

Les Analyses de Cycles de Vie (ACV) : application à des filières agricoles

Caroline Godard, Agro-Transfert Ressources et Territoires
c.godard@agro-transfert-rt.org

29 janvier 2014 – UTC

www.agro-transfert-rt.org

Plan

- 1 - Qu'est-ce qu'une ACV ?
- 2 – La méthode ACV : les grandes lignes et la mise en œuvre pratique à partir de l'exemple de la chaudière Lin 2000 :
 - Définition des objectifs et du cadre de l'étude
 - Inventaire des flux
 - Evaluation des impacts
 - Interprétation

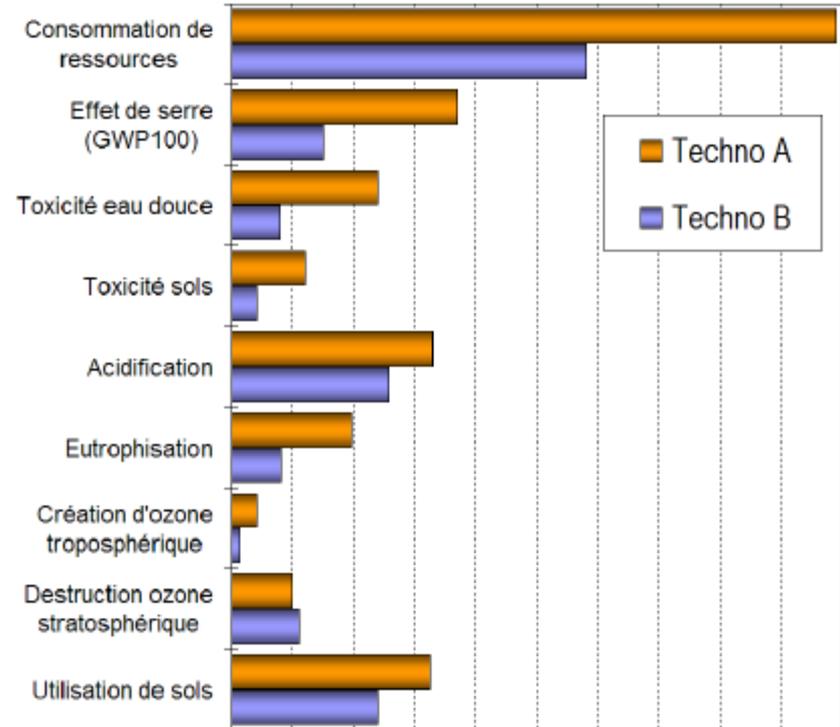
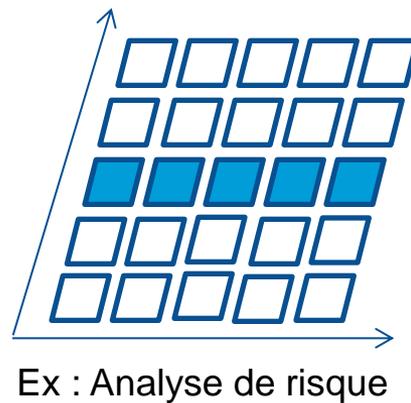
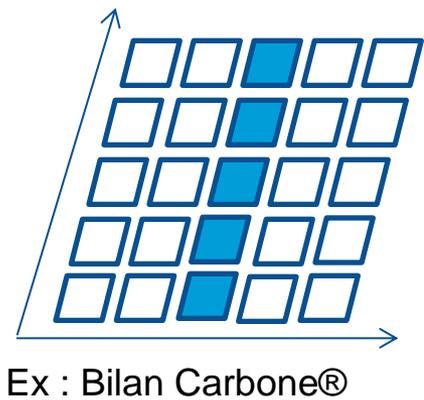
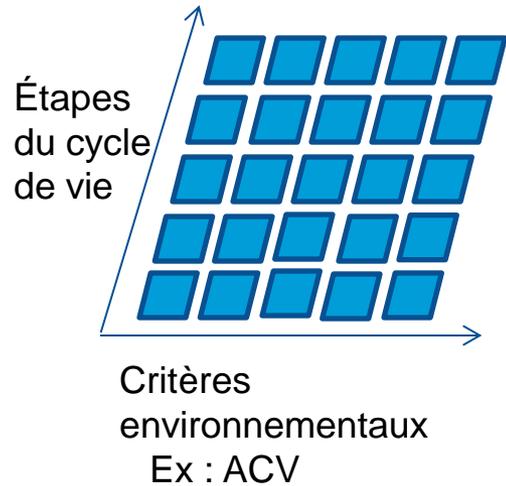
Définition d'une ACV

- « L'ACV est un **outil d'évaluation** des impacts environnementaux sur l'environnement incluant l'ensemble des activités liées à un produit ou à un service **depuis** l'extraction des matières premières **jusqu'au** dépôt et traitement des déchets » (ISO 14040)
- ⇒ Outil d'aide à la décision
- ⇒ Du berceau à la tombe
- ⇒ Flux entrants et sortants (= intrants et extrants)
- ⇒ Impacts environnementaux potentiels i.e. liés à une fonction (du produit, du service ou procédé)

L'ACV, un Outil d'Aide à la Décision pour quoi faire ?

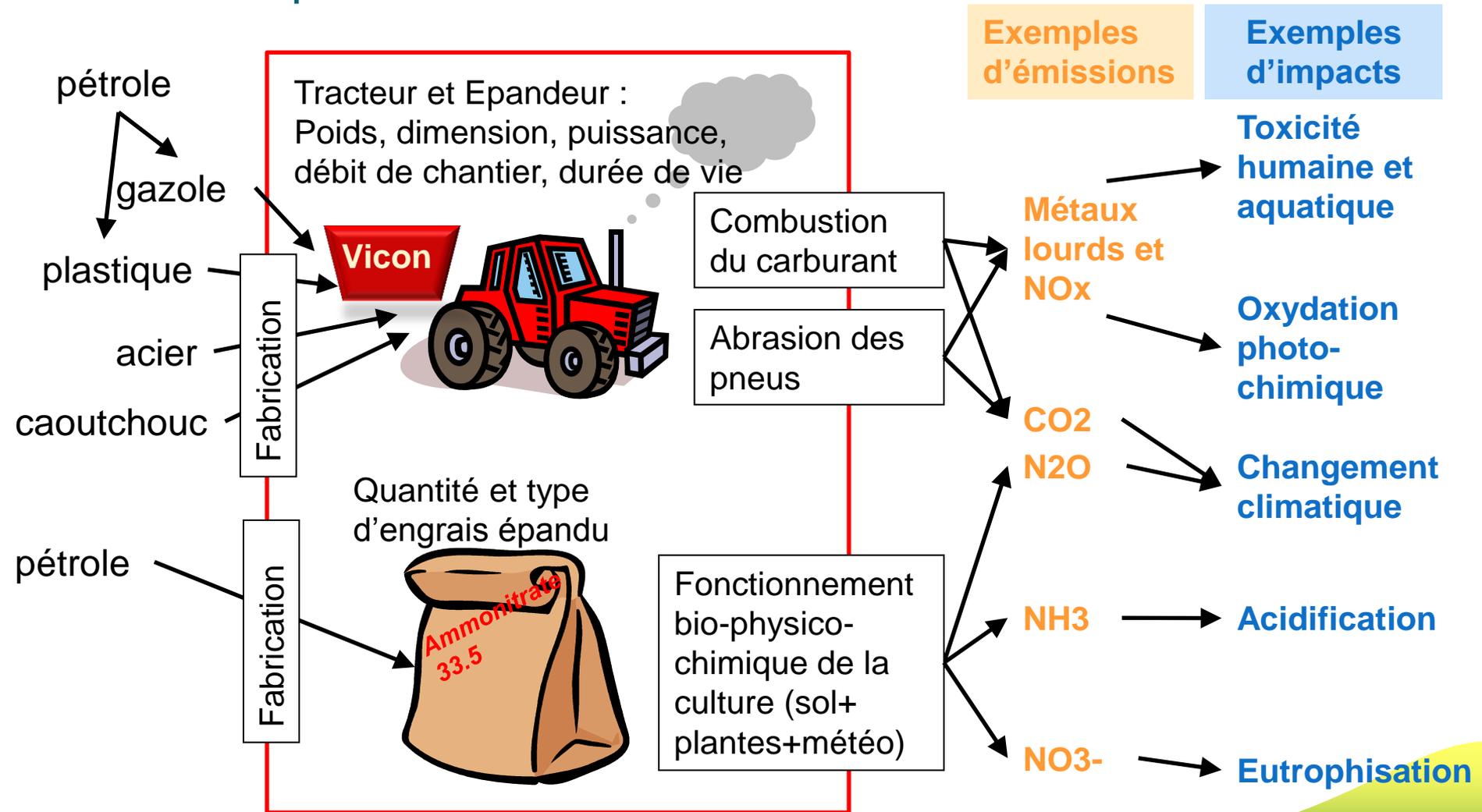
- **Identifier** les principales sources d'impacts environnementaux
- **Arbitrer** les déplacements de pollution liés à des alternatives envisagées
- Dans le but de/d'...
 - **Améliorer** les performances environnementales d'un produit
 - **Informer** les décideurs industriels, organismes gouvernementaux/ non gouvernementaux (planification stratégique, établissement de priorités, conception de produits/procédés)
 - **Choisir** des indicateurs de performance environnementale pertinents
 - **Faire du marketing** (étiquetage écologique, déclaration environnementale, ...)

L'ACV un outil d'évaluation multicritère



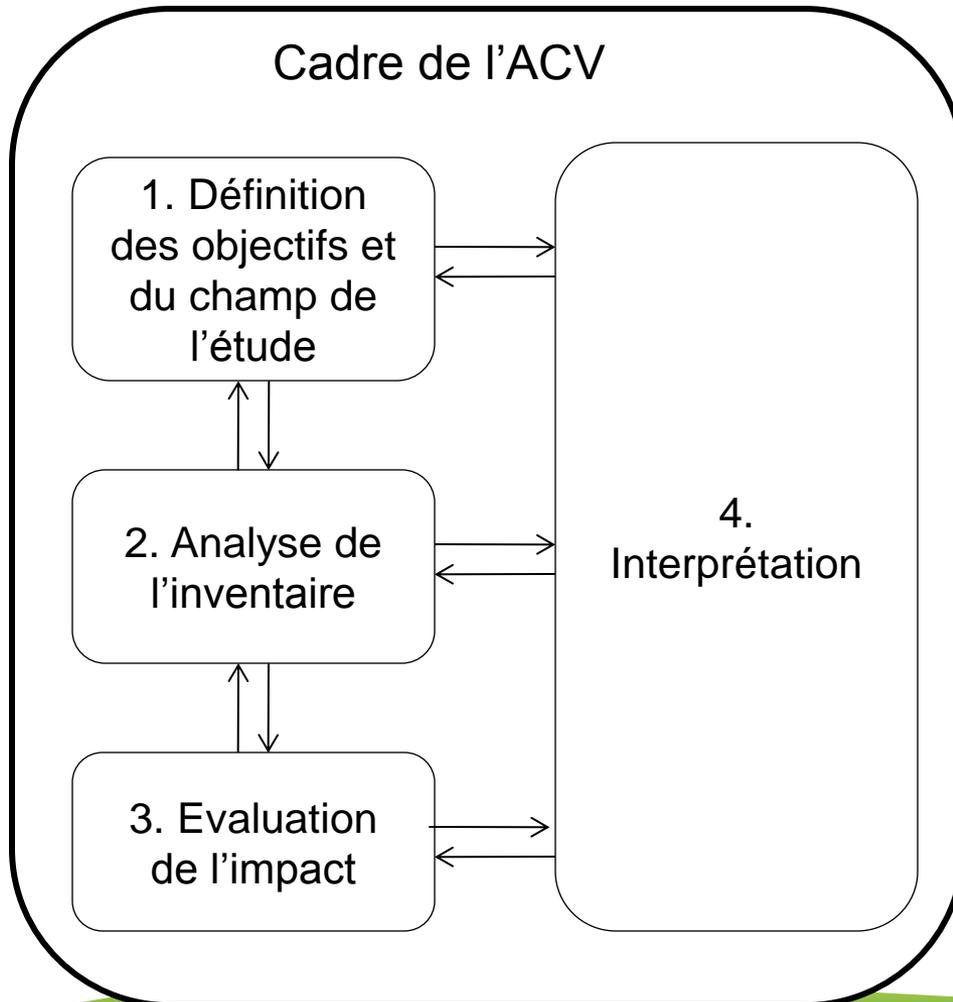
Qu'est-ce que l'on compte dans une ACV ?

exemple de la fertilisation azotée d'une culture



Le cadre général de l'ACV

- ACV : cadre normé (ISO 14040 et ISO 14044, 2006)



ACV = approche itérative

5. Applications :
- Propositions d'améliorations
 - Planification stratégique
 - Politique publique
 - Marketing
 - ...

NB : Les applications ne rentrent pas dans le champ d'application des normes

D'après ISO

L'ACV pour évaluer l'approvisionnement de la chaudière Lin 2000

Caractéristiques de la chaudière :

- Puissance installée de 2.9 MW
- Conso. énergétique de 10 000 MWh en entrée chaudière
- Période de chauffe de 12 mois
- 2 chaînes d'approvisionnement : balles + vrac
- Pas de vitrification des cendres
- Biomasse à 20% humidité maxi, avec une humidité optimale de 15%

Anas de lin = biomasse référence

ACV

Alternatives possibles :

Pailles (lin oléagineux, céréales), cultures dédiées (miscanthus, switchgrass, triticales plante entière)

Pour plus d'information :

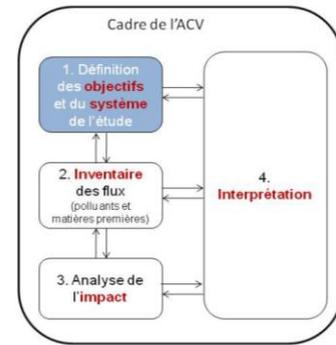
Etude/méthodologie ACV : Godard, C., Boissy, J., Gabrielle, B., 2012. Life-cycle assessment of local feedstock supply scenarios to compare candidate biomass sources. *Global Change Biology Bioenergy*. Volume 5, Issue 1, pages 16–29, January 2013

Projet OPTABIOM (Approvisionnements en biomasse) :

<http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/nos-projets/mobilisation-des-agro-ressources/-optabiom->

Définition des objectifs (1)

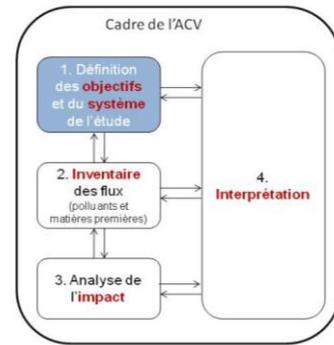
« l'objectif d'une ACV doit indiquer sans ambiguïté l'**application** envisagée, les **raisons** conduisant à réaliser l'étude et le **public concerné**, c-à-d les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude » (ISO 14040)



Cas de l'étude «Approvisionnement Chaudière Lin 2000 »

- **Application envisagée** : Etude comparative des combustibles biomasse alternatifs aux anas de lin (biomasse de référence)
- **Raisons** : Identification des impacts environnementaux des différents approvisionnements possibles pour aider au choix des alternatives, en complément des caractéristiques technico-économiques
- **Public concerné** : Coopérative : directeur, conseil d'administration et coopérateurs
- **Les résultats sont-ils destinés à un « public externe »** ? Si oui : exécutant et réviseur (revue critique) indépendants (Ici : Non)

Définition des objectifs (2)



- Grands types d'objectifs :

- Évaluer une filière de production ⇒ informer sur un produit existant
- Comparer des alternatives de production ⇒ Éco-conception / comparaison avec un standard
- Définir des priorités ⇒ Développement d'un nouveau produit

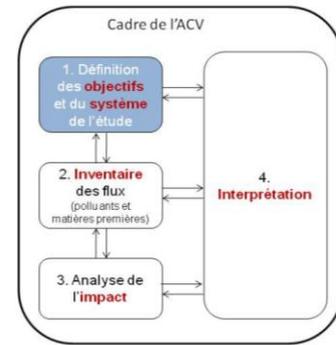
- Les objectifs selon le public :

- Consommateur : ex : impact du produit
- Fabricant : ex : réduire sa pollution, maîtriser ses dépenses énergétiques et d'eau, communiquer
- Gouvernement/ pouvoirs publics : ex : information, scénarios pour établir une réglementation

- Importance de cette étape pour :

- Identifier les acteurs de l'étude
- Cadrer le champ de l'étude (définition du système étudié)
- Identifier quelle question précise on se pose pour y apporter une réponse pertinente

Unité fonctionnelle et flux de référence



- Flux de référence = quantités de produits nécessaires pour satisfaire l'unité fonctionnelle

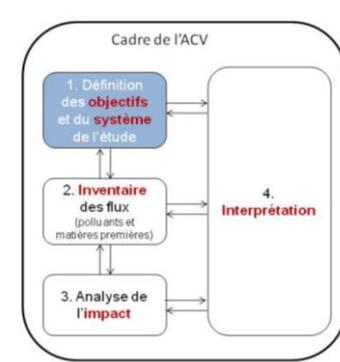
Cas de l'approvisionnement de la chaudière Lin 2000 :

- **UF** : « La fourniture de 10 000 MWh de chaleur à partir de biomasse »
- **Flux de référence** : Quantités de chacune des biomasses envisagées nécessaires à la production de 10 000 MWh

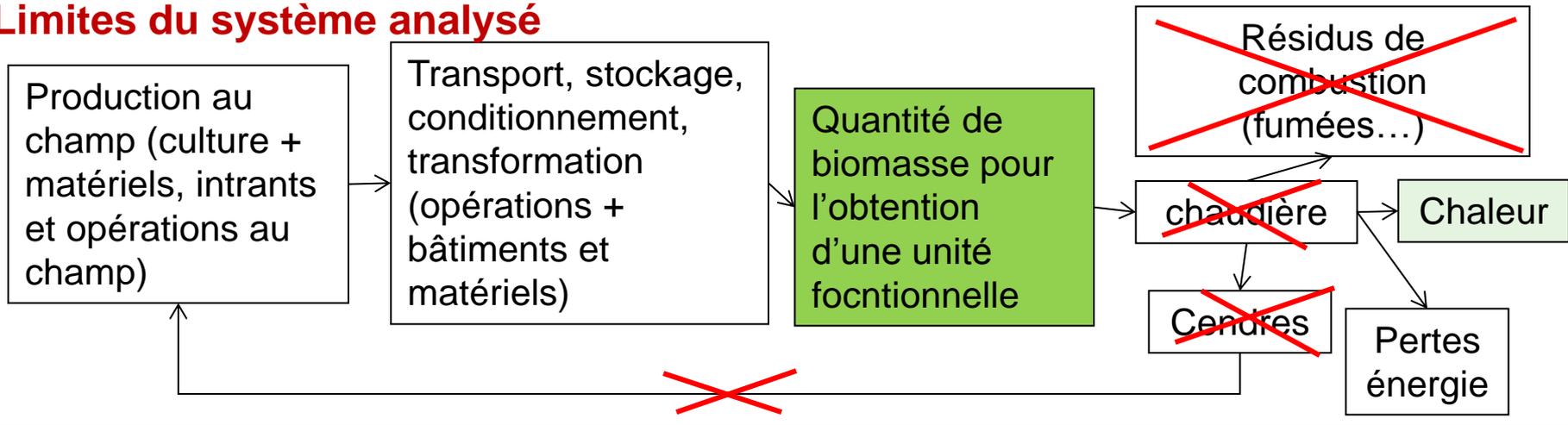
Source de biomasse	Flux de référence correspondant à l'UF (en t/an)
Anas de lin	2400
Paille de céréales	3000
Paille de lin oléagineux	2930
Miscanthus	2730
Triticale plante entière	3000

Equivalents basés sur le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) des sources de biomasse

Définition du champ de l'étude : limites du système pour l'exemple de Lin 2000



Limites du système analysé



Biomasse référence :
anas de lin textile

Biomasses co-produits :

- paille de céréales
- paille de lin oléagineux

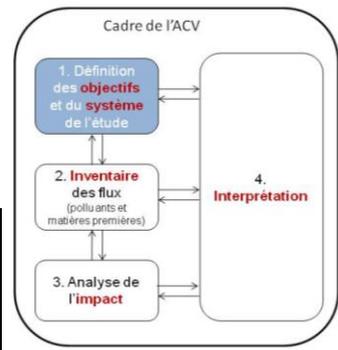
Biomasses cultures dédiées :

- triticale
- miscanthus

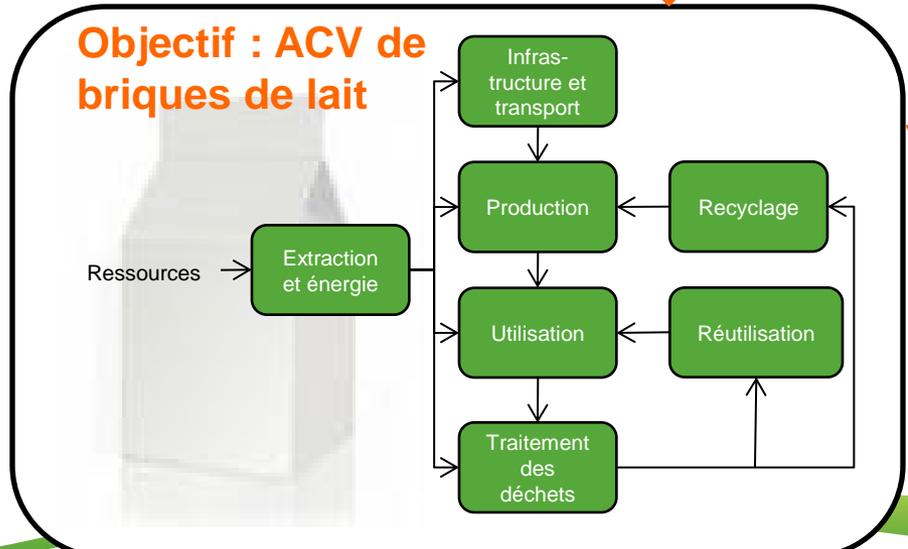
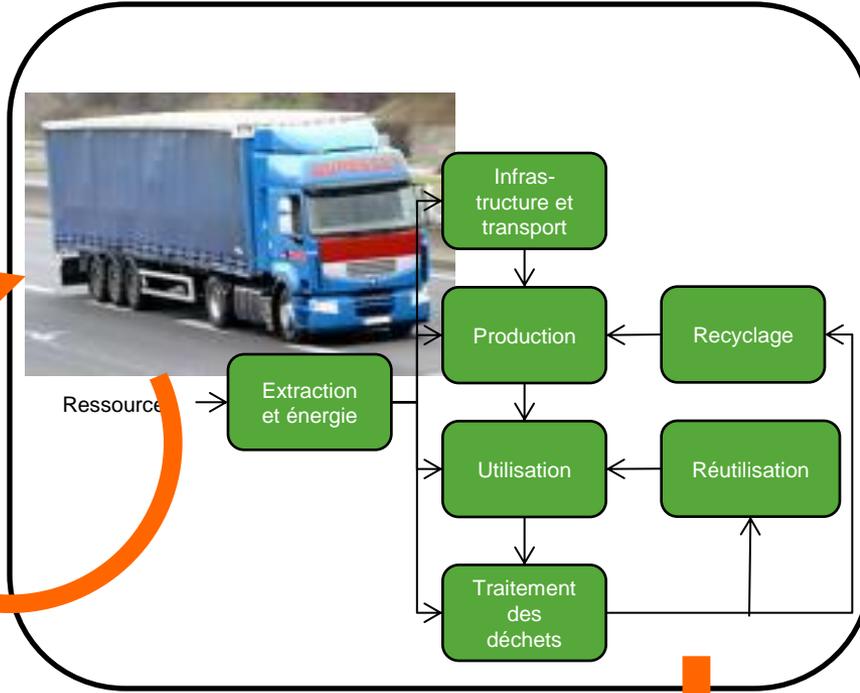
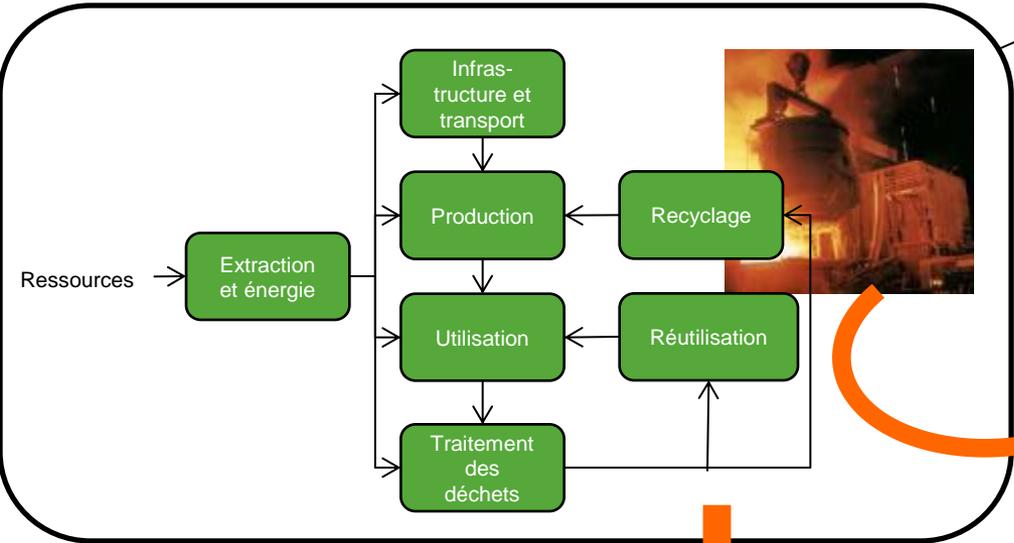
- En théorie : arbre des processus exhaustif
- En pratique : selon données et temps disponible :
 - Limites selon les mêmes réalités fonctionnelles
 - Seuls les processus dont la contribution > x% des émissions, de l'énergie...
 - Exclusion des étapes identiques dans les scénarios

Définition du champ de l'étude

- Frontières ? CV imbriqués ?



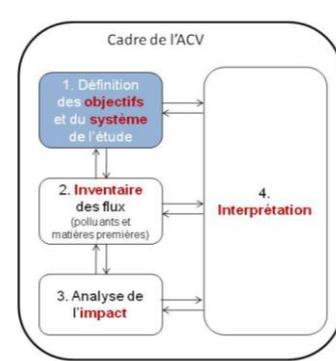
Récursivité : pour produire de l'acier, il faut une aciérie partiellement constituée d'acier, etc...



Infrastructures routières?

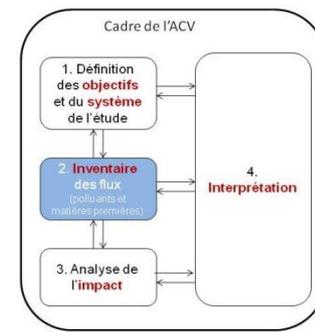
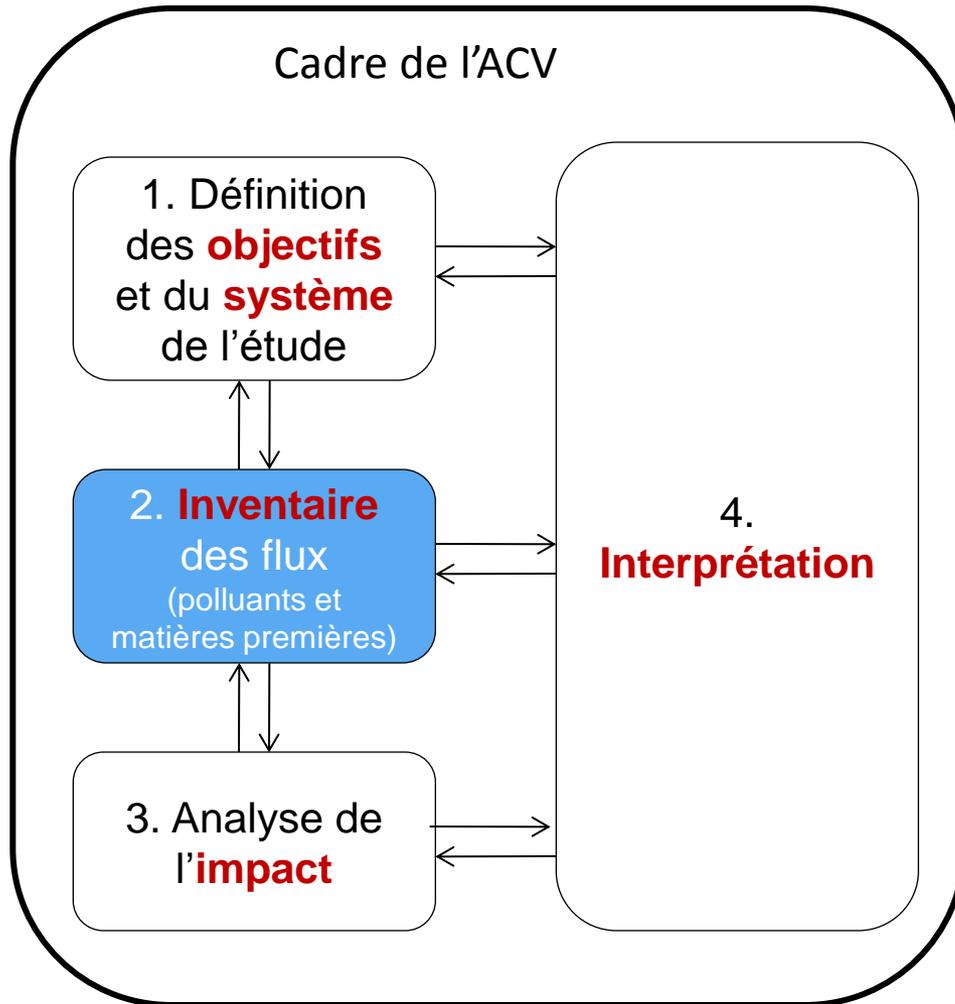


Définition du champ de l'étude

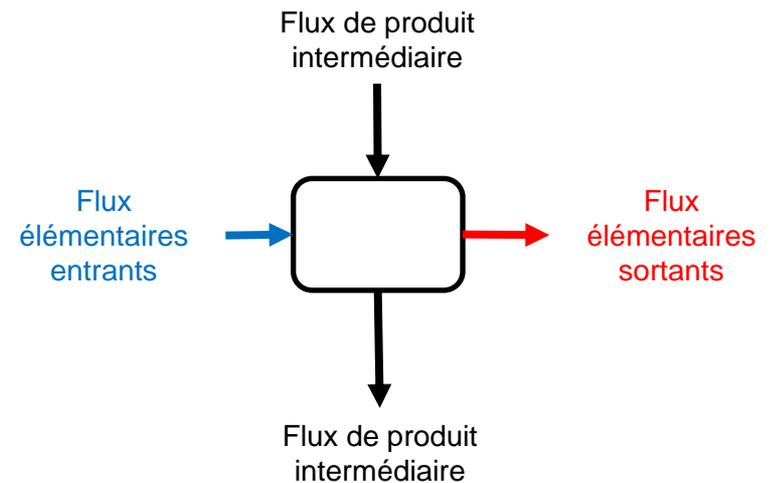


- Frontières/ imbrication des cycles de vie :
 - **1^{er} ordre** : seuls la fabrication des matériaux et les transports sont inclus (de moins en moins utilisé en ACV)
 - **2nd ordre** : tous les processus du cycle de vie sont inclus, mais pas les biens d'équipements (infrastructure, etc...)
 - **3^{ème} ordre** : Les biens d'équipement sont pris en compte (la part d'infrastructure est incluse dans l'analyse). Généralement, ils ne sont modélisés qu'au premier ordre, c-à-d que seuls la fabrication et les matériaux nécessaires pour les produire sont pris en compte

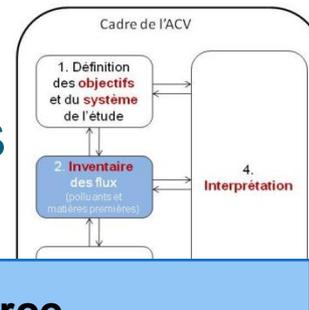
Inventaire des flux



Description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants pour tous les processus élémentaires

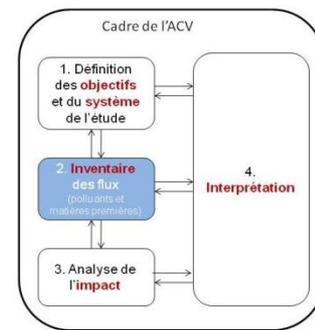


Inventaire des flux (1) : méthodes utilisées dans l'ACV Lin 2000 pour évaluer les flux au champ



	Méthode	Source
Emissions azotées (NO₃⁻, N₂O, NH₃, NO_x)	Coefficients d'émissions + Bilan N	BioIS-ADEME, 2010 et BioFit, 2000, Laville et al., 2005
Emissions de phosphore	Coefficients d'émissions + USLE	EcolInvent (Nemecek, 2007), Wischmeier et Smith, 1960, 1978 pour l'érosion
Emissions liées à la combustion des carburants et à l'abrasion des pneus	Coefficients d'émissions	Gest'im (2010) EcolInvent (Nemecek, 2007),
Flux de pesticides	Modèles Pest-LCI et Uses-LCA	Birkved, 2006, Van Zelm et al., 2009
Stockage de carbone	Modèle AMG	Saffih-Hdadi et Mary, 2008
Fabrication des semences	Modélisation d'une culture « semence » ou de rhizomes	EcolInvent (Nemecek, 2007), et AGT R-T
Fabrications diverses (machines, engrais et produits phyto)	Procédés génériques	EcolInvent (Nemecek, 2007)

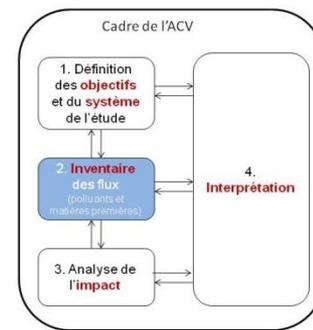
Inventaire des flux (2) : méthodes utilisées dans l'ACV Lin 2000 pour évaluer les flux de la récolte à la coopérative



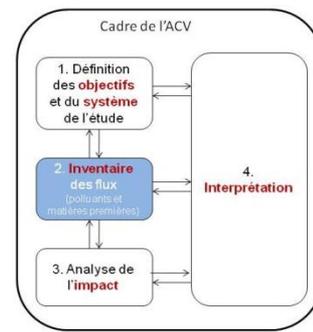
	Méthode	Source
Emissions liées à la combustion des carburants et à l'abrasion des pneus	Coefficients d'émissions	Gest'im (2010) EcolInvent (Nemecek, 2007), OPTABIOM
Construction (bâtiments de stockage et de la coopérative)	Adaptation de procédés génériques	EcolInvent (Nemecek, 2007)
Machines de transformation du lin	Modélisation simplifiée (masse, matériaux métalliques)	EcolInvent (Nemecek, 2007)
Fonctionnement : consommations électriques	Données Coop Lin 2000 modélisées par « électricité, mix français »	EcolInvent (Nemecek, 2007)

Inventaire des flux (3)

- Importance des données : fiables, décrites et mises à jour
- Prise en compte des déchets et co-produits :
 - Déchets à éliminer \Rightarrow traitement dans le système
 - Déchets recyclés en boucle fermée \Rightarrow réduction des matières premières
ex : pailles enfouies \Rightarrow \downarrow fertilisants minéraux
 - Co-produits, déchets recyclés en boucle ouverte \Rightarrow plusieurs méthodes d'allocation des émissions
*ex : allocation massique grain/paille
allocation totalité des émissions au grain et non à la paille
(car production obligatoire de grain pour avoir de la paille)*

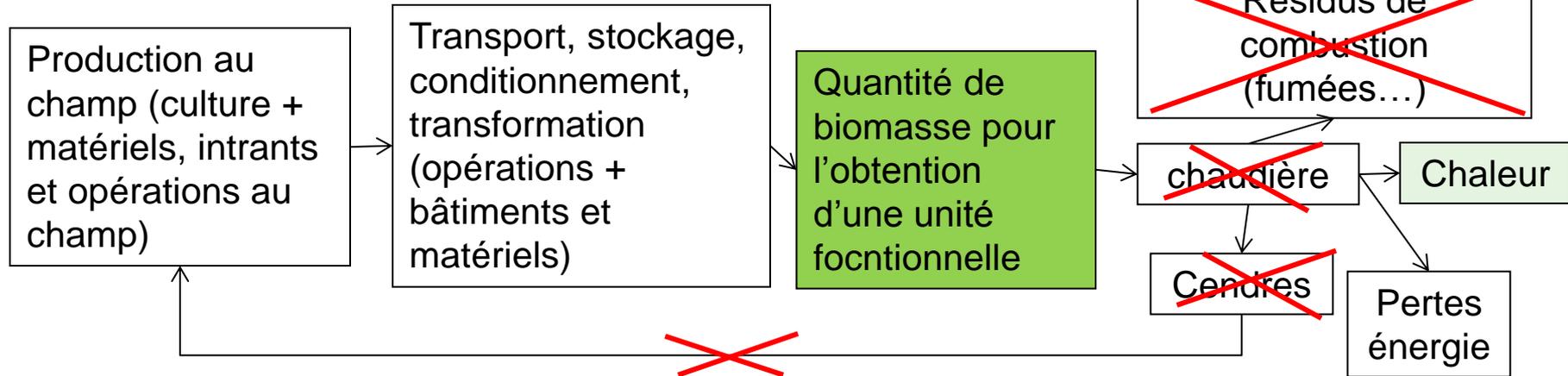


Déchets et co-produits(1)



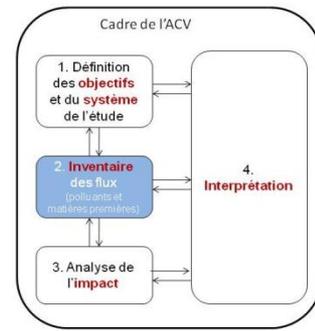
- Elargissement du système
- Allocation d'un bonus/malus par rapport à un produit de substitution

Limites du système analysé



- Pour éviter d'allouer des impacts aux cendres : on les inclut dans le système
- Si on considère l'épandage des cendres comme un amendement pour les cultures : produit de substitution = engrais synthétiques dont l'apport est évité

Déchets et co-produits (2)



- Allocation physique

- Variation marginale (si variation possible des proportions)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Émission totale} = \text{émission 1 produit} + \text{émission 1 co-produit} \\ \text{Émission totale} = \text{émission 1.2 produit} + \text{émission 0.8 co-produit} \end{array} \right. \Rightarrow$$

2 équations et 2 inconnues

- Causalité physique (masse, volume, énergie...)

476 kg
bioéthanol
 \Rightarrow 74 % des
émissions



1 tonne de blé



166 kg de
drêches
 \Rightarrow 26 % des
émissions

- Allocation financière ou économique

0.20 €/kg X
8000 kg/ha
= 1600 €/ha
 \Rightarrow 86 % des
émissions

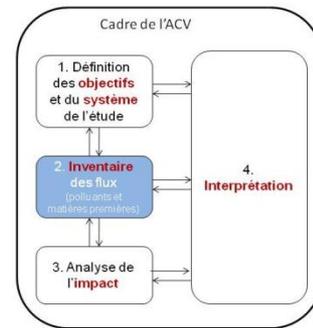


1 ha de blé



0.06 €/kg X
4000 kg/ha
= 240 €/ha
 \Rightarrow 14 % des
émissions

Déchets et co-produits (3) : exemple de Lin 2000

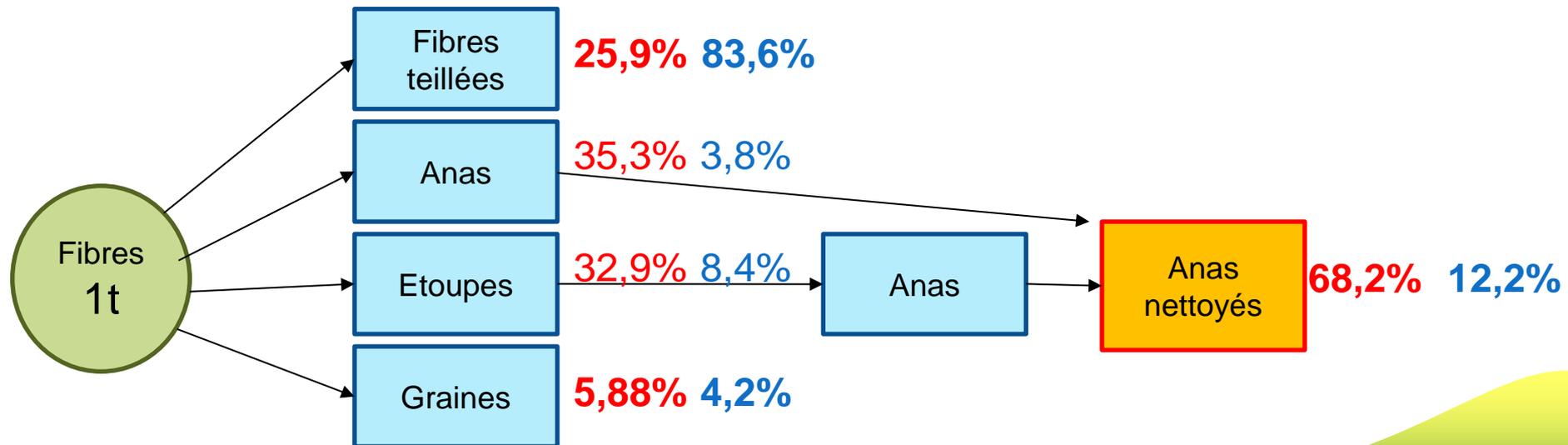


- Allocation inévitable pour les anas de lin :
 - Quelle allocation ?
 - Cohérence globale dans toute l'analyse (pailles de céréales & lin oléagineux)

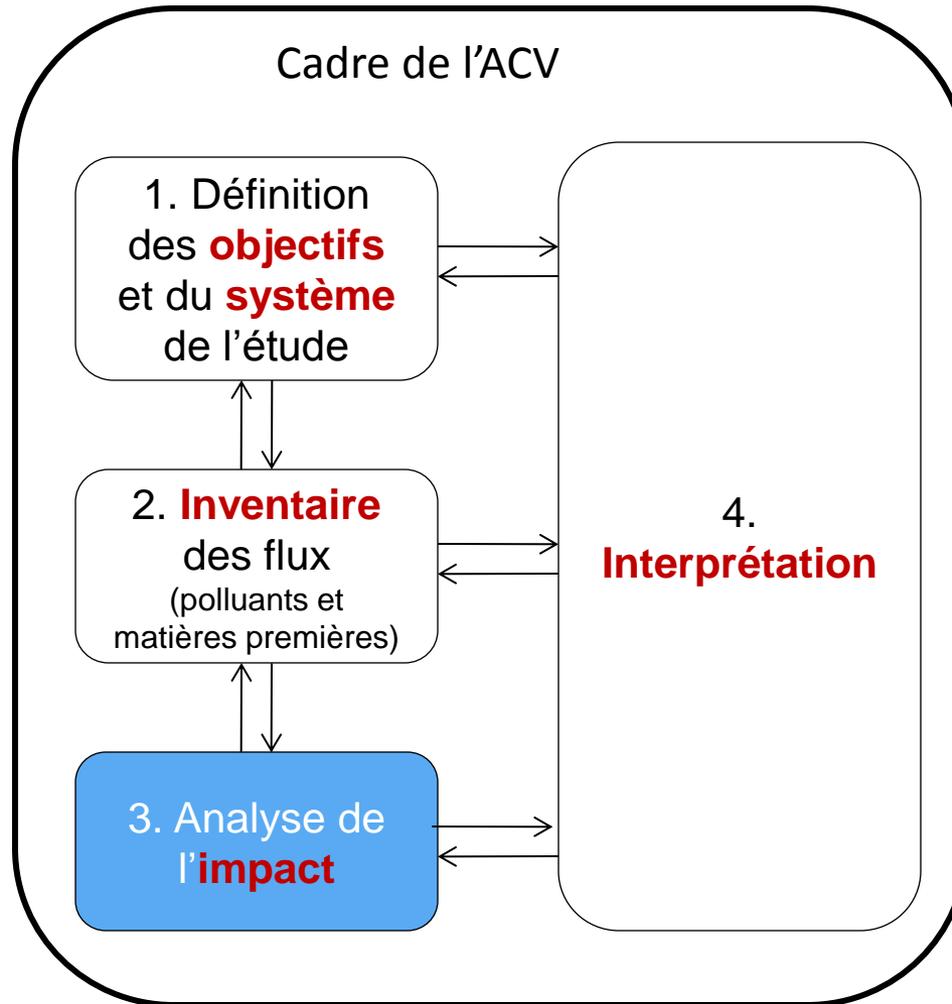
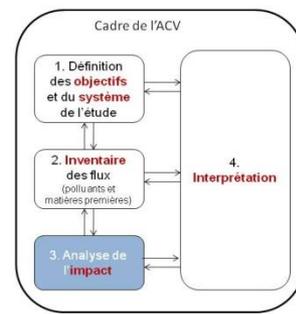
Exemple des anas de lin:

Allocation massique

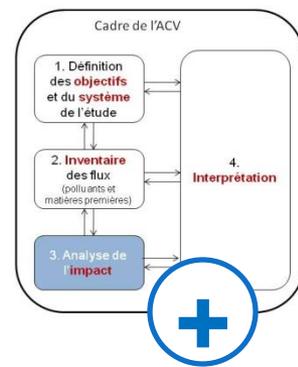
Allocation économique



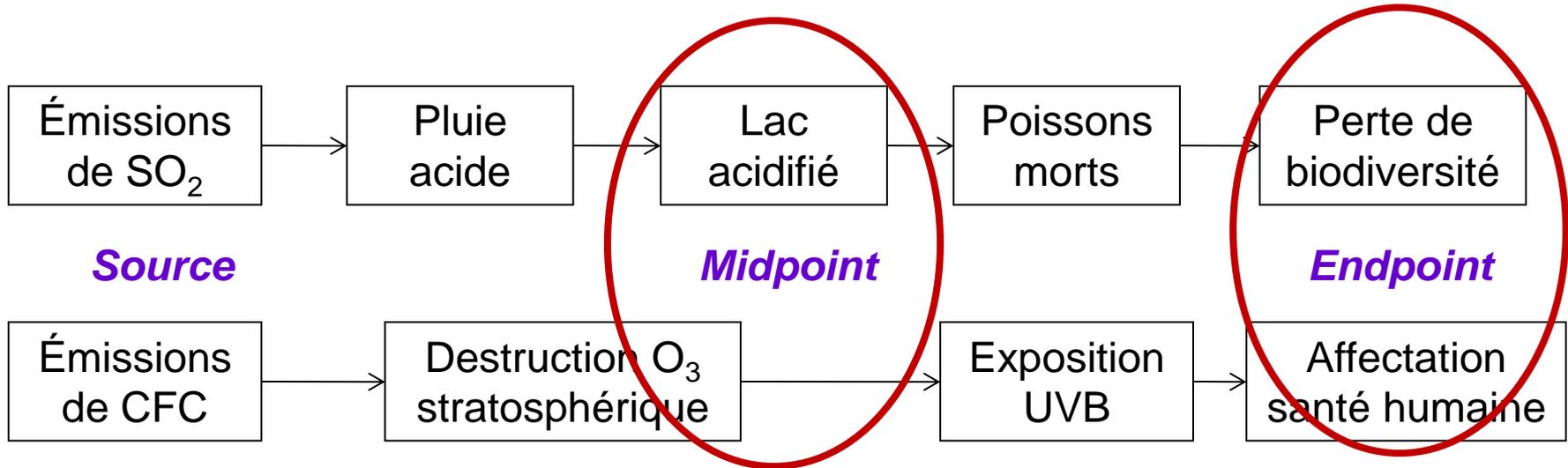
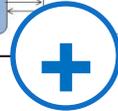
Analyse de l'impact



Impacts et dommages (1)



Communication des résultats



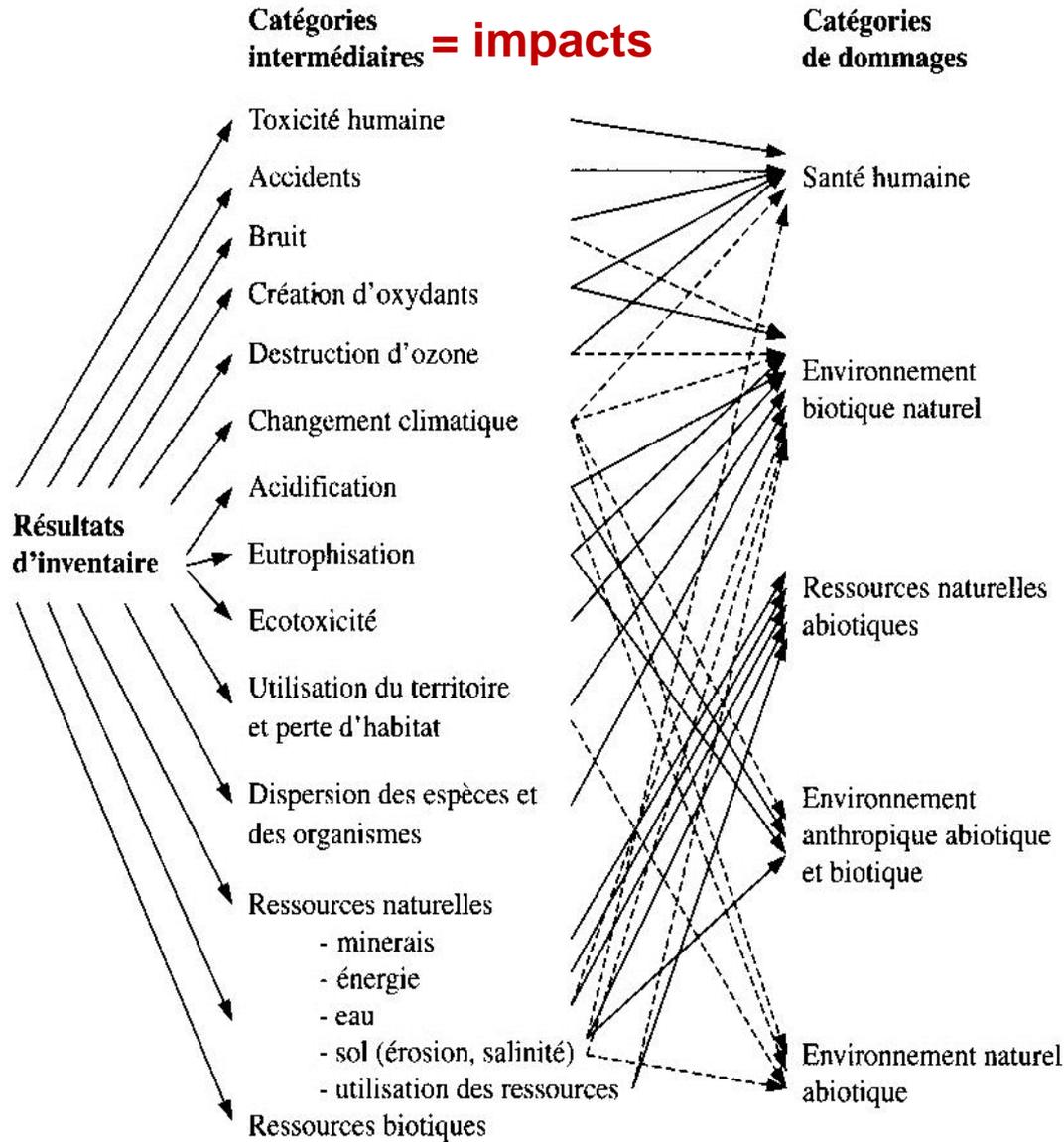
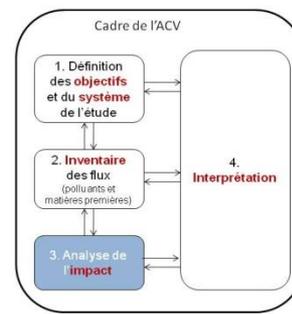
Incertitude de la prévision des impacts

↑
**Impacts
ou effets**

↑
Dommages



Impacts et dommages (2)



En pointillé : les informations entre catégories d'impacts et de dommages particulièrement incertaines

Source : Joliet et al. *Analyse du Cycle de Vie*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2005

Les impacts sélectionnés pour l'étude Lin 2000

- Epuisement des ressources naturelles



- Acidification



- Eutrophisation



- Changement climatique



- Diminution de la couche d'ozone



- Ecotoxicité terrestre



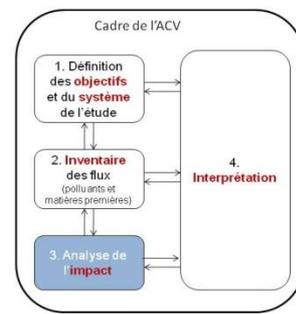
- Oxydation photochimique
« Smog »



- Consommation d'énergie



Exemple simple de l'impact « changement climatique »

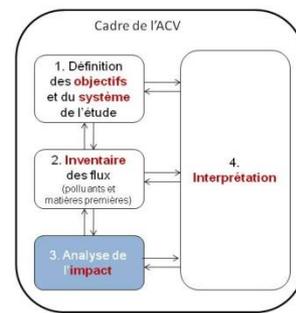


- **Catégorie d'impact** : « changement climatique »
- **Indicateur de catégorie** : forçage radiatif infrarouge en W/m^2
- **Sélection du modèle de caractérisation** : PRG à 100 ans (définition de 2007 du GIEC pour chaque GES)
- **Attribution des résultats de l'inventaire de CV aux catégories d'impacts sélectionnées (= classification)** : sélection de tous les flux identifiés comme contribuant à l'intensification de l'effet de serre (principalement : CO_2 , CH_4 et N_2O)
- **Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (= caractérisation)** : Utilisation des PRG pour calculer les bilans GES exprimés en équivalents CO_2 et ramenés à l'Unité Fonctionnelle

Impacts sélectionnés pour l'étude Lin 2000 : les unités

Catégorie d'impact	Phénomènes biophysiques en jeu	Unité
Epuisement des ressources naturelles abiotiques	Consommation de ressources naturelles non renouvelables (pétrole, charbon, phosphore, etc...)	kg éq Sb
Changement climatique	Effet de serre à 100 ans (PRG à 100 ans) des GES CO ₂ , CH ₄ et N ₂ O	kg éq CO ₂
Acidification atmosphérique	Potentiel d'acidification des gaz NH ₃ , SO ₂ et des Nox ⇒ pluies ⇒ retombées et perturbation des milieux naturels	kg éq SO ₂
Eutrophisation	Potentiel d'eutrophisation des substances nutritives azotées et phosphatées et des oligo-éléments ⇒ dégradation/ asphyxie progressive des milieux aquatiques	kg éq PO ₄ ³⁻
Oxydation photochimique	Potentiel de formation de l'ozone troposphérique des COV, NO _x , CO, ... ⇒ danger santé humaine et dégradation photosynthèse	kg éq C ₂ H ₄
Ecotoxicité terrestre	Potentiel de toxicité pour les organismes vivants de molécules	kg éq 1,4-DCB
Diminution de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de l'ozone stratosphérique	kg éq CFC11
Demande en énergie	Demande en énergie renouvelable et non renouvelable	MJ

Choix de la méthode de caractérisation pour l'étude Lin 2000

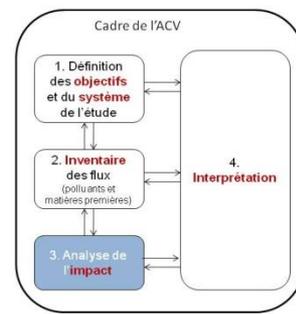


- Epuisement des ressources naturelles abiotiques
- Changement climatique
- Acidification atmosphérique
- Eutrophisation
- Oxydation photochimique
- Ecotoxicité terrestre
- Impact sur la couche d'ozone

Méthode CML

- + demande en énergie
- + modifications des facteurs de caractérisation pour les molécules de pesticides : « changement climatique » (modèle USES-LCA)

Point pratique sur la mise en œuvre : les logiciels ACV



- Des logiciels « généralistes » : Recherche et R&D



- Un logiciel issu de la chimie pour des inventaires et des analyses de flux

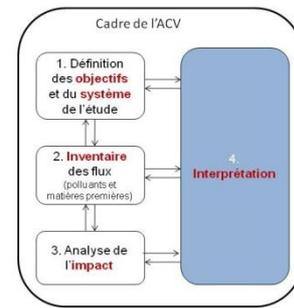
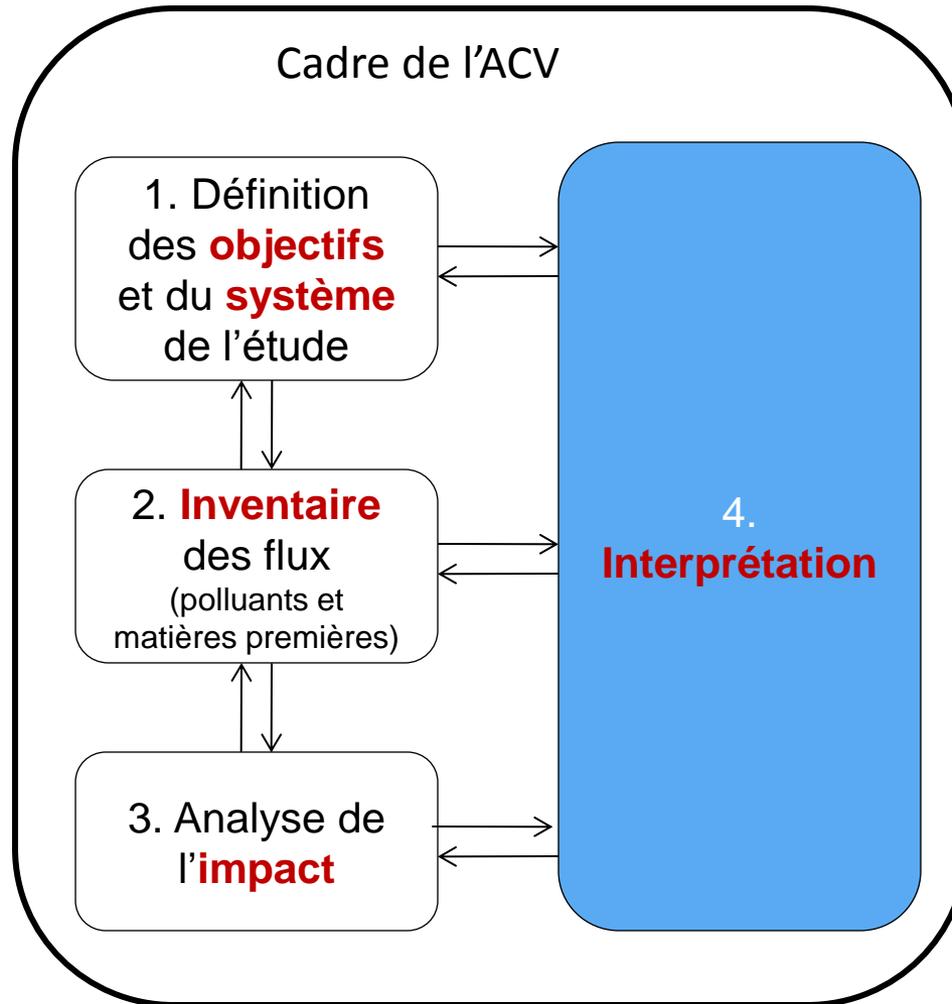
umberto® 5

- Des logiciels plus adaptés à un « métier », un domaine, par exemple :

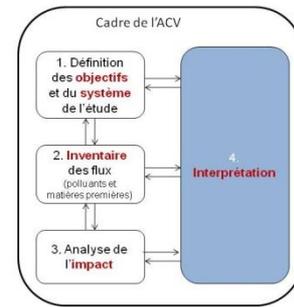


- ...Et d'autres développés « à façon » ou en interne pour les besoins des entreprises

Interprétation du cycle de vie

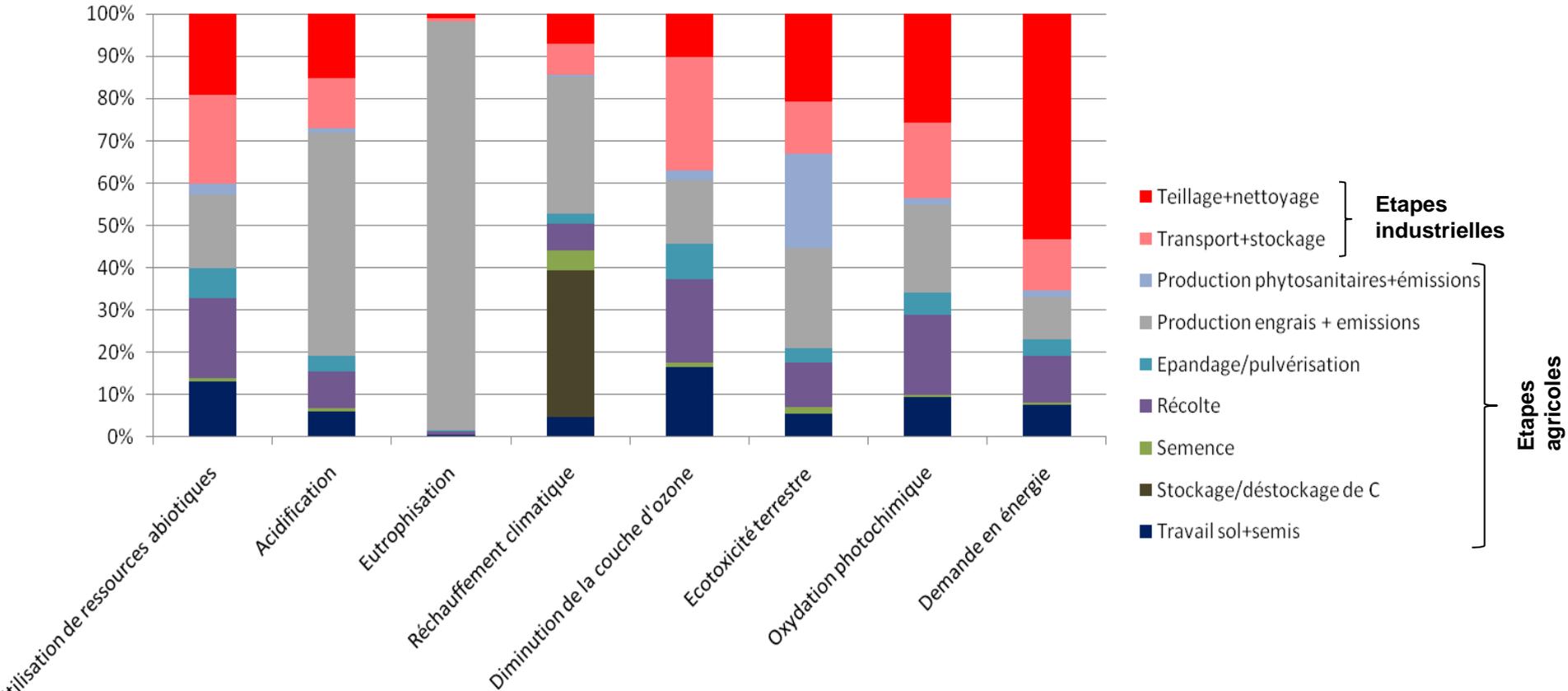
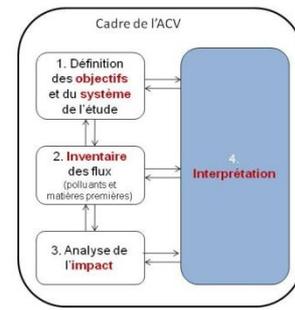


Interprétation du cycle de vie



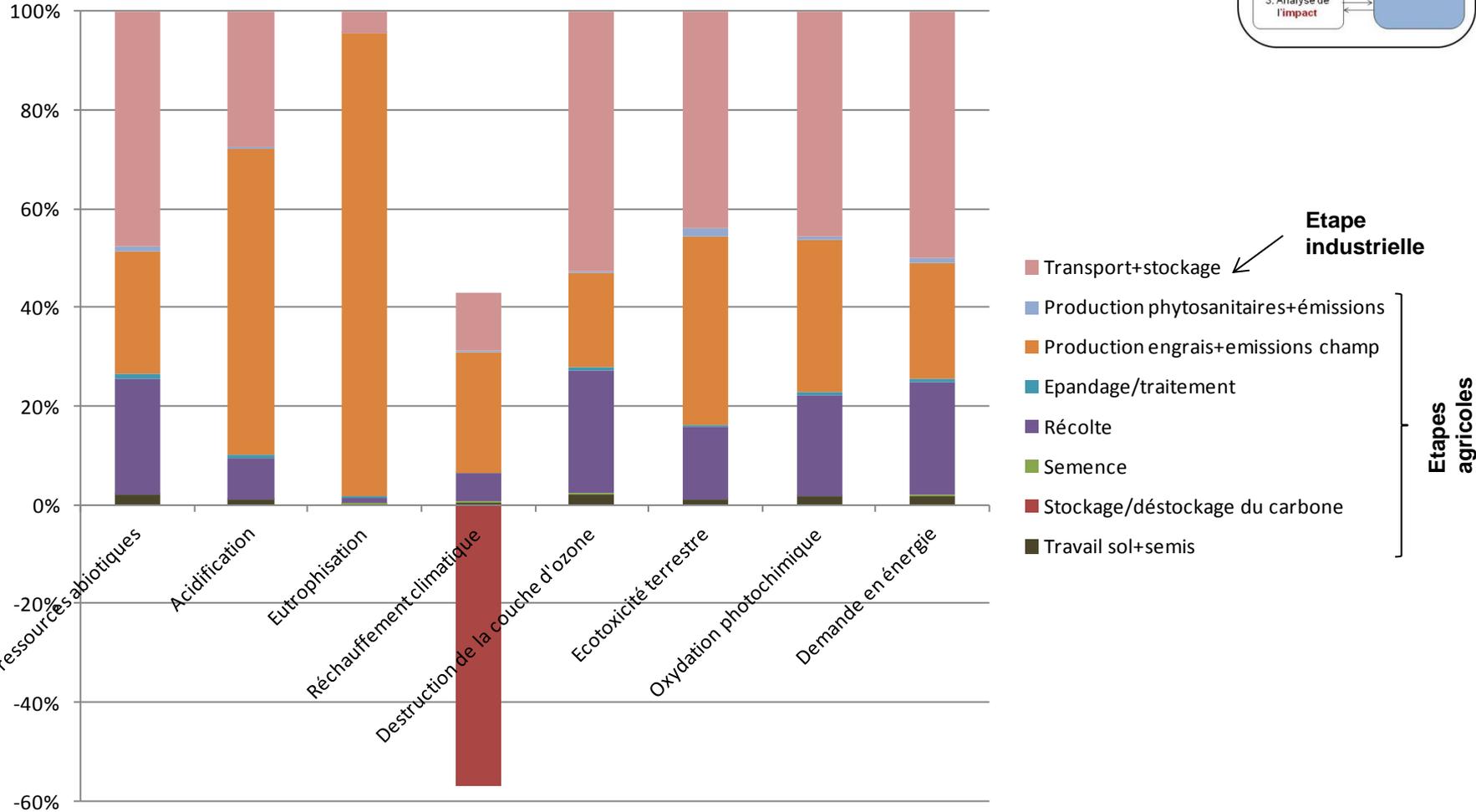
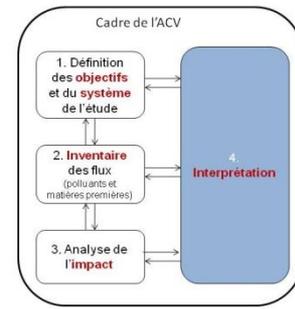
- Confrontation des résultats à la question de départ :
 - Identification des points clés parmi les étapes du cycle de vie : pour la biomasse de référence (anas de lin) et pour les autres sources
 - Comparaison des biomasses alternatives aux anas de lin :
 - Impacts potentiels
 - Rendements énergétiques
 - Analyse de sensibilité : hypothèse d'allocation économique vs allocation massique ?
- Limites, recommandations et conclusions de l'étude

Analyse des anas de lin : contribution des étapes du cycle de vie



- Importance de la phase agricole notamment de la fertilisation et déstockage de C
- Impact du transport non négligeable
- Teillage principale étape de consommation d'énergie

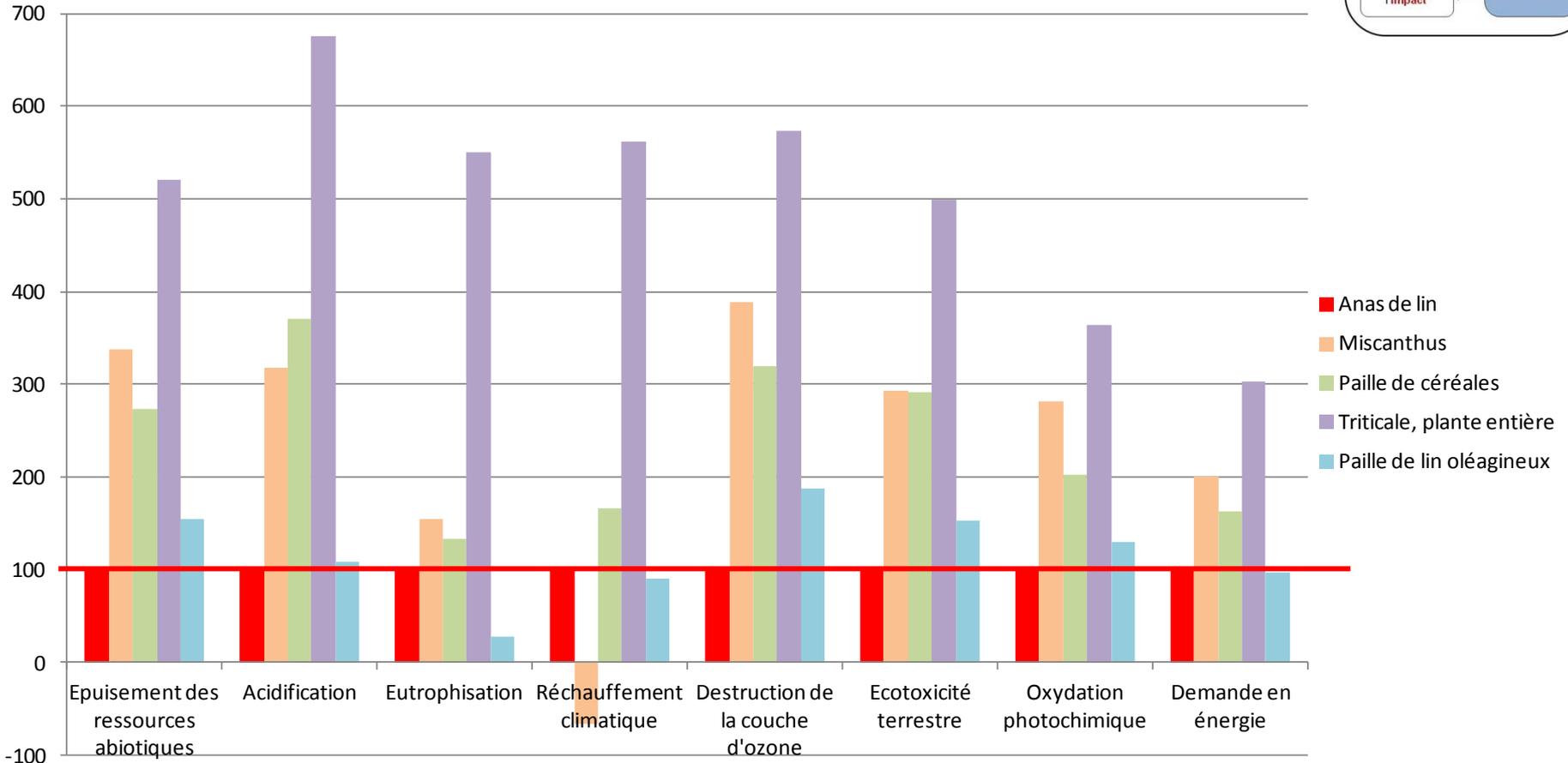
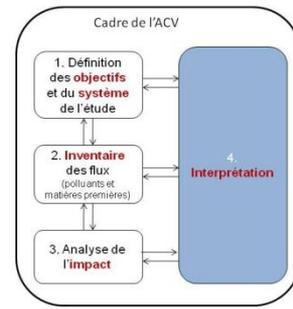
Analyse du miscanthus : contribution des étapes du cycle de vie



→ Importance du transport et du stockage, devant la phase agricole, mises à part l'eutrophisation et l'acidification

→ Impact de la fertilisation et du stockage de C

Comparaison des sources de biomasses (référence anas de lin base 100)

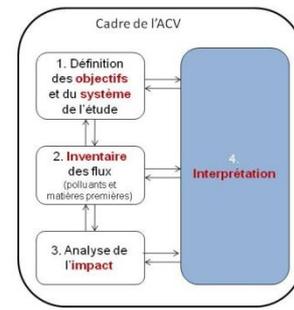


→ Anas de lin = approvisionnement le plus intéressant sur l'ensemble des impacts, suivi de la paille de lin oléagineux

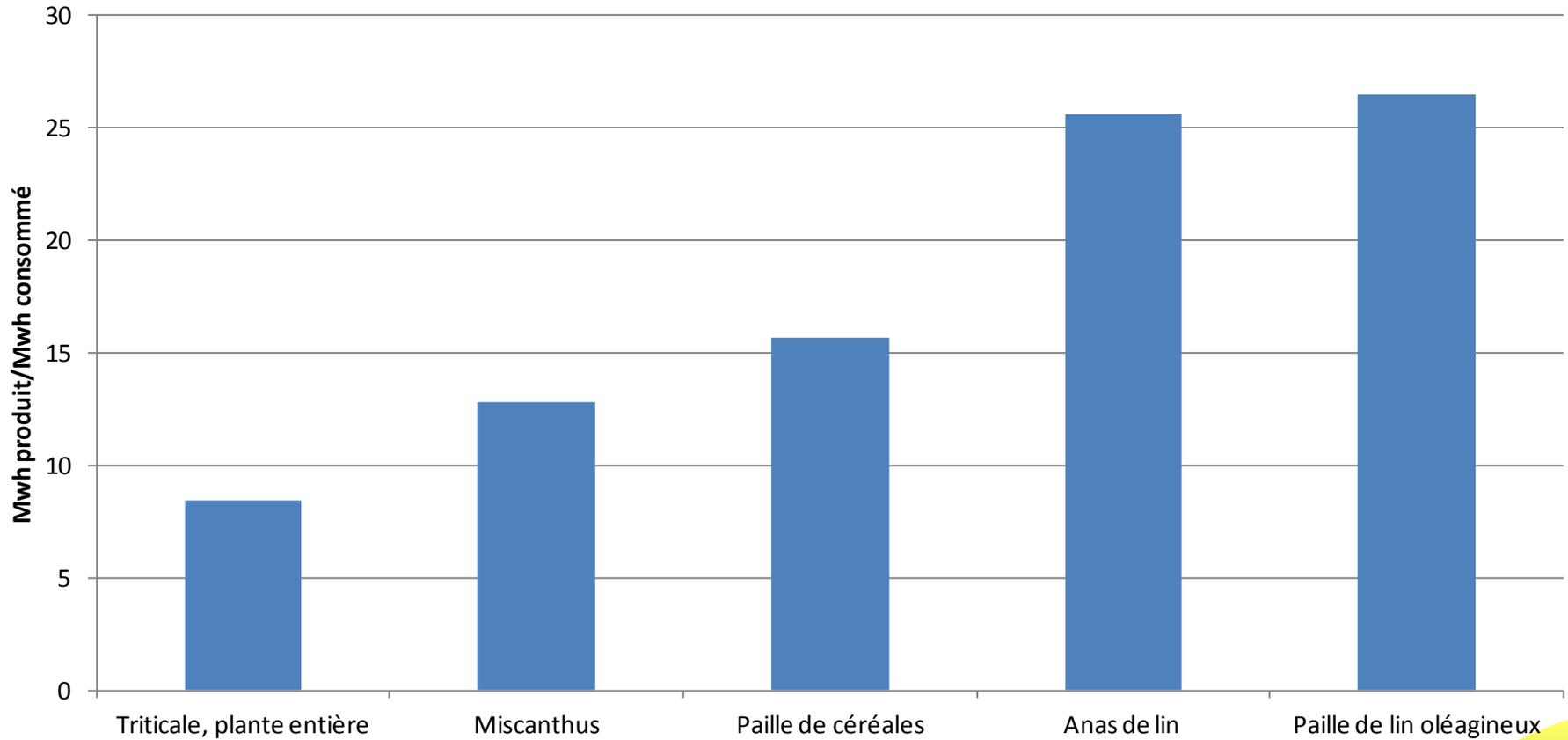
→ Triticale systématiquement le plus impactant

→ Réchauffement climatique : miscanthus le plus intéressant

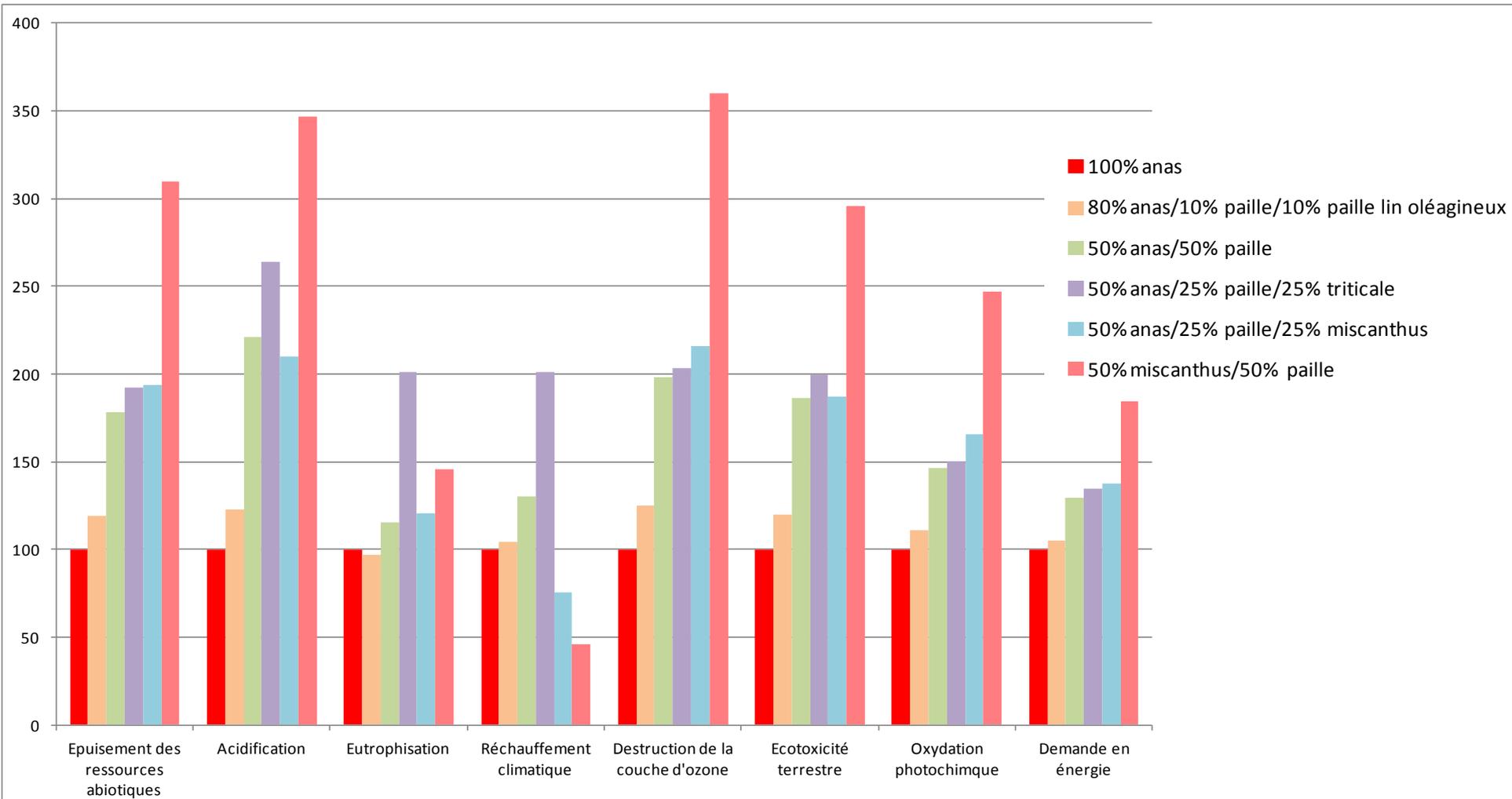
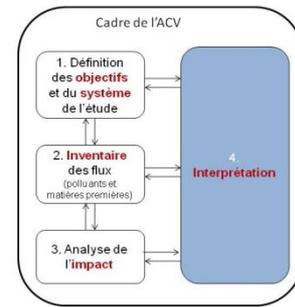
Comparaison des rendements énergétiques des sources de biomasses

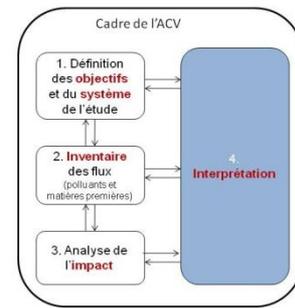


Rendement (Mwh produit/Mwh consommé)



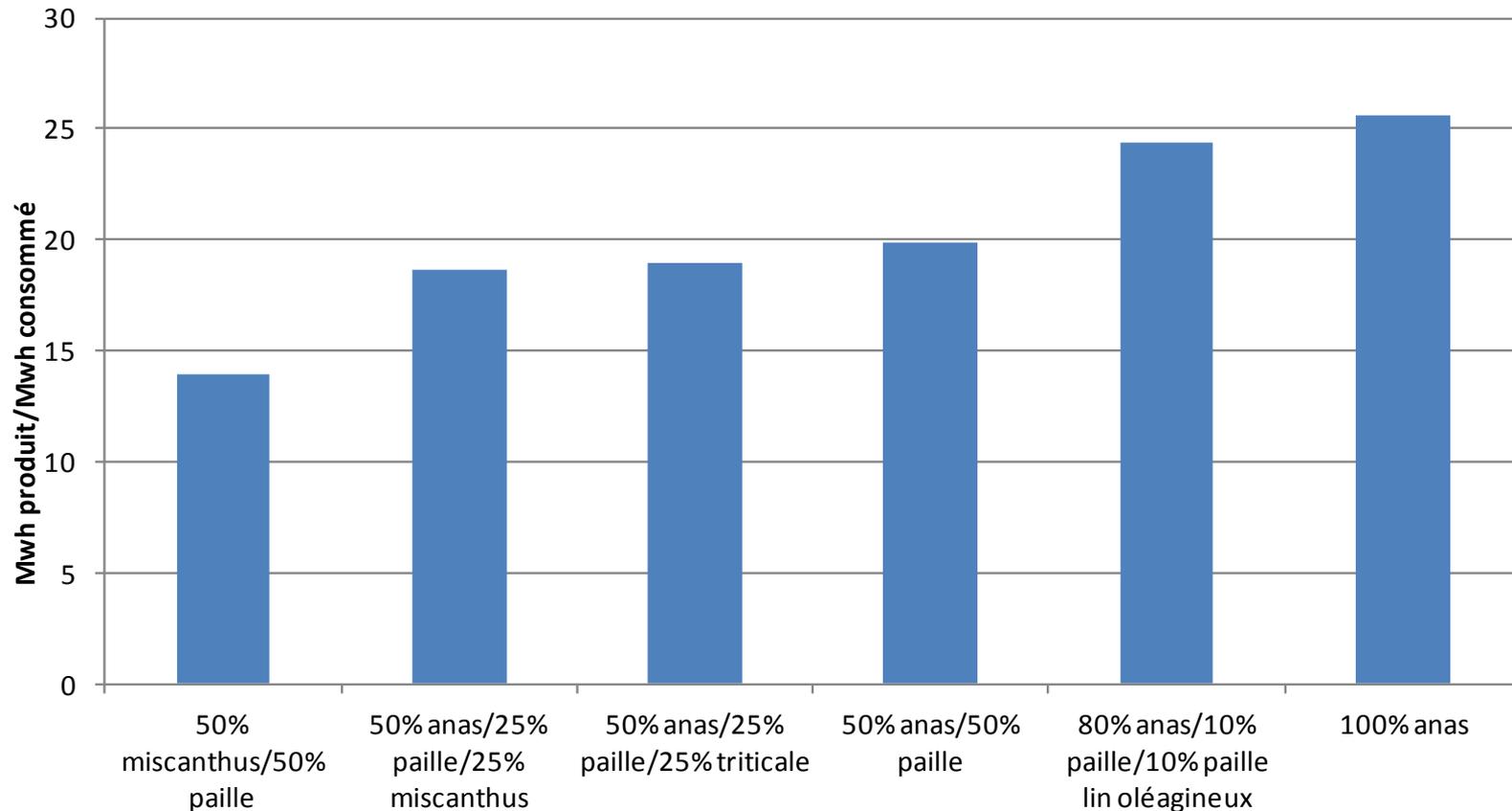
Comparaison des scénarios d'approvisionnement élaborés avec la coopérative





Comparaison des rendements énergétiques des scénarios d'approvisionnement

Rendement (Mwh produit/Mwh consommé)

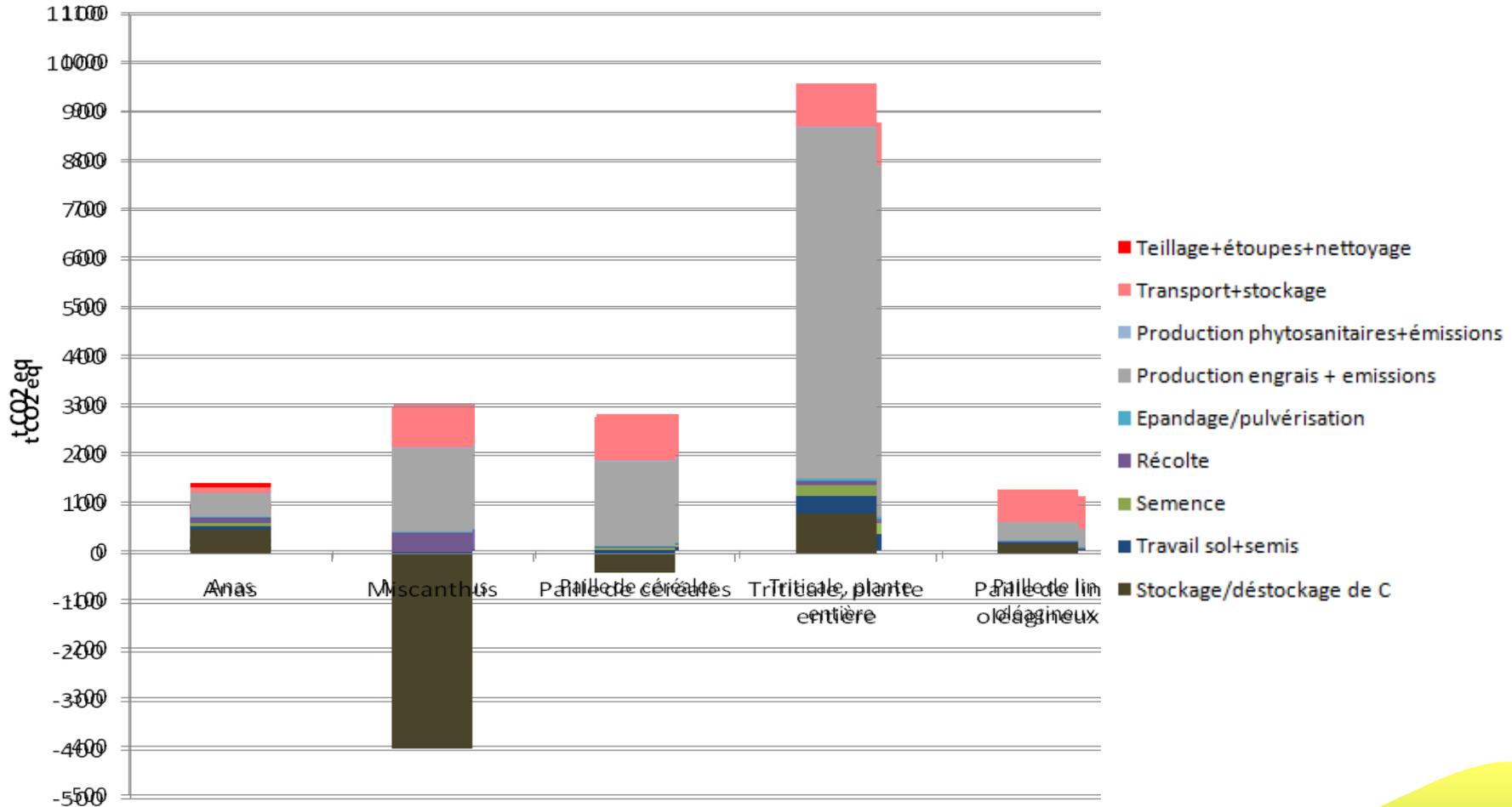


Conclusion partielle de l'étude de l'approvisionnement de la chaudière Lin 2000

- Les anas de lin = source de biomasse peu impactante
- Paille de lin oléagineux ~ équivalente, devant paille de céréales et miscanthus qui sont similaires, puis triticales (Idem pour rdt énergétique)
- Si changement climatique prépondérant : miscanthus = plus intéressant
- Points clés :
 - Production au champ : fertilisation azotée à ajuster au mieux et réduire si possible
 - Coopérative :
 - Logistique : réduction des transports par tracteur
 - Energie : amélioration des chaînes de teillage et des étoupes
- **MAIS plusieurs hypothèses** : prise en compte du stockage de carbone dans les sols agricoles, allocation économique, ...

Comparaison des sources de biomasse : Prise en compte de la séquestration du carbone

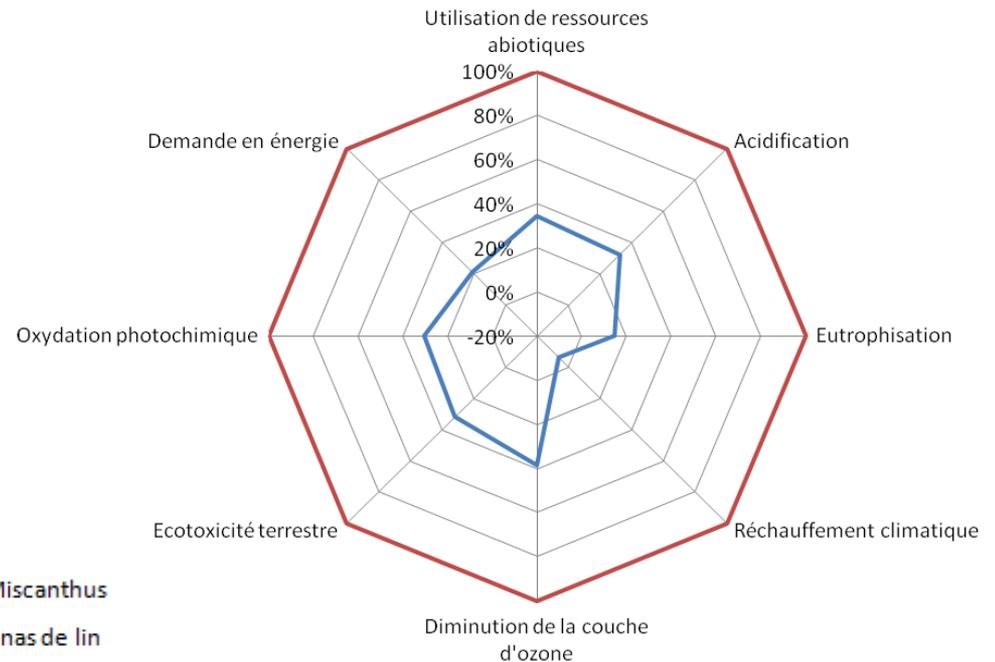
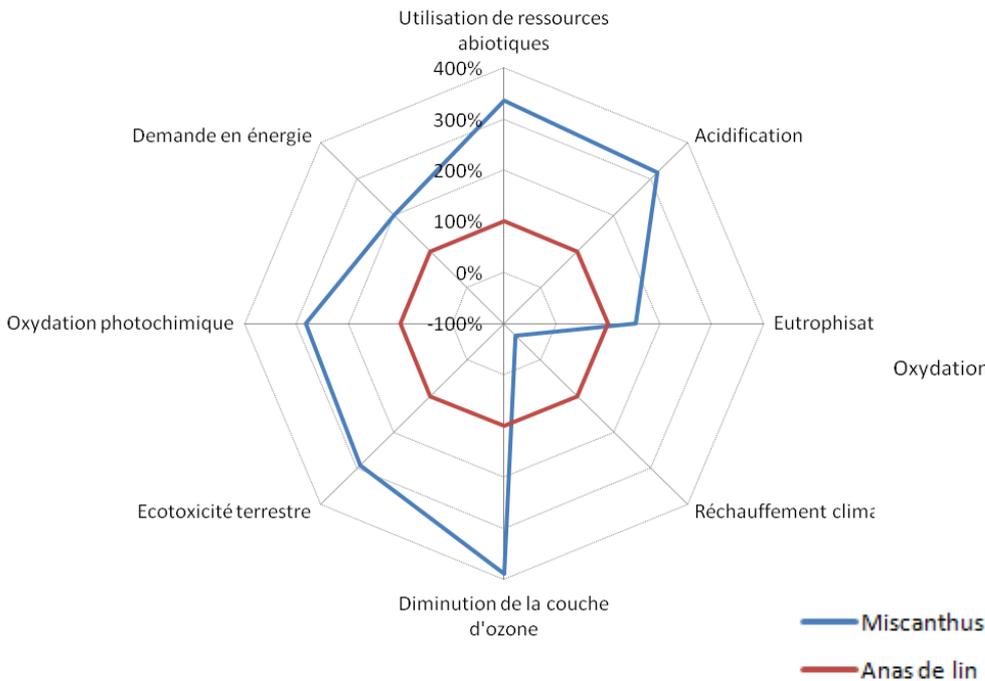
Impact Réchauffement Climatique pour 10000 Mwh



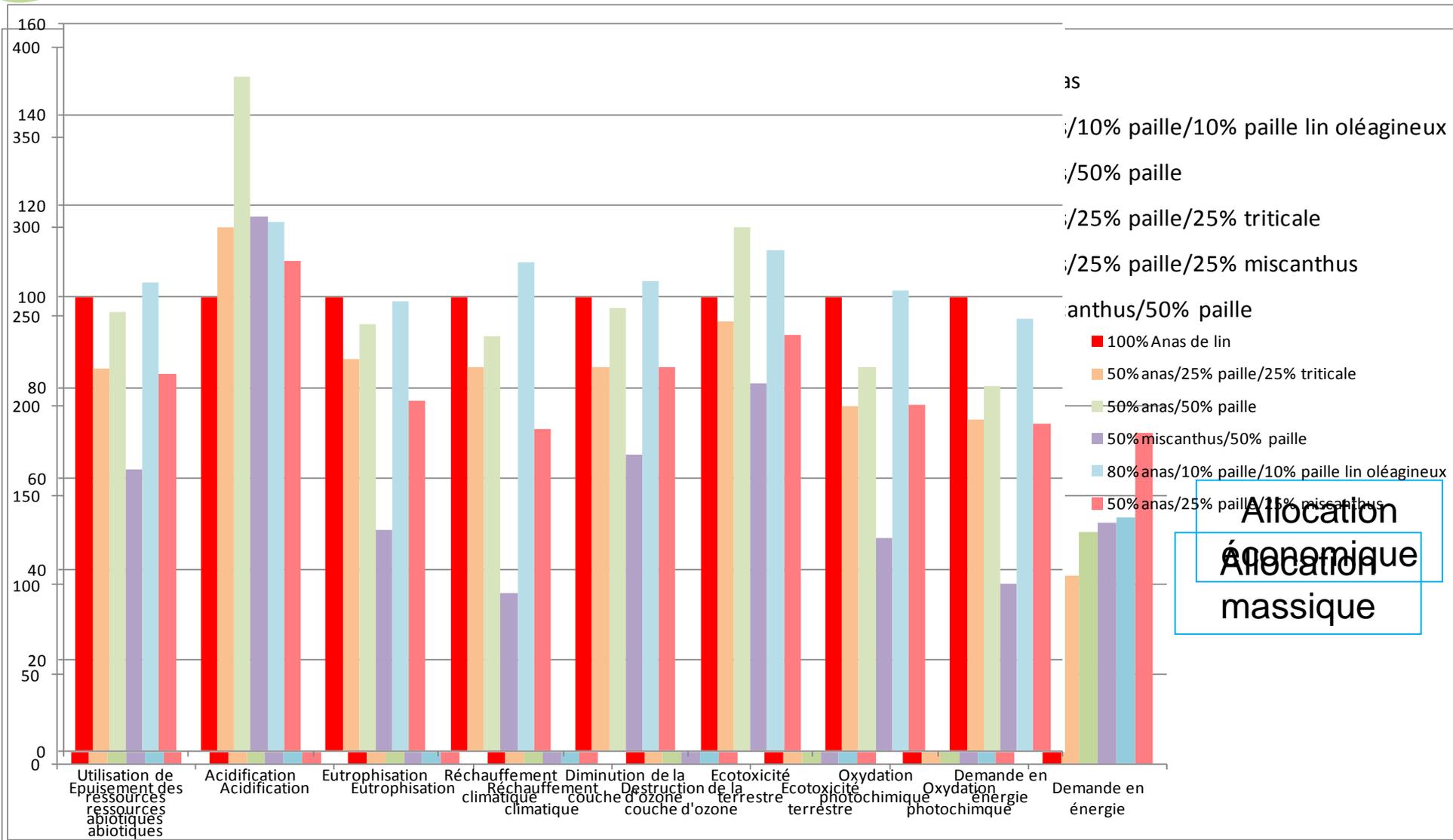
Effet du mode d'allocation : exemples des anas et du miscanthus

Allocation économique

Allocation massique



Effet du mode d'allocation : comparaison des scénarios d'approvisionnement



Conclusion sur l'étude Lin 2000 et sur les méthodes utilisées en ACV en général

- Forte variabilité de certains résultats selon les hypothèses et choix méthodologiques : nécessité de faire des **analyses de sensibilité**
- Les **résultats et conclusions de l'étude** ne sont valables **qu'à la lumière des hypothèses posées** : toujours les préciser, les avoir à l'esprit lors de l'interprétation des résultats et éventuellement revenir sur ces choix (l'ACV est **ITERATIVE** !)
- Dans tous les cas, **justifier et argumenter ses choix** pour ne pas prétendre aux critiques « d'orientation » des résultats