

**Estimation de l'incertitude dans les analyses de cycle de vie
en élevage : apport de l'analyse de sensibilité, limites du
modèle**

**Uncertainty estimation in life cycle analysis: contribution of
sensitivity analysis, limits of the model**

Marion Ferrand¹, Vincent Manneville, Sindy Moreau, Elise Lorinquer, Thierry Charroin,
Alicia Charpiot, Armelle Gac, Carlos Lopez, François Brun

¹ Institut de l'Élevage, 149 rue de Bercy, 75595 Paris cedex 12, France
E-mail : Marion.Ferrand@idele.fr

Résumé

Les analyses de cycle de vie intègrent rarement les incertitudes sur les facteurs d'émission et de caractérisation. Leur nombre et le manque de connaissances sur leurs variabilités en sont les principales causes. Pour cibler les facteurs les plus influents sur les émissions de gaz à effet de serre, une analyse de sensibilité de Morris a été réalisée. Sur les 10 paramètres étudiés, seuls quatre apparaissent fortement influents : les émissions de CH₄ en bâtiments et au stockage. Ce résultat est utilisable pour mieux orienter des expérimentations futures. Par ailleurs, cela permet d'alléger l'analyse d'incertitude finale par méthode de Monte Carlo si seuls les facteurs influents sont retenus.

Mots-clés : analyse de cycle de vie, incertitude, analyse de sensibilité, méthode de Morris, méthode de Monte-Carlo

Abstract

The life cycle assessments rarely include the uncertainties on the emission and characterization factors. Their number and the lack of knowledge of their variability are the main causes. To identify the most influential parameters on greenhouse gases emissions, a Morris sensitivity analysis was carried out. On the 10 parameters studied, only four appear to be highly influential. This result can be used to better lead future experimentations. Besides, it allows simplifying final uncertainty analysis by Monte Carlo method if only the influential factors are retained.

Keywords : life cycle analysis, uncertainty, sensitivity analysis, resampling methods

1. Introduction

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode pour l'évaluation environnementale d'un produit ou d'un système prenant en compte plusieurs impacts environnementaux. En ACV, le terme d'incertitude est souvent utilisé au sens large et recouvre à la fois des notions d'incertitude et de variabilité. Les incertitudes rencontrées portent principalement sur les facteurs d'émissions qui permettent de convertir les données techniques en flux d'éléments (N, P, ...) et sur les facteurs de caractérisation convertissant les flux en impacts sur l'environnement (changement climatique, acidification ...).

L'Institut de l'Elevage a initié en 2009, une analyse environnementale multicritère sur les exploitations des Réseaux d'Elevage pour disposer d'une première quantification des impacts environnementaux et identifier les leviers d'action qui permettraient de réduire les impacts de l'élevage sur l'environnement (Gac *et al.*, 2010). Pour réaliser l'ACV de la filière bovin lait, près de 250 facteurs d'émission et de caractérisation¹ sont nécessaires. Limiter le nombre de paramètres à caractériser est donc primordial pour estimer l'incertitude sur l'impact final, les distributions de ces paramètres étant rarement connues et le coût pour obtenir les données nécessaires très élevé.

Pour faire un premier screening dans les facteurs d'émission et caractérisation à conserver pour l'analyse d'incertitude, l'analyse de sensibilité est particulièrement bien adaptée. Cette méthode permet de sélectionner les paramètres contribuant le plus aux impacts et d'orienter les recherches bibliographiques ou les expérimentations à mettre en place. Parmi, les différents types d'analyse de sensibilité, l'analyse de Morris (Morris, 1991 - Saltelli, 2000) est utilisée pour les modèles comportant beaucoup de paramètres à explorer. Cette méthode repose sur un plan d'expérience numérique où un seul paramètre varie à la fois. Ces derniers sont classés en trois groupes selon leurs effets : peu influents, moyennement influents, et très influents. Les interactions et la linéarité des effets sont également évaluées par cette méthode. Par la suite, l'incertitude sur les impacts finaux est obtenue par simulation de Monte-Carlo en fixant les paramètres du premier groupe à leurs valeurs nominales alors que seuls les facteurs les plus influents des second et troisième groupes sont dotés d'une distribution de probabilité.

2. Matériel et Méthode

2.1 Les données

Les « Réseaux d'élevage pour le conseil et la prospective (RECP) » sont un dispositif partenarial mis en place dans les années 1980 associant des éleveurs volontaires, les chambres d'agriculture et l'Institut de l'Elevage. Il est basé sur un suivi pluriannuel d'un échantillon de 1420 exploitations herbivores réparties sur l'ensemble du territoire.

Ce dispositif a pour objectif la description des systèmes d'élevage herbivore et l'élaboration de références techniques et économiques (élaboration de cas-type par système) à destination des éleveurs et des conseillers de terrain ou à vocation collective. Il s'agit aussi d'un outil de recherche appliquée : source de connaissances et d'expertise sur les systèmes de production régionaux et nationaux.

¹ Ces facteurs d'émission et de caractérisation constituent les paramètres de notre modèle et seront appelés paramètres par la suite

La base de données rassemble les données collectées en élevage ainsi qu'un ensemble de données calculées. Les informations stockées se structurent autour des moyens de production, du fonctionnement global de l'exploitation, des performances zootechniques, des résultats économiques et d'indicateurs agro-environnementaux. Sur le plan agro-environnemental, le bilan des minéraux a été intégré dans le système d'information dès 1996, et le volet sur les consommations d'énergie a été récemment consolidé grâce à une collecte de données qui se systématise depuis 2007. La prise en compte de la durabilité est en effet un objectif d'évolution du dispositif des Réseaux d'Élevage depuis quelques années (Charroin *et al.*, 2005).

L'évaluation de l'incertitude a porté sur les exploitations spécialisées en production laitière. Elle a été menée pour l'année 2008 sur un échantillon d'exploitations homogènes en termes de données renseignées. Au final, l'analyse des résultats porte sur un échantillon de 405 exploitations bovines laitières spécialisées.

2.2 L'analyse de cycle de vie

2.2.1 Principes

L'analyse de cycle de vie est une méthode, standardisée ISO 14044, qui est utilisée pour qualifier et quantifier les impacts sur l'environnement d'un produit en prenant en compte tout son cycle vie de la production à la destruction. Cette analyse se fait dans un système dont le périmètre est bien délimité. Par exemple, pour connaître l'impact de la production agricole d'un litre de lait, le système défini sera l'exploitation laitière mais pour connaître l'impact d'un litre de lait produit et distribué, on intégrera également dans le système l'usine d'embouteillage et la surface de vente. L'ACV conduite dans cette étude s'arrête aux portes de l'exploitation.

Pour mener une ACV, une fois le système défini, différents indicateurs environnementaux sont calculés à partir de données de bases. Dans le cadre de ses travaux d'ACV, l'Institut de l'Élevage retient 3 niveaux d'indicateurs (Figure 1) :

- **Les critères de pratique et de pression** peuvent être calculés directement à partir des données techniques d'une exploitation agricole, il s'agit des bilans d'azote, phosphore et potassium (N, P, K), des consommations d'énergie et de la biodiversité
- **Les indicateurs d'émission** ou de transfert représentent les flux d'éléments (NO₃, PO₄, C, gaz à effet de serre (GES) ...) vers l'environnement. Ils sont calculés à partir des variables techniques ou des indicateurs de pratique et de pression en utilisant **des facteurs d'émission** qui permettent de convertir ces données en flux. Les facteurs d'émissions sont des paramètres issus de la bibliographie ou d'expérimentations.
- **Les indicateurs d'impact** correspondent à l'impact du produit/de l'exploitation étudié(e) sur l'environnement. Ces indicateurs sont calculés à partir des indicateurs d'émission à l'aide **des facteurs de caractérisation**. Dans cette étude, nous nous centrerons sur l'impact des émissions de GES (CH₄, CO₂, N₂O) sur le changement climatique.

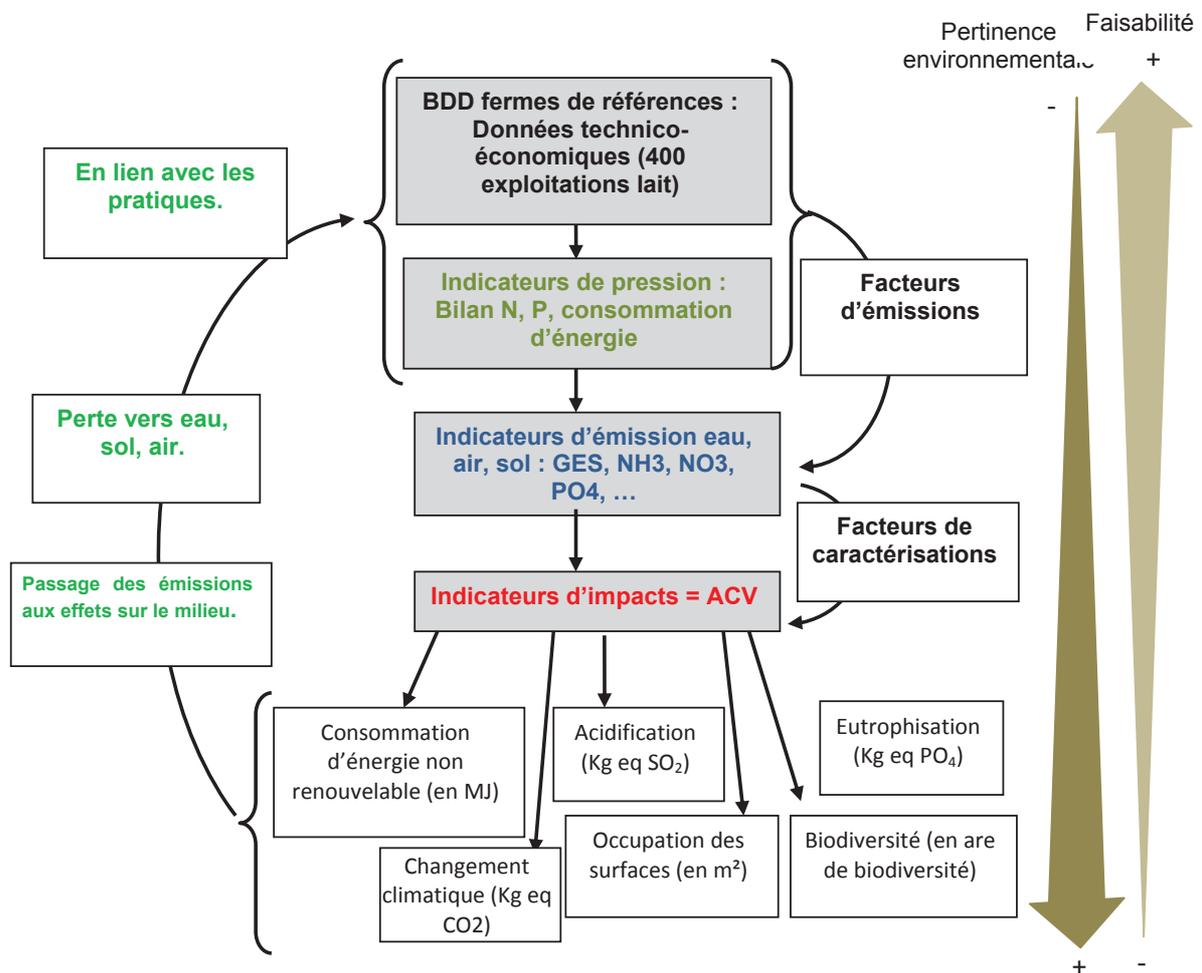


Figure 1. Les quatre étapes utilisées pour l'évaluation environnementale multicritère des exploitations d'élevage d'herbivores

2.2.2 L'incertitude en ACV

En ACV, le terme d'incertitude est souvent utilisé au sens large et recouvre à la fois des notions d'incertitude et de variabilité (Huijbregts, 1998). Quand l'incertitude est liée à un manque de connaissance sur la vraie valeur d'une quantité, elle peut être réduite par de nouvelles mesures plus fidèles (précise) et exactes (accurate). Si la variabilité est liée à la nature hétérogène des valeurs, elle ne peut pas être réduite, elle peut seulement être mieux évaluée par un échantillonnage adéquat. Les incertitudes sur les facteurs d'émission et de caractérisation (paramètres) sont très peu décrites dans les études d'ACV et rarement prises en compte. Les principales études où les incertitudes ont été considérées montrent des fourchettes d'estimation pouvant atteindre -50 à 100 % sur les émissions azotés (NH₃, NO, N₂O, N₂, NO₃) (Payraudeau *et al.*, 2007). Ces larges fourchettes sont liées à un

manque de connaissance sur les paramètres, les expérimentations référencées ne couvrant que quelques situations dans des contextes différents (Vigne *et al.*, 2011).

Pour mieux évaluer l'incertitude, il semble nécessaire d'approfondir les connaissances disponibles sur les facteurs d'émissions en ciblant les paramètres les plus influents à l'aide d'une analyse de sensibilité.

2.3 L'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une méthode complémentaire à l'analyse d'incertitudes. Elle intervient généralement après pour répartir l'incertitude du modèle entre les différentes sources (paramètres et variables d'entrée) mais peut aussi être utilisée préalablement pour limiter le nombre de paramètres à introduire dans l'analyse d'incertitude.

Saltelli (2000) distingue trois types d'analyse de sensibilité:

- les méthodes de « screening » moins coûteuses en temps mais aussi moins informatives sont utilisées sur les modèles où le nombre de paramètres est important et/ou le temps de simulation est long. L'analyse de Morris est classée dans ce groupe.
- Les méthodes dites locales basées sur des dérivées ne concernent que les modèles comportant peu de facteurs et étant linéaires.
- Les méthodes dites globales basées sur la décomposition de la variance sont très informatives mais sont peu adaptées aux modèles complexes car tous les facteurs varient de manière simultanée. Il s'agit notamment des indices de Sobol et de la méthode FAST.

Pour les modèles complexes et dont les paramètres sont mal connus, comme c'est le cas en analyse environnementale, l'analyse de sensibilité utilisée doit prendre en compte les interactions entre paramètres, la non-linéarité des effets, ne pas nécessiter de connaissances précises sur la distribution des paramètres et avoir des temps de calcul réduits (Ravalico, 2005). L'analyse de Morris même si elle ne permet pas de distinguer les interactions des effets linéaires est la méthode la plus adaptée à notre cas du fait du nombre de paramètres et de la durée des simulations (environ une minute par simulation). Les paramètres d'entrée vont donc être classés en 3 groupes d'effets :

- négligeables sur la sortie,
- linéaires et sans interactions,
- non linéaires ou avec interactions.

Pour cela, $p+1$ expériences répétées r fois vont être réalisées avec p le nombre de paramètres étudiés. Pour chaque paramètre, un domaine d'étude (Ω) est défini à partir de ses bornes inférieure et supérieure. A chaque répétition, une valeur x comprise dans Ω est choisie aléatoirement et une variation Δ constante est appliquée à x .

L'effet élémentaire d'un paramètre i à un point x est égal à $d_i = \frac{f(x+\Delta) - f(x)}{\Delta}$ avec x et $x+\Delta \in \Omega$

et la fonction $f()$ représentant le modèle ACV.

La moyenne des d_i sur r répétitions donne l'importance de l'effet en moyenne. L'écart-type des d_i indique si on est en présence d'interactions ou d'un effet non linéaire.

2.4. Mise en œuvre du modèle et de l'analyse de sensibilité

Le modèle utilisé est décrit dans le guide méthodologique (Schaefer, 2010). Le principe général est de calculer pour chacune des exploitations de la base de données des Réseaux d'élevage ses émissions de GES en faisant la somme des émissions des différents compartiments de l'exploitation (bâtiment, stockage, pâturage, épandage). Environ 250 paramètres sont appelés dans le modèle. Dans un premier temps, l'analyse de sensibilité n'a porté que sur 10 paramètres, les informations sur les autres paramètres n'étant pas encore disponibles. Les bornes minimales et maximales utilisées pour l'analyse de sensibilité sont déterminées d'après les différentes valeurs trouvées dans la bibliographie. Les valeurs prises sont listées dans la table 1. Le nombre de répétitions r a été fixé à 100, les résultats étant stables sur les différents essais effectués.

Paramètre	Valeur	Min	Max
FE CH4 bâtiment aire raclée	18	4	395
FE CH4 bâtiment litière accumulée	60	1,64	195
FE CH4 bâtiment caillebotis	305	209	492
FE CH4 lisier	35,5	0,32	44,8
FE NH3 bâtiment	0,12	0,03	0,37
FE N2O bâtiment aire raclée	0,00088	0	10,06
FE N2O bâtiment litière accumulée	0,71	0,68	1,4
FE N2O bâtiment caillebotis	0,48	0	5,86
FE N2O épandage	0,0157	0,0047	0,0391
Déposition atmosphérique	15	5	39

Table 1. Valeurs moyennes et bornes des paramètres pris en compte dans l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est réalisée sous R 2.13.0. à l'aide du package sensitivity. Le modèle appelé est implémenté dans SAS version 9.2.2.

3. Résultats

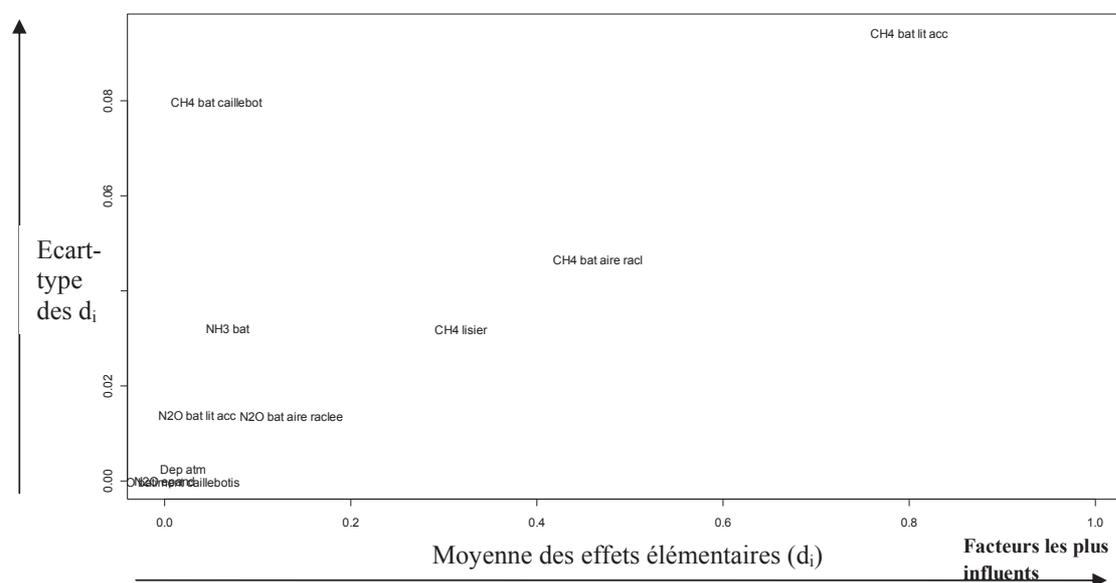
Les résultats sont donnés dans le tableau 1 et visualisés graphiquement (figure 1) pour en faciliter la lecture. La moyenne des effets élémentaires (μ^*) est représentée par l'axe des abscisses. Plus un paramètre prend une valeur élevée, plus il a une influence sur les émissions de GES bruts de l'atelier lait ramenées aux 1000L. L'axe des ordonnées indique s'il y a des interactions ou des effets linéaires.

Paramètre	Moyenne des effets élémentaires	Ecart-type des effets élémentaires
FE CH4 bâtiment aire raclée	0,46	0,047
FE CH4 bâtiment litière accumulée	0,80	0,095
FE CH4 bâtiment caillebotis	0,06	0,080
FE CH4 stockage (lisier)	0,32	0,032
FE NH3 bâtiment	0,07	0,032

FE N2O bâtiment aire raclée	0,14	0,014
FE N2O bâtiment litière accumulée	0,03	0,014
FE N2O bâtiment caillebotis	0,01	0,000
FE N2O épandage	0,00	0,000
Déposition atmosphérique	0,02	0,003

Table 2. Résultats de l'analyse de sensibilité, 10 paramètres, 100 répétitions

Interactions/ non linéarité



Graphique 1. Visualisation des effets en fonction de leurs influences et de leurs interactions

Il ressort du graphe ci-dessus que les facteurs d'émission de CH₄ en bâtiment et au stockage (lisier) sont les plus influents sur les émissions de GES bruts². Les facteurs d'émission portant sur les gaz azotés (NH₃, N₂O) n'apparaissent pas influents quand à eux. Curieusement, l'effet du NH₃ qui n'est pas un GES n'est pas nul même s'il est faible.

Les écart-types des effets élémentaires des émissions de CH₄ au bâtiment sont également élevés, ce qui signifie qu'on est vraisemblablement en présence d'un effet non-linéaire ou d'une interaction.

Pour l'analyse d'incertitude par méthode de Monte-Carlo, on ne retiendrait donc que quatre paramètres : les trois facteurs d'émission de CH₄ au bâtiment³ et celui du CH₄ au stockage.

Une comparaison des résultats obtenus par analyse simplifiée (c'est-à-dire avec prise en compte de l'incertitude uniquement pour ces 4 paramètres) et par analyse exhaustive (en prenant en compte l'incertitude qu'on a sur les 10 paramètres) est en cours. Elle devrait nous permettre de quantifier la

² L'effet élémentaire pour les émissions de CH₄ dans les bâtiments avec caillebotis est quasi nul, car très peu d'exploitations sont concernées.

³ Même si l'effet élémentaire pour le CH₄ dans les bâtiments avec caillebotis est quasi nul, il semble préférable de l'intégrer dans l'analyse d'incertitude pour ne pas créer une distorsion au niveau des quelques exploitations concernées.

différence sur l'incertitude finale entre une analyse simplifiée et une analyse exhaustive et confirmer l'intérêt d'une analyse de Morris en amont.

4. Discussion et conclusion

Le but de cette première étude était de tester l'intérêt d'une analyse de sensibilité en amont d'une analyse d'incertitude. La démarche n'est pas complète, une analyse de Monte-Carlo doit confirmer que cela n'entraîne pas de biais dans le calcul de l'incertitude. Si les résultats apparaissent non biaisés, le fait d'appliquer une analyse de Morris préalablement à l'analyse d'incertitudes permettra d'alléger le travail d'expérimentation et de bibliographie pour décrire les lois des différents paramètres.

Il semblerait également pertinent de mener les analyses de sensibilité module par module (bâtiment, pâturage, stockage) pour avoir un degré d'analyse un peu plus fin. Il est également envisager d'explorer des situations particulières en réalisant l'analyse de Morris sur des sous-groupes d'élevages.

D'autres points restent encore à explorer, notamment la prise en compte des corrélations entre paramètres. Actuellement les paramètres sont raisonnés indépendamment les uns et des autres sans tenir compte des corrélations existantes. La corrélation entre paramètres peut être prise en compte dans les méthodes de ré-échantillonnage en utilisant une matrice de corrélation ou de covariance. (Huijbregts 2003), mais pour cela il est nécessaire d'avoir des données brutes caractérisant tous les paramètres afin de définir cette matrice de corrélation. On peut vraisemblablement supposer que l'incertitude de nos sorties est surestimée, l'espace d'échantillonnage créé étant plus important que si les corrélations avaient été prises en compte ((Bjoörklund, 2002).

Les auteurs remercient les éleveurs qui participent au dispositif des Réseaux d'Elevage, les ingénieurs départementaux qui assurent le suivi et l'enregistrement des données des exploitations et les ingénieurs qui animent les équipes régionales.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet « Associer un niveau d'erreur aux prédictions des modèles mathématiques pour l'agronomie et l'élevage » (www.modelia.org) mené par l'ACTA et ses partenaires (2010-2012) et financé par le « Compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural » du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, FranceAgriMer, le Cniel, Interbev, et Interreg.

Bibliographie

Bojacà, C.R., Schrevens E. (2010). Parameter uncertainty in LCA : stochastic sampling under correlation. *Int. J. Life Cycle Asses.*, 15:238-246.

- Charroin, T., Palazon, R., Madeline, Y., Guillaumin, A., Tchakerian, E. (2005). *Le système d'information des Réseaux d'Élevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité*. Renc. Rech. Ruminants, 12.
- Gac, A., Manneville, V., Raison, C., Charroin, T., Ferrand, M. (2010). *L'empreinte carbone des élevages d'herbivores : présentation de la méthodologie d'évaluation appliquée à des élevages spécialisés lait et viande*. Renc. Rech. Ruminants, 17:335-342.
- Huijbregts, M.A. (1998). *Application of uncertainty and variability in LCA*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 3(5) 273-280.
- Huijbregts, M.A., Gilijamse W., Ragas A.M., Reijnders L. (2003). Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling. *Environ Sci Technol* 37(11) 2600-8.
- Makowski, D., Monod, H. (2011). *Analyse statistique des risques agroenvironnementaux*. France : Springer.
- Payraudeau, S., van der Werf, H.M.G., Vertès, F., 2007. Analysis of the uncertainty associated with the estimation of nitrogenous emissions from a group of farms. *Agricultural Systems*. Volume 94, 2, 416-430.
- Ravalico, J. K., Maier Holger, R., Dandy Graeme, C., Norton, J. P., Croke, B. F. W. (2005). *A comparison of sensitivity analysis techniques for complex models for environment management*. International Congress on Modelling and Simulation : advances and applications for management and decision making (pp.2533-2539), Melbourne, Andre Zerger & Robert M. Argent (eds.).
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M. (2000). *Sensitivity Analysis*. Hester: John Wiley.
- Schaeffler, E. (2010) *Evaluation environnementale selon une approche cycle de vie des exploitations laitières françaises*. Mémoire de fin d'études ENITA Bordeaux 102p.
- Vigne, M., Peyraud, J.L., Lecomte, P. (2011). *Impact du choix des coefficients énergétiques sur les résultats de l'analyse énergétique : Exemple de la consommation énergétique des élevages bovins laitiers réunionnais*. Renc. Rech. Ruminants, 18:167.