

---

# Génie des procédés chimiques et développement durable

---

## LABORATOIRE DE GÉNIE CHIMIQUE

*Procédés et développement durable*

A. Léonard

a.leonard@ulg.ac.be

# Université de Liège

- 9 facultés, 1 institut, 1 école



Philosophie et Lettres



Sciences Appliquées



Droit et École de Criminologie



Médecine Vétérinaire



Sciences



Psychologie et Sciences de l'Éducation



Médecine



*Ecole de Gestion de l'Université de Liège*

✓ 38 bacheliers

✓ 194 masters

✓ 68 masters complémentaires

Architecture

Sciences Humaines et sociales Sociales

# Département de Chimie Appliquée

## ■ 3 groupes

- ✓ Analyse et Synthèse des Systèmes Chimiques - Cryogénie  
(Pr G. Heyen, Pr J.-L. Bozet)
- ✓ Génie Catalytique et électrochimique - Nanomatériaux  
(Pr J.-P. Pirard, Pr B. Heinrichs, Dr N. Job, Dr S. Lambert, Dr S. Gommaes)
- ✓ Génie Chimique  
(Pr M. Crine, Pr P. Marchot, Pr D. Toye, Pr A. Léonard)

<http://www.chimapp.ulg.ac.be/>

# Génie des procédés chimiques ?

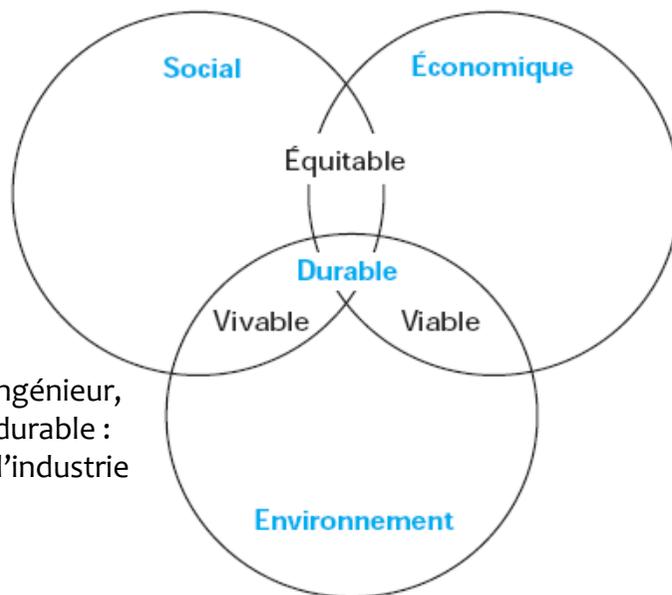
- Le **Génie des Procédés**
  - ensemble des connaissances, des technologies et des pratiques nécessaires à la conception, la mise en œuvre, l'exploitation et l'optimisation des procédés de **transformation de la matière** par voie chimique, physique ou biologique.

# Génie des procédés chimiques ?

- Domaines d'application
  - ❑ industrie chimique
  - ❑ industries pharmaceutique et biotechnologique
  - ❑ industrie cosmétique
  - ❑ Industrie agroalimentaire et agrochimique
  - ❑ industrie papetière
  - ❑ industrie cimentière
  - ❑ production d'énergie
  - ❑ ...

# Le concept « développement durable » ?

- 1987 – Commission Mondiale sur l’Environnement et le développement (Montréal)
  - Rapport « Brundtland » prône le concept de « sustainable development »
  - Un développement qui permet de : « répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations futures de satisfaire les leurs ».



Techniques de l'Ingénieur,  
Développement durable :  
implication pour l'industrie

**Intersection des 3 sphères ou piliers du développement durable**

« Réconcilier efficacité économique,  
justice sociale et conservation de la nature »

# La « chimie durable » ?

- 1991 – EPA, U.S. Environmental Protection Agency, lance premier programme de recherche en chimie durable dite verte
  - Naissance du concept « Green Chemistry »
    - Concevoir des produits et des procédés chimiques permettant de **réduire** ou d'**éliminer** l'utilisation et la synthèse de **substances dangereuses**
  - **Réduire** et **prévenir** la **pollution** à la source, **minimiser les risques** et optimiser l'efficacité des choix chimiques

# La « chimie durable » ?

- 1998 – 12 principes de la « Green Chemistry » publiés par Anastas et Warner (Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, New York, 1998)
  1. Prévention de la pollution
  2. Economie d'atomes
  3. Concevoir des méthodes de synthèses moins dangereuses
  4. Concevoir des produits chimiques moins toxiques
  5. Limiter l'utilisation des solvants
  6. Minimiser la dépense énergétique
  7. Utiliser les ressources renouvelables
  8. Réduire le nombre de dérivés
  9. Utiliser de préférence des procédés catalytiques
  10. Concevoir les produits en vue de leur dégradation finale
  11. Suivre et contrôler les réactions chimiques à l'aide de méthodes analytiques procédant en temps réel, de façon à éviter toute pollution
  12. Pratiquer une chimie fondamentalement plus sûre pour minimiser les risques d'accident

# Quelques thématiques de recherche

- Piles à combustible/batteries
  - Synthèse de matériaux carbonés
  - Développement de couches minces
- Modélisation de procédés
  - Optimisation énergie/matière
- Traitement d'effluents gazeux
  - Adsorption de composés organiques volatils
  - Capture du CO<sub>2</sub>
- Traitement de déchets solides
  - Biométhanisation
  - Traitement de boues d'épuration
- Évaluation environnementale de procédés
  - Analyse de cycle vie
  - Eco-conception

# Traitement des boues d'épuration

- Boues résiduaires 'urbaines'
  - Station d'épuration à boues activées



Oupeye - 446 500 EH

- 1 EH  $\Rightarrow$  15 à 20 kg matières sèches de boue (MS)  
 $\Rightarrow$  jusqu'à 100 kg sur base humide

[www.aide.be](http://www.aide.be)

# Traitement des boues d'épuration

- Un gisement important

Countries	Sludge Production Volume Tds/a	
	2010 estimate	2020 estimate
USA	7.000.000	10.000.000
Austria	273.000	280.000
UK	1.640.000	1.640.000
Scotland	200.000	200.000
Spain	1.280.000	1.280.000
Sweden	250.000	250.000
France	1.300.000	1.400.000
Germany	2.000.000	2.000.000
Italy	1.500.000	1.500.000
Romania	165.000	520.000
Portugal	420.000	750.000
Poland	520.000	950.000
Hungary	175.000	200.000
EU27	11.500.000	13.500.000

**Europe :**  
près de 50 à 60 millions de  
tonnes de boue humide

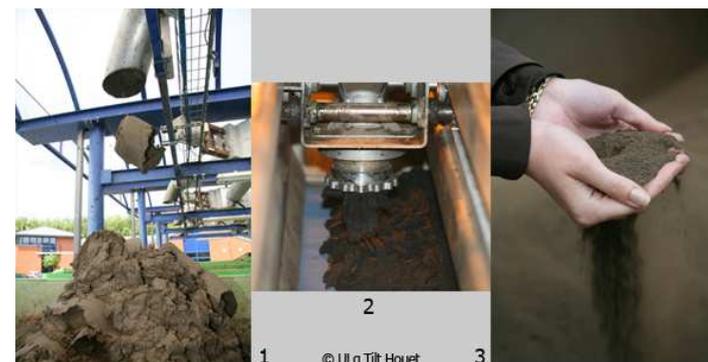


Production globale > 50 millions T MS/an

# Traitement des boues d'épuration

- La valorisation des boues
  - Valorisation agricole
    - Éléments minéraux et organiques
      - Valeur humique
      - Valeur fertilisante
  - Valorisation énergétique
    - Incinération dans un four spécifique
    - Co-incinération avec des ordures ménagères
    - Incinération en cimenterie
    - Biométhanisation → cogénération
    - Pyrolyse/gazéification → cogénération

**Europe - 2010**  
**Agriculture : 42%**  
**Incinération : 27%**  
**CET : 14%**  
**Autres : 16%**



Au centre de valorisation des déchets d'IDELUX à Tenneville, les boues déshydratées (mais encore humides à 80% environ) sont collectées à la station d'épuration (1) avant d'être alimentées, sous la forme d'extrudats, dans le sécheur industriel (2). Le produit final est une matière parfaitement sèche (3), qui peut servir de combustible pour la production d'électricité. L'usine est capable de produire 300 Kg de matières sèches par heure.

# Traitement des boues d'épuration

- Le séchage : une étape clé
  - Valorisation agricole : épandage
    - Stabilisation, réduction odeur (MS > 90%)
    - Réduction masse et volume
    - Concentration des éléments nutritifs
    - Hygiénisation
    - Texture pâteuse → texture solide

from Waste

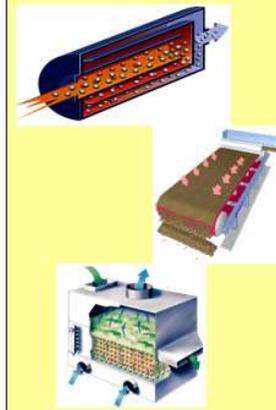
Dewatered Sludge



- 20 - 35% DS
- Sticky
- Caloric heating value < 4 MJ/kg
- biologically active ( digestion processes )

Transfer

by  
Sludge Drying



to Product

Dried Granules



- > 90% DS
- free flowing
- Caloric heating value
  - 8 - 11 MJ/kg ( digested )
  - > 12 MJ/kg ( non-digested )
- pathogen free
- biologically stable

# Traitement des boues d'épuration

## ■ Le séchage : une étape clé

### □ Valorisation énergétique

- Séchage  $\Rightarrow$  Augmentation Pouvoir Calorifique Inférieur

$30 < MS < 45\%$  : auto-combustibilité

$\Rightarrow$  Incinération four spécifique

$60 < MS < 90\%$  : PCI  $\cong$  ordures ménagères (8400 kJ/kg)

$\Rightarrow$  Co-incinération

$MS > 85\%$

$\Rightarrow$  pyrolyse ou gazéification

# Traitement des boues d'épuration

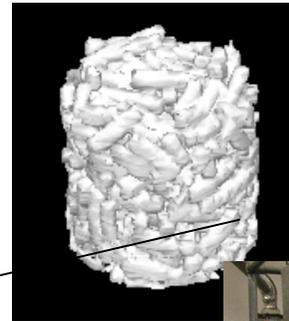
- Le séchage : une étape clé mais mal maîtrisée
  - Optimisation du séchage convectif



Extrusion de la  
boue



Sécheur pilote



Micro-sécheur



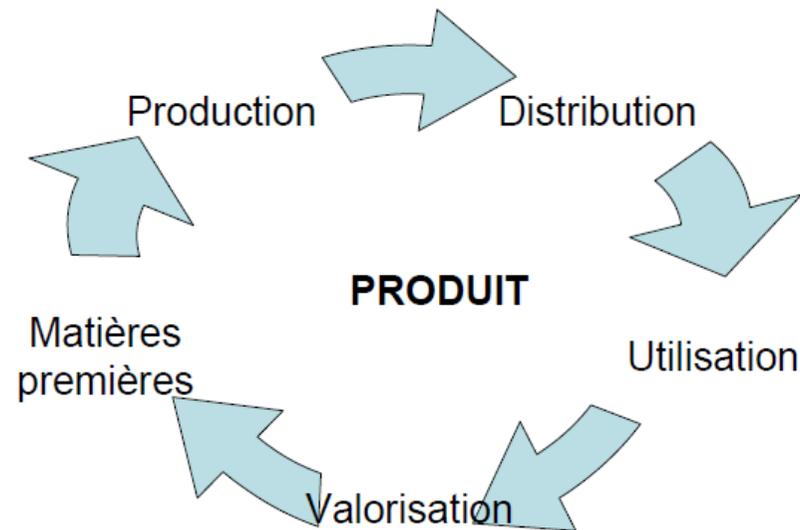
Influence de la nature de la boue ??  
Influence de la filière de traitement ??  
Émission d'odeurs ??

# Traitement des boues d'épuration

- Le séchage : une expertise de plus de 10 ans
  - Nombreuses publications
    - Journaux, conférences, chapitres de livre
  - Organisation workshops (VAL+, TWEED)
  - Lancement de la série de conférence ECSM à Liège en 2008 : European Conference on Sludge Management
  - Annexe du programme IETS de l'IEA
  - Collaborations industrielles
  - ...

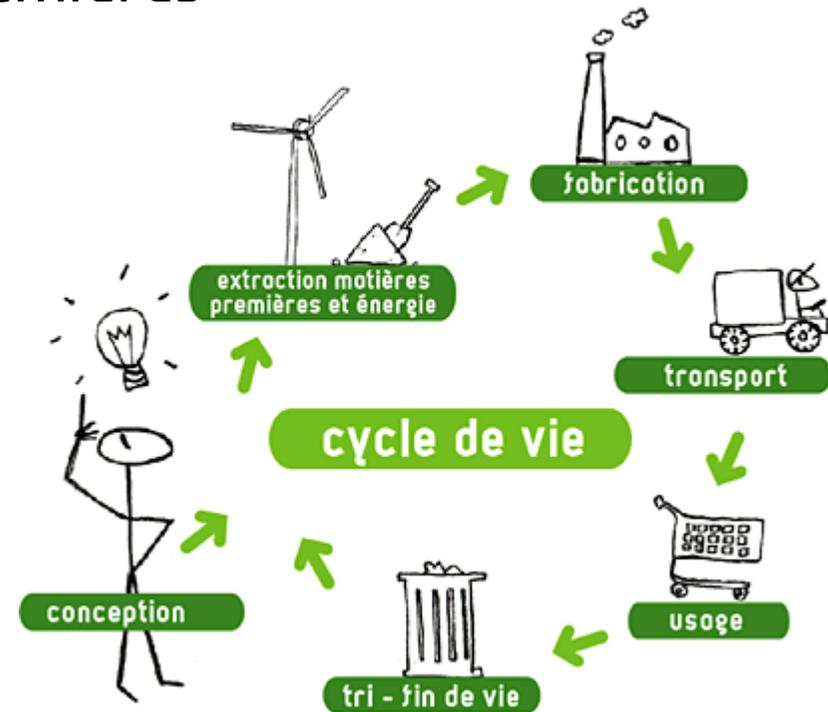
# Analyse du cycle de vie

- Cadre général défini par la norme internationale ISO 14040
  - « étudie les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit, de l'acquisition de la matière première à sa production, son utilisation et à sa destruction »
  - Produit = produit, activité, système ou procédé



# Analyse du cycle de vie

- Le cycle de vie du produit comprend
  - ❑ Extraction des matières premières
  - ❑ Production
  - ❑ Transport
  - ❑ Distribution
  - ❑ Utilisation
  - ❑ Entretien
  - ❑ Réutilisation ou recyclage
  - ❑ Élimination finale
- Approche « du berceau à la tombe »



# Analyse du cycle de vie : Pourquoi ?

## Interne

### Stratégie

- Identification des impacts potentiels d'un produit sur l'environnement
- Support des décisions d'investissement

### R & D produits/procédés

- Identification précoce des problèmes / opportunités
- Aide au choix des projets
- Aide à la définition des objectifs

## Externe

### Marketing

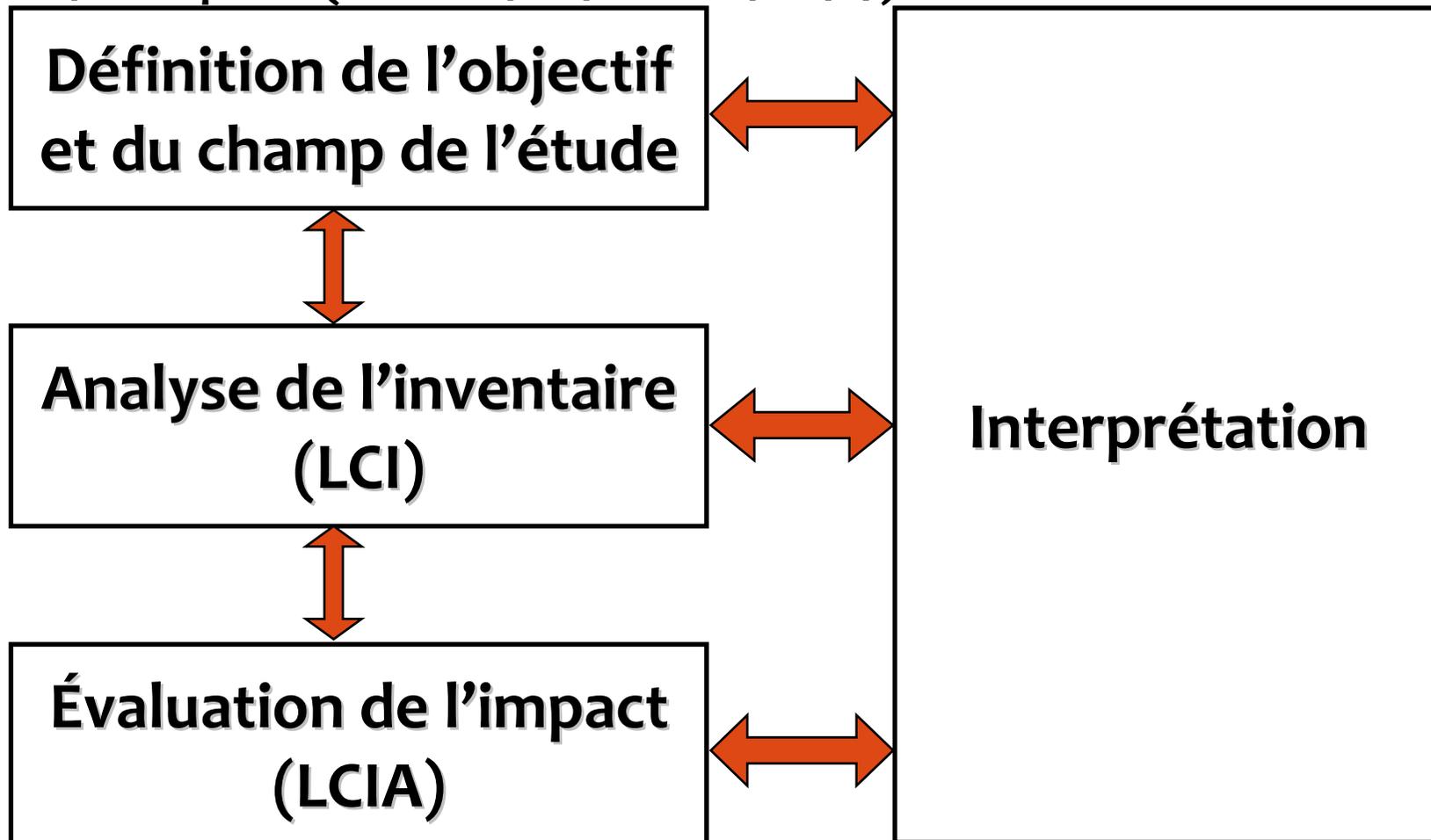
- Analyse comparative de produits ou de services
- Promotion des solutions le plus eco-efficaces (impacts sur l'environnement + coûts)

### Politique

- Meilleure information des leaders d'opinion, autorités, consommateurs, ... (législation/réglementation, écolabels ...)
- Analyses comparatives

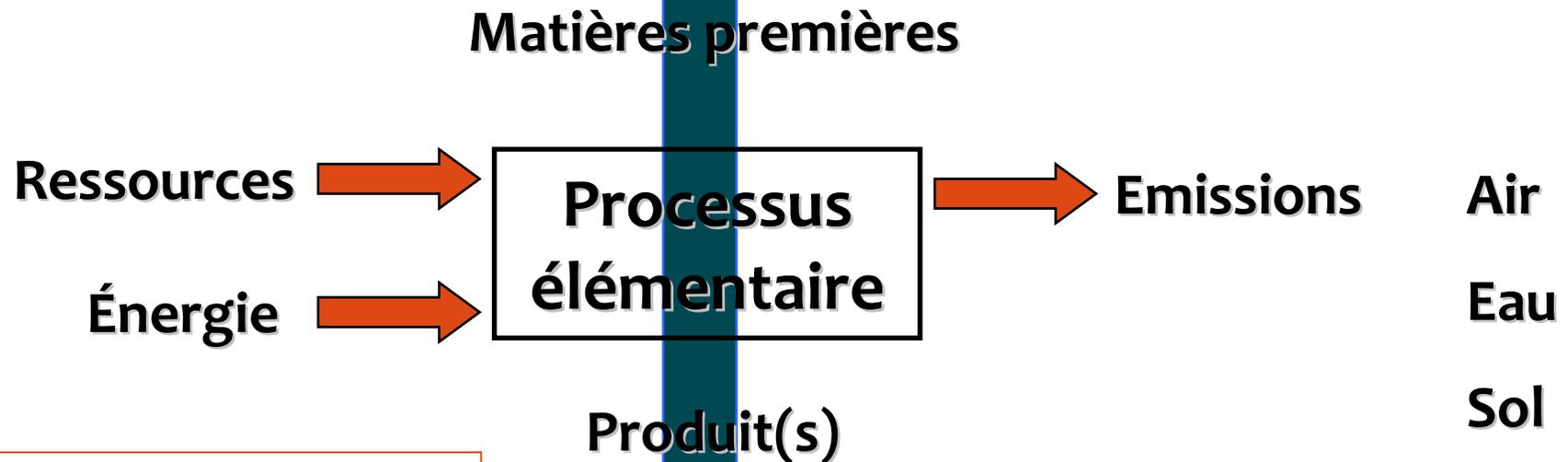
# Analyse du cycle de vie : comment ?

- 4 étapes (ISO 14040 – 14044)



# Analyse du cycle de vie : comment ?

## ■ L'inventaire



- Processus élémentaire
  - ❑ Emballage
  - ❑ Transport
  - ❑ Distillation
  - ❑ Incinération
  - ❑ ...

# Analyse du cycle de vie : comment ?

## ■ L'inventaire

Emballage	
Carton	0,35 kg
PS	0,05 kg
Papier	0,1 kg
Transport	0,05 tkm
Production boîte	0,35 kg
Expansion	0,05 kg

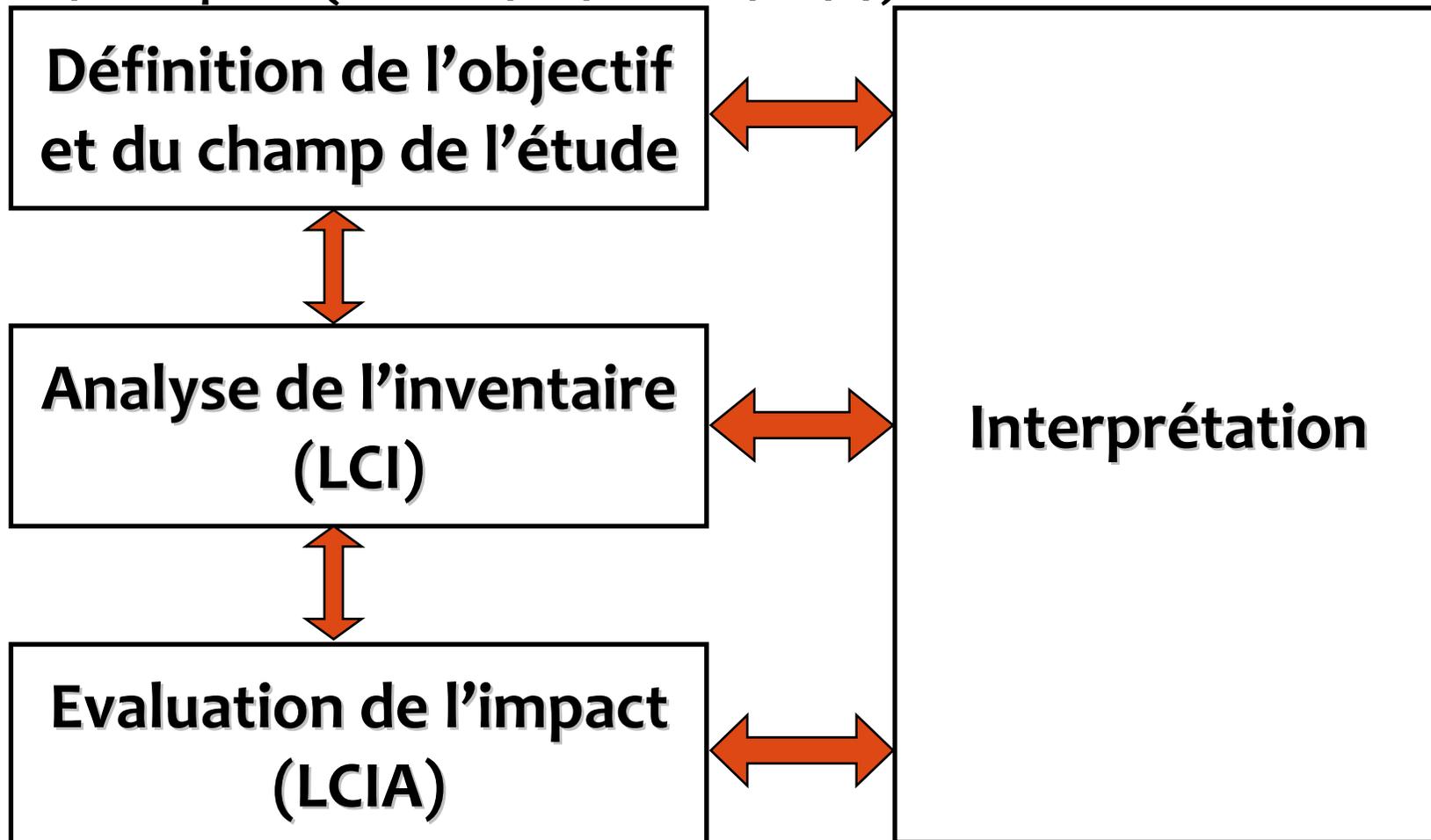
Exemple : émissions dans l'air pour la production d'un kilo de carton

Polluant	Quantité	Unité
CO <sub>2</sub>	4,51E-01	kg/kg
SO <sub>2</sub>	8,85E-04	kg/kg
NO <sub>x</sub>	2,08E-03	kg/kg
N <sub>2</sub> O	1,42E-04	kg/kg
CH <sub>4</sub>	7,32E-04	kg/kg
NMVOC	4,05E-04	kg/kg
NH <sub>3</sub>	2,51E-04	kg/kg
As	7,26E-08	kg/kg
Cr VI	2,02E-08	kg/kg
Dioxines	5,16E-13	kg/kg

**Bilan CO<sub>2</sub> = 1 inventaire parmi les nombreux réalisés**

# Analyse du cycle de vie : comment ?

- 4 étapes (ISO 14040 – 14044)



# Analyse du cycle de vie : comment ?

- L'évaluation des impacts
  - Estimer des impacts environnementaux à partir des données d'inventaire
  - Exemple de catégories d'impacts
    - Changement climatique
    - Acidification
    - Consommation de ressources
    - Destruction couche d'ozone
    - Effets cancérigènes
    - ...
  - Existence de différentes méthodes

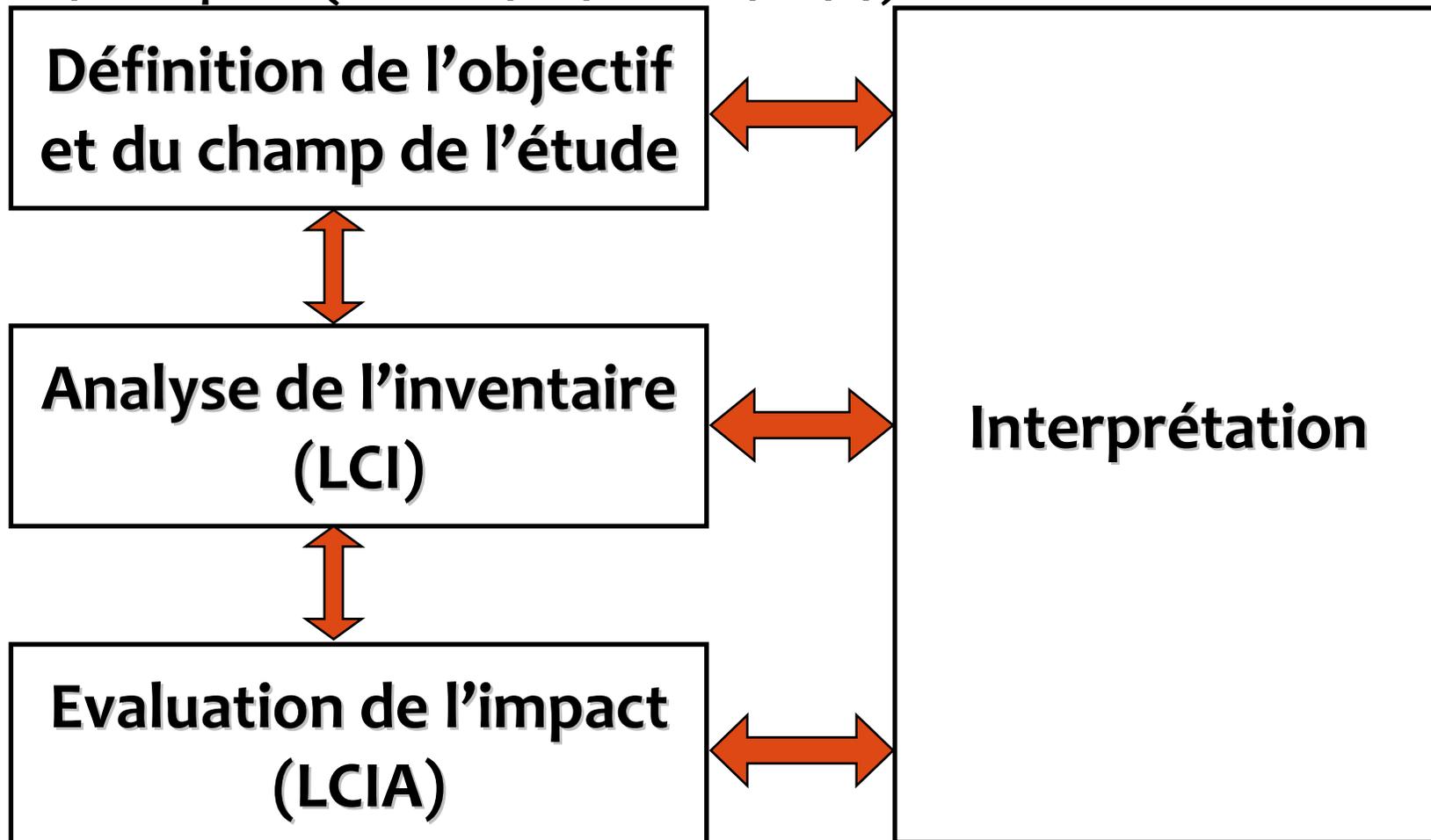
CO <sub>2</sub>	10 kg
CH <sub>4</sub>	12 m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	150 g
As, Cd, HAP	...



CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ⇒ Changement climatique  
SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ⇒ Acidification  
As, Cd, HAP ⇒ Effets cancérigènes

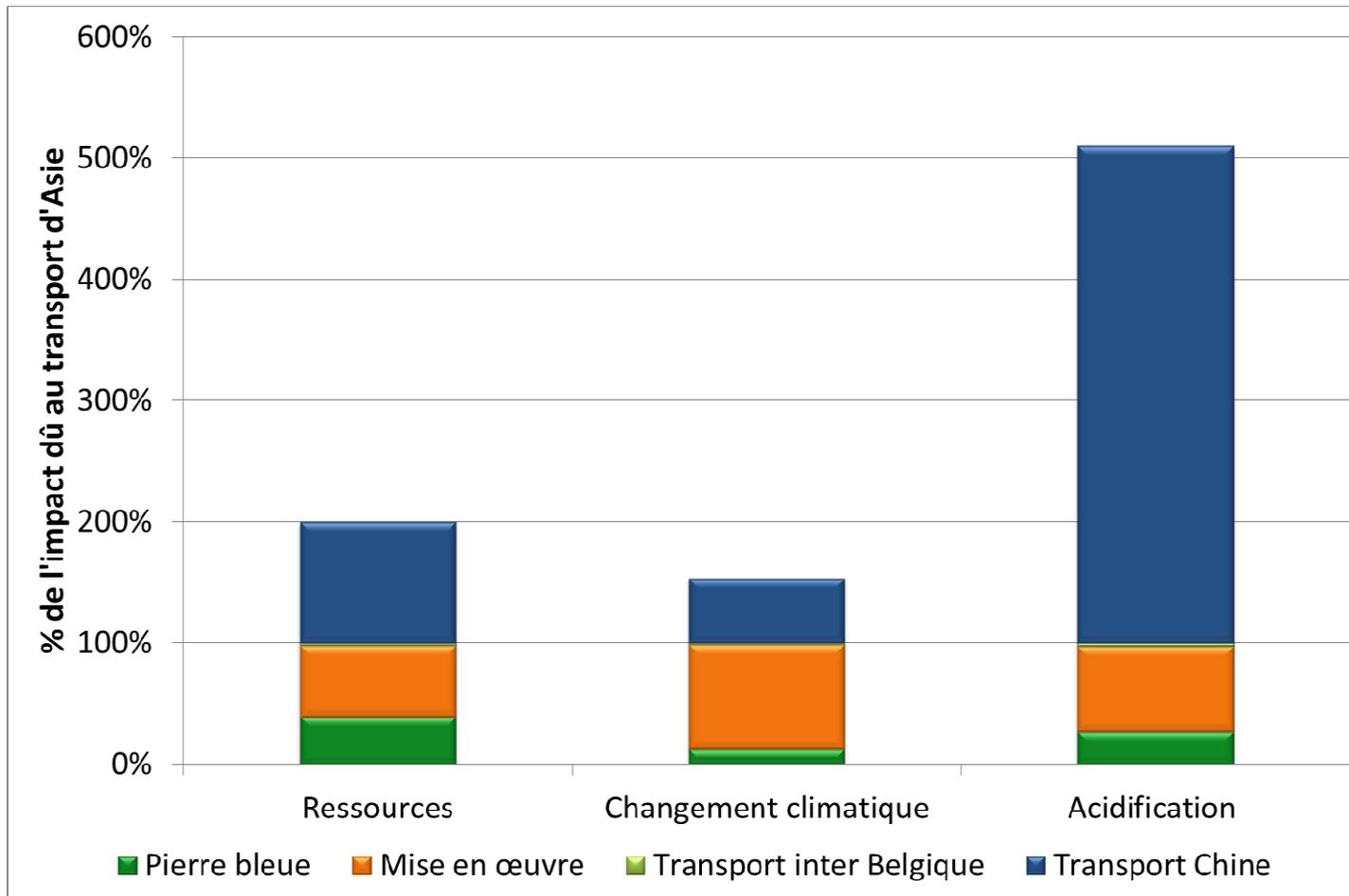
# Analyse du cycle de vie : comment ?

- 4 étapes (ISO 14040 – 14044)



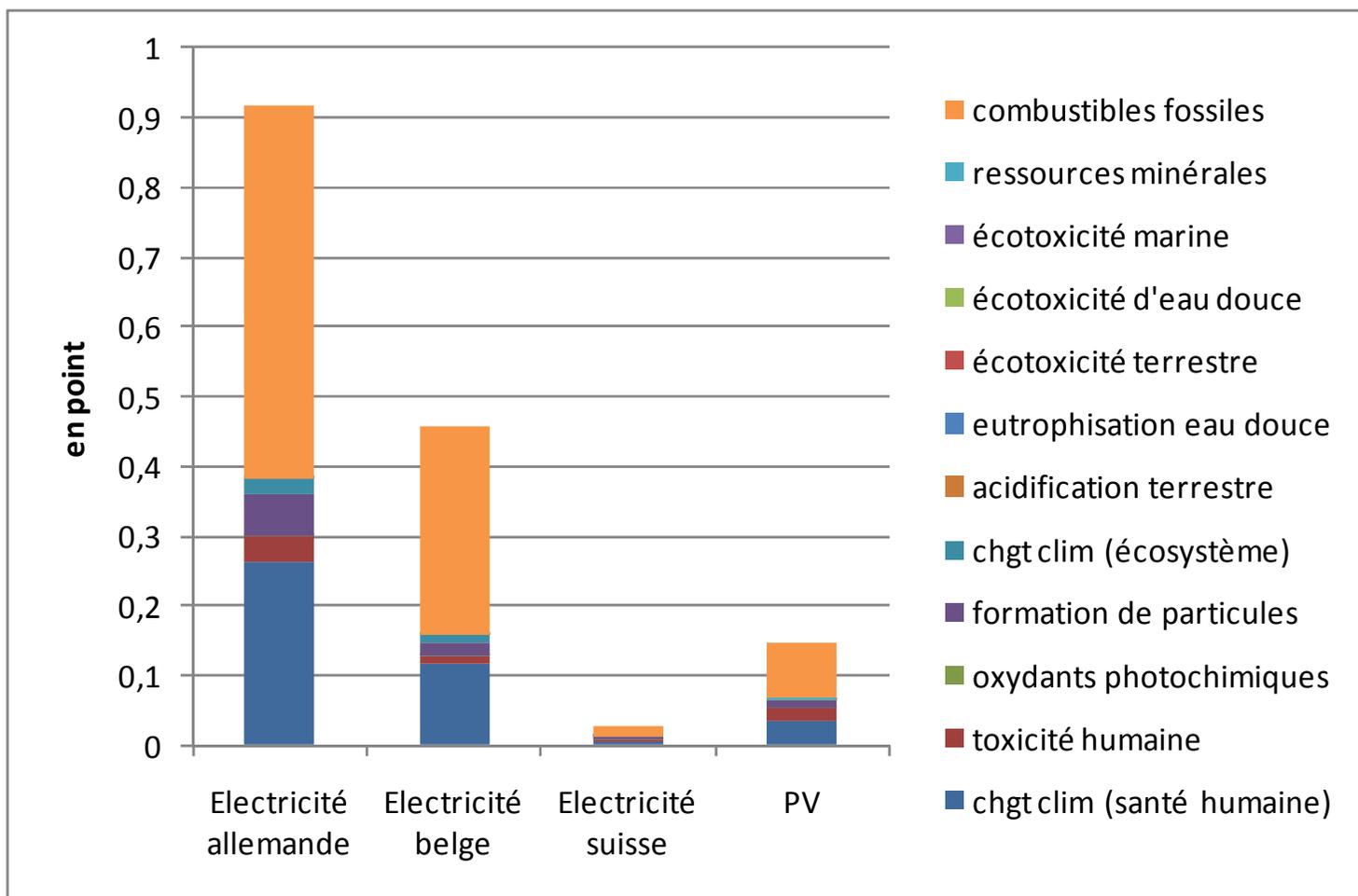
# Analyse du cycle de vie : exemple

## ■ Pierre bleue belge vs. pierre chinoise



# Analyse du cycle de vie : exemple

## ■ Photovoltaïque vs. électricité du réseau



---

# Analyse du cycle de vie

- Une expertise unique en Wallonie depuis > 10 ans
  - Évaluation de l'impact environnemental de procédés
  - Rédaction de fiches de déclaration environnementale
  - Développement de bases de données
  - Participation à des projets régionaux et européens
  - Recherche académique
  - Formation → Pôle Greenwin
  - ...

# Analyse du cycle de vie

- Projets de recherche en cours
  - WALAID – Wallonie
    - Valorisation sous produits industries agrolimentaires
  - SOMABAT – EU (FP7)
    - Développement batteries pour véhicules
  - INTRADEL
    - Évolution environnementale de la gestion des déchets
  - Pierres et marbres de Wallonie
    - Fiches de déclaration environnementales
  - ...

---

# Analyse du cycle de vie

- Thèses
  - Évaluation environnementale de systèmes de production d'énergie
  - Évaluation environnementale de voies de conversion thermochimique de biomasse lignocellulosique
- Formation
  - Porteurs de projet 'Greenwin'
  - Certificat interuniversitaire en management stratégique du carbone

---

# L'équipe ...

- « Boues »
  - Prof. Michel Crine
  - Laurent Fraikin (doctorant)
  - Thierry Salmon (ingénieur industriel)
  - Dr Lyes Bennamoun (postdoctorant FNRS)
  - Yvon bert PAMBOU (doctorant)
- « ACV »
  - Sandra Belboom (doctorante)
  - Saïcha Gerbinet (doctorante)
  - Raphaëlle Melon (ingénieur de recherche)
  - Robert Renzoni (chercheur senior)

---

# Merci pour votre attention !

---

LABORATOIRE DE GÉNIE CHIMIQUE

*Procédés et développement durable*

A. Léonard

[a.leonard@ulg.ac.be](mailto:a.leonard@ulg.ac.be)