaux à haute densité et qui nécessite plus de ressources. Ces matériaux sont plus impactant à cause de ces impuretés, contenant des substances nocives et polluantes. Le fait d'utiliser des matériaux recyclés et à basse densité présente moins d'impact. Prenons par exemple l'utilisation du polystyrène, cette matière vient de l'hydrocarbure benzénique qui est toxique en cas d'aspiration ou d'inhalation. Le produit recyclé est moins toxique car plus de 60% de ces substances sont déjà éliminés dans le polystyrène.

Tableau 4 : résultats de comparaison pour les deux types de toit verts

Couche	Catégorie d'impact	Changement climatique- GWP100	Déplétion des ressources Ressource abiotique	Toxicité humaine HTP inf
	Unité	kg CO2 eq.	MJ	kg 1,4-DB
Structure	woodwool production-RoW	-15,861	11,087	0,368
	gravel production, crushed-RoW	0,657	8,026	0,631
	cement production, pozzolana and fly ash 11-35%, non-US	89,148	318,375	7,931
	steel production, low-alloyed, hot rolled-RoW	2,905	36,949	2,777
Substrat	field Application of compost-RoW	19,982	260,66	10,479
	land already in use, arable land-GLO	40,625	84,084	10,372
	field application of poultry manure -RoW	4,136	257,329	13,172
	concrete roof tile production-RoW	59,7	357,748	17,224
Protection	Polyethylene production, linear hightdensity, granulate-RER	1,494	50,589	0,064
	polyethylene production, low density, granulate-RER	0,333	10,303	0,018
	polystyrene foam slab production, 100% recycled-RER	0,461	6,477	0,142
	polystyrene, high impact -RER	2,307	51,446	0,215
	woodwool production-RER	-3,45	5,929	0,266
Végétation	grass production, permanent grassland, organic, extensive-RoW	-2,746	1,081	1,081
	grass production, organic, intensive -RoW	-6,277	2,471	0,029

Couche de substrat : le choix des composants de substrat est une partie importante dans la réalisation d'un toit vert. On voit bien dans l'inventaire que la quantité de substrat du toit vert intensif est deux fois plus que celui du toit vert extensif. Alors dans la section changement climatique, l'utilisation de la tuile concassée est bénéfique du faite que le matériau est recyclé, exemple : cela réduit la quantité de substrat de moitié. Par contre pour la consommation des ressources c'est l'utilisation de terre qui est avantageux. Ceci est dû à l'utilisation d'énergie lors du concassage de la tuile. Sur le choix des engrais, ici l'utilisation du matériau pour le toit vert intensif est deux fois plus que pour le toit vert extensif. Mais le résultat montre pour la catégorie réchauffement climatique que l'utilisation du compost est 5 fois plus impactant que l'utilisation de l'engrais venant d'un poulailler. Pour la déplétion en ressource, le compost consomme deux fois plus de ressource même si la quantité en matière des deux engrais est identique. Tout ceci provient de la production, le transport et l'épandage du compost qui nécessite l'utilisation des engins mécaniques et motorisés. Grand consommateur de ressource et source des rejets polluants (CO2, particules fines) en grande quantité. Le compost n'est pas un produit utilisé sur les toits verts, mais pour éviter la mise en décharge selon (Bozorg Chenani *et al.* 2015).

il est mieux d'utiliser des produits d'origine naturelle et sans traitement comme engrais. Couche de végétation : pour toutes les catégories d'impacts, nous pouvons voir d'après ces résultats que les impacts environnementaux sont proportionnels à la quantité de végétation utilisée pour le type de toit. Le toit vert de type intensif présente donc plus d'impact que le toit vert extensif mais inversement pour le changement climatique car elles présentent des effets négatifs qui sont des avantages.

3.2 Phase 2 : transport des matériaux

On peut voir dans la figure suivante la comparaison entre les transports des matériaux pour les deux types de toit vert :

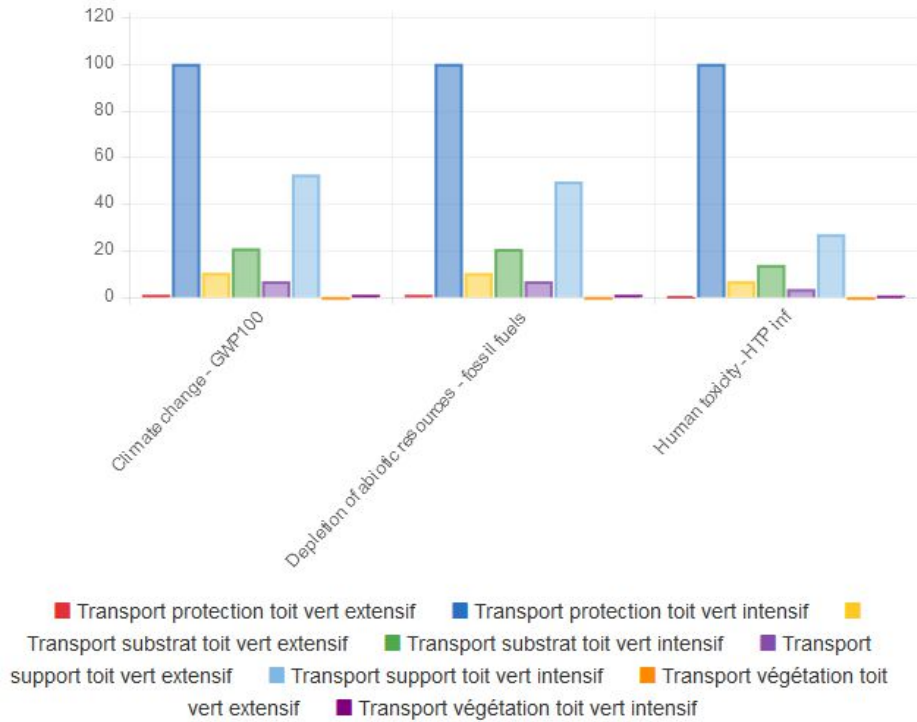


Figure 3 : comparaison lors du transport des deux types de toit vert.

Transport de la couche de support : pour toutes les catégories d'impact le transport de la couche de support pour le toit vert intensif est 8 fois plus impactant que celui du toit vert extensif. Pour le toit vert intensif le transport des différents matériaux se fait par 3 types de transport, qui est la cause de la valeur très élevée du changement climatique par les rejets des Gaz à effet de serre, consommateur de ressources fossile et pollueur de l'environnement. Ces transports rejettent dans l'atmosphère des substances comme l'oxyde d'azote (NO) et le dioxyde de soufre (SO2) avec des taux d'émission différentes. Ici l'impact du transport est dominé par le transport maritime. Pour le transport de la couche de protection : celui du toit vert intensif est plus impactant. Causé par le fait que l'on utilise du transport aérien. Les émissions lors de ces transports contribuent à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ils sont responsables de la rétention de la chaleur et ainsi que de la diffraction des rayonnements qui contribuent au changement climatique. Sur la déplétion de ressources, Part de cette consommation est plus ou moins grand, conformément au km parcouru. Pour la toxicité humaine, l'avion présente des émissions plus élevée face aux autres types de transport. Les avions d'aujourd'hui produisent des quantités élevées de CO dans la troposphère et de la stratosphère dangereux à la santé humaine. Transport de la couche de substrat : les distances entre les deux transports, couche de substrat du toit ver extensif et toit vert intensif sont identiques mais les quantités de matière transporté sont différentes. Le transport de la couche de substrat pour le toit intensif est deux fois plus impactant que pour l'extensif. Donc l'impact est le double pour chaque catégorie d'impact. Transport de la couche de végétation : Ici le transport est effectué par les camionnettes. L'impact est en fonction de la charge et de la distance parcourue, plus la charge est lourde plus le transport est polluant.

3.3 Phase 3 : utilisation et consommation de ressources

Nous pouvons voir sur la figure 4 que l'utilisation du toit vert intensif est plus impactant que celui du toit vert extensif à cause de la différence des éléments utilisés et de leur quantité.

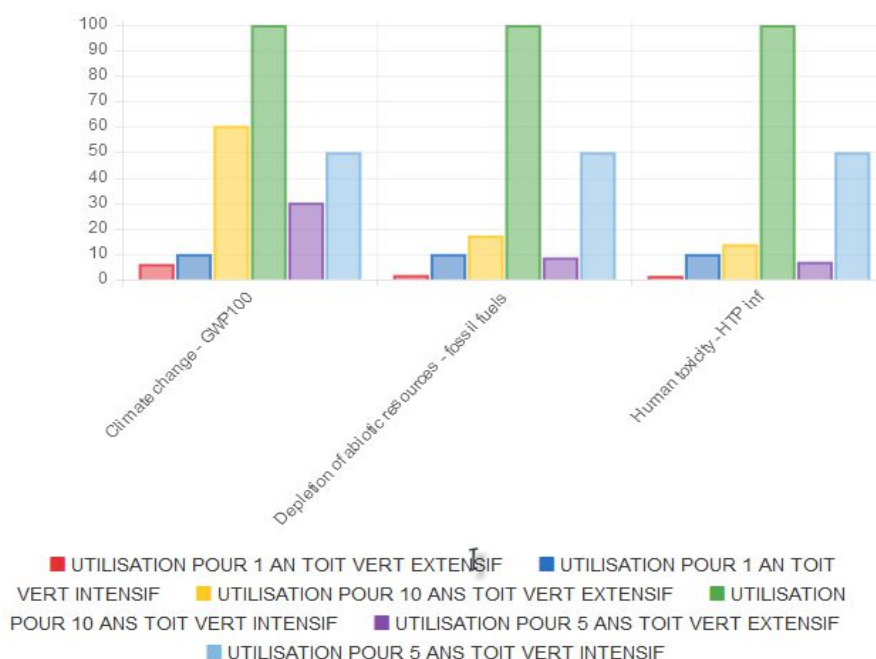


Figure 4 comparaison des consommations de ressources lors des phases d'utilisation des deux types de toit vert.

Dans cette section l'idée est de choisir entre les deux modes d'utilisation du toit c'est-à-dire le choix du type de matériau moins impactant. Comme nous avons vu précédemment l'utilisation de l'engrais venant du poulailler est plus avantageuse par rapport au compost. Il est convenable d'utiliser comme engrais les fientes de poule et aussi d'utiliser de l'eau de puits produit sur place sans traitement biologique pour ne pas gaspiller de l'énergie.

4. DISCUSSION

Dans cette section nous allons présenter quelques solutions d'améliorations des impacts potentiels. Nous présentons aussi quelques informations sur le choix des matériaux et transports utilisés :

Pour avoir une structure bien plus légère au lieu d'utiliser une structure en béton, on peut utiliser à sa place une structure en acier dont l'impact a été déjà étudié par (Olmez *et al.* 2016). Mais il est mieux de prendre le bois grâce à son aptitude de stocker le CO₂ (Guo *et al.* 2015). Le fait de ne pas utiliser beaucoup de plastique diminue l'impact de la couche de protection. En Suisse, des systèmes de toit vert sans utilisation des couches de matière plastique sont utilisés et mis à l'essai (Ces toits verts se composent principalement de la barrière de la racine, le substrat et les plantes). Le substrat est mieux si l'on utilise de la tuile concassée à la main et de le mélanger avec du fiente de poule. Dans tous types de végétation, ceci est toujours d'intérêt grâce à sa capacité de stockage de CO₂ et captage des poussières. Plusieurs moyens de transport ont été présentés lors de l'inventaire. Le transport aérien est dominant sur toutes les catégories d'impacts. Il émet jusqu'à 8 fois plus que le transport maritime pour une même quantité transportée. Mais ici la quantité en couche de protection pour le toit vert intensif est aussi 8 fois plus que celui du toit vert extensif. Même si le transport a été pris en compte dans les précédentes études (Kosareo et Ries 2007) son impact environnemental total n'a pas été quantifié explicitement. Dans notre cas, il présente une part très importante. Une solution d'optimisation est de produire les matériaux sur place.

Lors de l'utilisation des toits verts il est toujours indispensable d'ajouter du substrat et d'arroser. Donc leurs impacts sont aussi à considérer, d'après nos résultats présentés précédemment nous avons vu que l'impact de la phase d'utilisation du toit vert intensif est plus important que celui du toit vert extensif. Toutefois le fiente de volaille reste toujours le meilleur engrais car en quantité l'élément ajouté au toit vert intensif est bien plus que celui du toit vert extensif. On peut dire que l'impact dépend de la quantité de la matière, de son transport et surtout de sa caractéristique. Selon Fertilizers Europe et Unifa (mars 2013), trouver un alternatif aux engrais traditionnels est important car ceci pourra être bénéfique par exemple compostage des produits de déchet. C'est l'ammonitrate (engrais azoté minéral à base de nitrate d'ammonium) qui pourrait diminuer l'empreinte en carbone jusqu'à 25%. Et enfin, l'utilisation d'eau de puits face à l'eau de robinet est avantageuse grâce à sa faible consommation de ressource et d'énergie.

5. CONCLUSION

Nous avons analysé la performance environnementale de deux systèmes de toit vert léger et lourd dans le but de déterminer les impacts potentiels sur l'environnement de ces deux systèmes. Pour cela nous avons calculés les impacts respectifs des différents matériaux, transports et utilisations des couches constituant les toits verts. Sur la base de l'étude, il est possible de développer des systèmes de toits verts simples que possible, sans matériaux de couche artificiels tant que possible. Selon les hypothèses que nous avons considérées l'étude montre que, l'on doit utiliser des produits recyclés à la place des produits naturels. Pour chaque catégorie de processus qui ont été utilisée pour la modélisation du toit vert :

Les matériaux : il est mieux de choisir des matériaux légers du support jusqu'à la végétation. On pourrait envisager une amélioration des matériaux qui sont les plus impactant tels que la couche de protection et le substrat.

Les transports : ici il est raisonnable d'utiliser au maximum des produits locaux. Pour éviter les impacts environnementaux élevés causés par les transports internationaux.

Consommation d'énergie et de ressource lors de la phase d'utilisation: dans les résultats de notre comparaison, on peut en déduire qu'il y a une énorme différence entre utilisation de compost et de fiente de volaille comme engrais dans le substrat. Il vaut mieux utiliser ce dernier et utiliser de l'eau de puits pour l'arrosage.

D'où l'on peut conclure que, si l'on veut construire durablement, il est judicieux de bien choisir des produits recyclés et locaux si possible pour avoir une meilleure performance environnementale dans le pays. Pour le développement du pays et pour la protection de l'environnement, il est toujours préférable de réaliser une l'analyse de cycle de vie des produits. Dans les pays développés ce système est déjà instinctif. Les études et construction de toit vert sont parmi les solutions utilisées pour réduire la consommation de ressource des bâtiments et d'améliorer le confort de l'habitat. Dans des futures études sur les toits verts, il est nécessaire de réaliser l'analyse avec d'autres catégories d'impact.

6. REFERENCES

- Aitor Acero, Cristina Rodríguez, et Andreas Ciroth. 2014. « A methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories », février 17. <http://www.openlca.org/documents/14826/2c5b8391-68d9-49a1-b460-a94f18e7d2df>.
- Bentley, R.W. 2002. « Global oil & gas depletion: an overview ». *Energy Policy* 30 (3): 189-205.
- Bozorg Chenani, Sanaz, Susanna Lehvavirta, et Tarja Häkkinen. 2015. « Life cycle assessment of layers of green roofs ». *Journal of Cleaner Production* 90 (mars): 153-62.
- Catalano, Chiara, Corrado Marcenò, Vito Armando Laudicina, et Riccardo Guarino. 2016. « Thirty years unmanaged green roofs: Ecological research and design implications ». *Landscape and Urban Planning* 149: 11-19.
- Coma, Julià, Gabriel Pérez, Cristian Solé, Albert Castell, et Luisa F. Cabeza. 2016. « Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings ». *Renewable Energy* 85 (janvier): 1106-15.
- Gao, Tianming, Lei Shen, Ming Shen, Fengnan Chen, Litao Liu, et Li Gao. 2015. « Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants ». *Carbon Emissions Reduction: Policies, Technologies, Monitoring, Assessment and Modeling* 103 (septembre): 160-70.
- García-Pérez, Javier, Gonzalo López-Abente, Adela Castelló, Mario González-Sánchez, et Pablo Fernández-Navarro. 2015. « Cancer mortality in towns in the vicinity of installations for the production of cement, lime, plaster, and magnesium oxide ». *Chemosphere* 128: 103-10.
- Guo, Yafei, Chuanwen Zhao, Xiaoping Chen, et Changhai Li. 2015. « CO2 capture and sorbent regeneration performances of some wood ash materials ». *Applied Energy* 137 (janvier): 26-36.
- ILCD Handbook. 2009. « General Guide for Life Cycle Assessment: Detailed Guidance ». European Commission.
- ISO 14040. 2006. « Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework, Geneva, Switzerland . » International Organization for Standardization (ISO).
- Kosareo, L., et R. Ries. 2007. « Comparative environmental life cycle assessment of green roofs », Build. Environ. édition.
- Morau, Dominique, Hery Tiana Rakotondramiarana, et Tojo Fanomezana Ranaivoarisoa. 2015. « Dynamic Simulation of the Green Roofs Impact on Building Energy Performance, Case Study of Antananarivo ». *Buildings* 5: 497-520.
- Mostafa Razzaghmanesh, Simon Beecham, et Telma Salemi. 2016. « The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia ». *Urban Forestry & Urban Greening* 15: 89-102.
- RAHELIARILALAO, Bienvenue. 2009. « PRINCIPES GENERAUX. CADRE DE L'ACV ». In *Analyse de cycle de vie*, 8:1.
- Sajedeh Sadat Ghazizadeh Hashemi, Hilmi Bin Mahmud, et Muhammad Aqeel Ashraf. 2015. « Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 669-79.
- Van Mechelen, Carmen, Thierry Dutoit, et Martin Hermy. 2015. « Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review ». *Sustainable Cities and Society* 19: 74-90.
- Yang, Xinyan, et Yuguo Li. 2015. « The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature ». *Building and Environment* 90: 146-56.
- Zhang, Qianqian, Liping Miao, Xiaoke Wang, Dandan Liu, Liang Zhu, Bing Zhou, Jichao Sun, et Jingtao Liu. 2015. « The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution ». *Landscape and Urban Planning* 144: 142-50.