L'efficacité énergétique des systèmes énergétiques et non énergétiques

Par X. Chavanne Physicien/Ing. Recherche

Univ. D. Diderot & Institut de Physique du Globe de Paris

Qui suis-je ?

* Indépendant de tout groupe de pression. A travaillé dans l'industrie (St Gobain).

* Généraliste utilisant le travail des spécialistes dans des domaines très différents (depuis les télécoms jusqu'à la station d'épuration).

* Intérêt pour les systèmes énergétiques depuis 1998.

* Membre des Associations for the Study of Peak Oil, du Véhicule Electrique Parisien... = forum de discussions techniques contradictoires.

* Cycliste urbain quotidien ; vélo = efficacités.

systèmes énergétiques complexes et riches

=> travail précis et rigoureux

L’efficacité énergétique

Introduction - liens avec d'autres indicateurs

-Efficacité économique,

-Sobriété des consommateurs,

-Abondance des ressources énergétiques,

-Bilans CO_2...

Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

-Résolution pratique et formalisme. Cas de la fabrication d'un téléphone et de la production d'agroethanol.

-Systèmes énergétiques auto-suffisants.

L’efficacité énergétique

Introduction - liens avec d'autres indicateurs

-Efficacité économique,

-Sobriété des consommateurs,

-Abondance des ressources énergétiques,

-Bilans CO_2...

Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

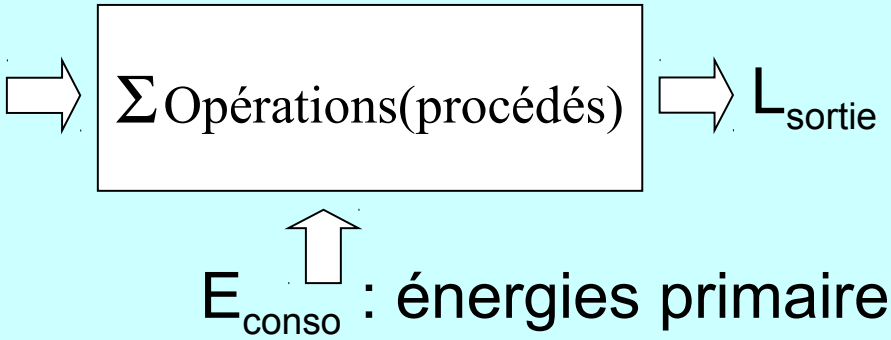
-Résolution pratique et formalisme. Cas de la fabrication d'un téléphone et de la production d'agroethanol.

-Systèmes énergétiques auto-suffisants.

Flux et taux d'un système

Bilan de flux (par an ou jour...) :

$L_{entrée}$: matière première
ou produit système amont



L_{sortie} : J d'éthanol, de chaleur..., $W_{nominal}$ éolien, réacteur nucléaire..., t.km de marchandise..., tonnes d'acier, de NH_3, d'eau potable..., h ou bits de service télécom...

$$\textbf{Taux de consommation } R = \frac{E_{conso}}{L_{sortie}}(var_j)$$

Efficacité <=> R minimal / var_j

=> détermination des variables technico-physiques var_j

N.B. : cas d'un système énergétique

E_{perte} : énergie non récupérée (chaleur/froid proche température ambiante, énergie des déchets…)

$E_{entrée/conso}$: contenu énergétique ressource → Σ Opérations(procédés) → E_{sortie} : combustibles, électricité... mécanique, chaleur, froid...

$$\text{Taux de dissipation } R = \frac{E_{perte}}{E_{entrée/conso}} = 1 - \frac{E_{sortie}}{E_{entrée/conso}}$$

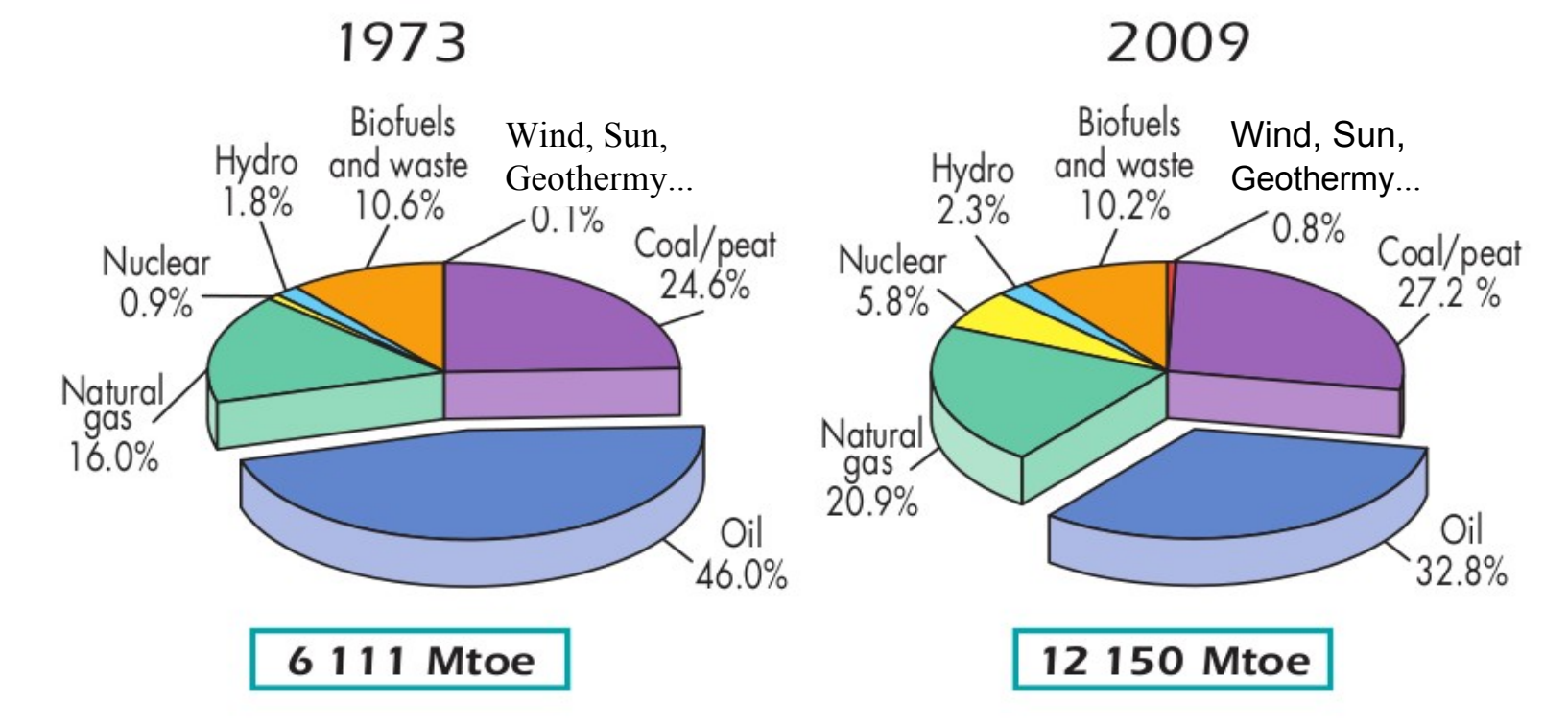
Efficacité <=> R minimal **< 1 par conservation de l'énergie**

"on ne peut dissiper plus d'énergie qu'on en extrait"

Cas de l'ensemble de la production énergétique ou d'une filière auto-suffisante

Energies primaires dans le monde

Source : AIE/IEA 2011 (AIE : Agence Internationale de l'énergie). Tep en PCS.



Pétrole en 1973 : 2,7 Gtep ou 20 Gb ou 55 Mb/j ; 0,71 tep_{Oil}/pers/an

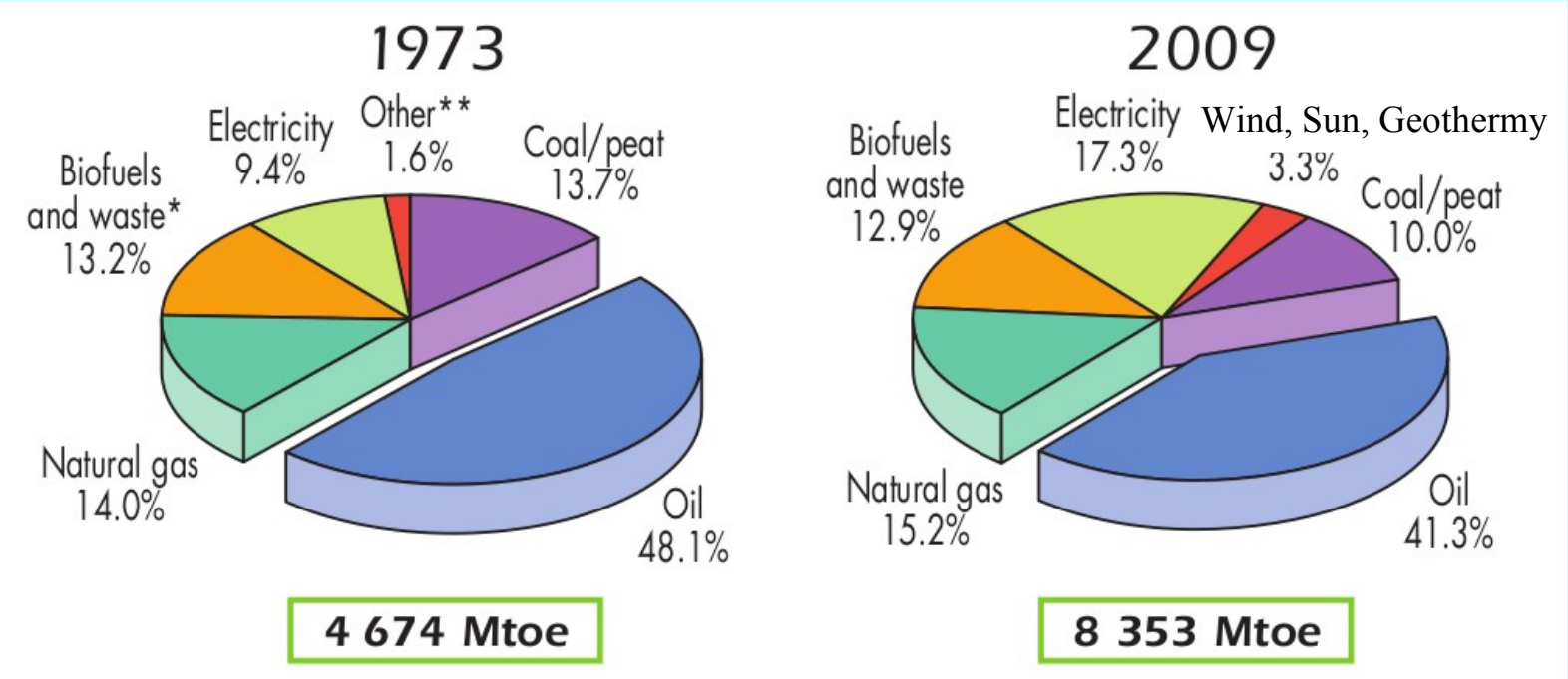
en 2009 : 4,0 Gtep ou 30 Gb ou 81 Mb/j ; 0,59 tep_{Oil}/pers/an (USA : 3,5 !)

1 tep ou toe (tonne équivalent pétrole) = 41,868 GJ ≈ PCI 1 t pétrole

b : baril = 159 litres ; 1 baril de brut ≈ 6,1 GJ_{PCS}

Energies finales dans le monde

Source : AIE/IEA 2011 (AIE : Agence Internationale de l'énergie).



Electricité : hydroélectrique, centrales thermiques nucléaires, à HC fossiles (charbon et gaz principaux), à biomasse/déchets. En Tep d'elc.

Combustibles (chaleur, transport) : produits pétroliers, charbon, gaz, biomasse. En Tep PCS.

Filières énergétiques

$E_{entrée}$ ⇨ Industries amont « lourdes » 1 ⇨ Industries amont « lourdes » 2 ⇨ E_{sortie}

énergies primaires

Hydrocarbures fossiles : pétrole, gaz naturel, charbon.
Nucléaire : fission (U, Th), (fusion (Li^6, Deutérium) ?).
«Renouvelables » : biomasse, chutes d'eau, vent, géothermie profonde (?), soleil, vagues…

énergies finales

électricité centrale, combustibles raffinés…

« énergies » utiles

électricité utilisateur, mécanique, chaleur, froid...

matériaux, équipement...

produits chimiques.

Aspects économiques

En France pour 2009

~ énergies finales producteurs ⇨ ΣValeurs Ajoutées ⇨ PIB : 2 000 G€

Energies consommées

Pétrole brut 85 Mtep > 40 G€
Gaz naturel 39 Mtep > 10 G€
Charbon 12 Mtep > 1,3 G€
Electricité nette (nucl. et renouv.)
450 TWh (39 $Mtep_e$) > 20 G€

Produit Intérieur Brut

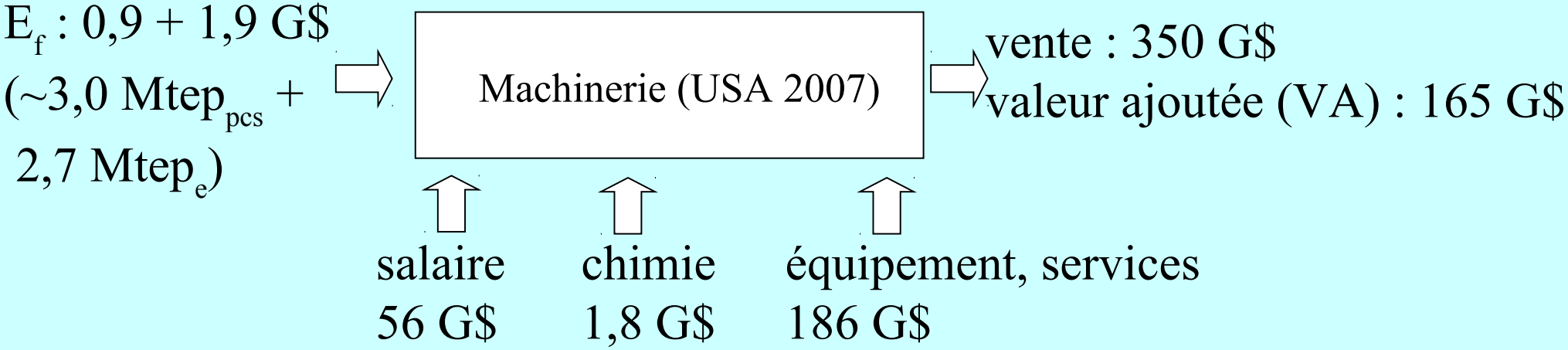
agrégation de la valeur monétaire des produits créés par les différents secteurs économiques (banques, assurance, tourisme...)

Coût de l'énergie en 2009 : moins de 4% du PIB ; 93 kep par k€ de PIB

L'économie a besoin d'une énergie abondante et bon marché

Source : ministère du développement durable, BP statistical review of world energy 2010

Aspects économiques

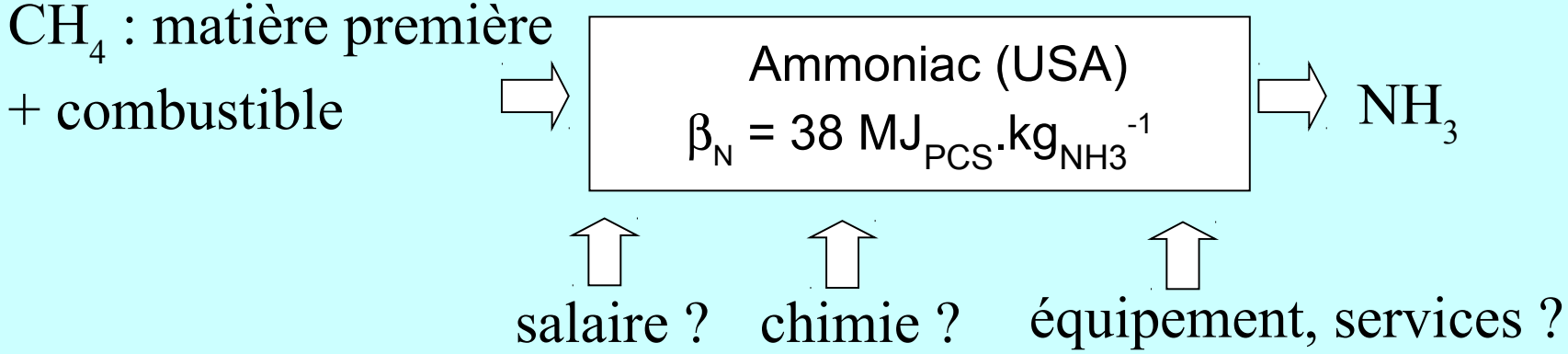


Coût de l'énergie : 1,7% de la valeur ajoutée ; 34 kep_{EF} par k$ de VA

Similaire aux données à l'échelle d'un pays

Source : USA gouvernement economic census 2007 (2011)

Aspects économiques



En 1995 : vente à ~235 $\$/t_{NH3}$; prix du gaz : ~1,5 $\$/GJ_{PCS}$ou 57 $\$/t_{NH3}$.

marge de ~180 $\$/t_{NH3}$. Gaz : 30 % marge. Prod. : 15,8 Mt_{NH3}.

En 2002 : vente à ~145 $\$/t_{NH3}$; prix du gaz : ~3,7 $\$/GJ_{PCS}$ou 140 $\$/t_{NH3}$.

marge de ~5 $\$/t_{NH3}$. Gaz : 2800 % marge. Prod. : 12,5 Mt_{NH3}.

En 2007 : vente à 360 $\$/t_{NH3}$; prix du gaz : ~7,05 $\$/GJ_{PCS}$ou 270 $\$/t_{NH3}$.

marge de ~90 $\$/t_{NH3}$. Gaz : 400 % marge. Prod : 10,4 Mt_{NH3}.

Industrie dite intensive en énergie (mais pas forcément inefficace)

Source : Department of Agriculture USA 2007. USGS minerals information.

Bilan financier ≠ bilan énergie

Dans un bilan financier, contraintes autres qu'énergétiques :

*Salaires, charges,

*Coûts des produits et services d'autres secteurs,

*Imprévus (surcoûts investissements, pertes équipements...),

*Taxes, amendes pour non respect des contrats, des réglementations,

*Prix du marché (demande/offre + effets de la spéculation),

*Retour sur investissement rapide (taux d'actualisation),

*...

Certains facteurs sont fluctuants à court terme (prix de ventes, surcoûts, amendes...) ne permettant pas de faire de prévisions.

Le coût de l'énergie a souvent un poids négligeable (sauf industries dites intensives) !

Bilan financier ≠ bilan énergie

* Prix de produits/services —?→ Leurs consommations énergies

(coefficient entre prix et consommation par secteur sur 1 an)

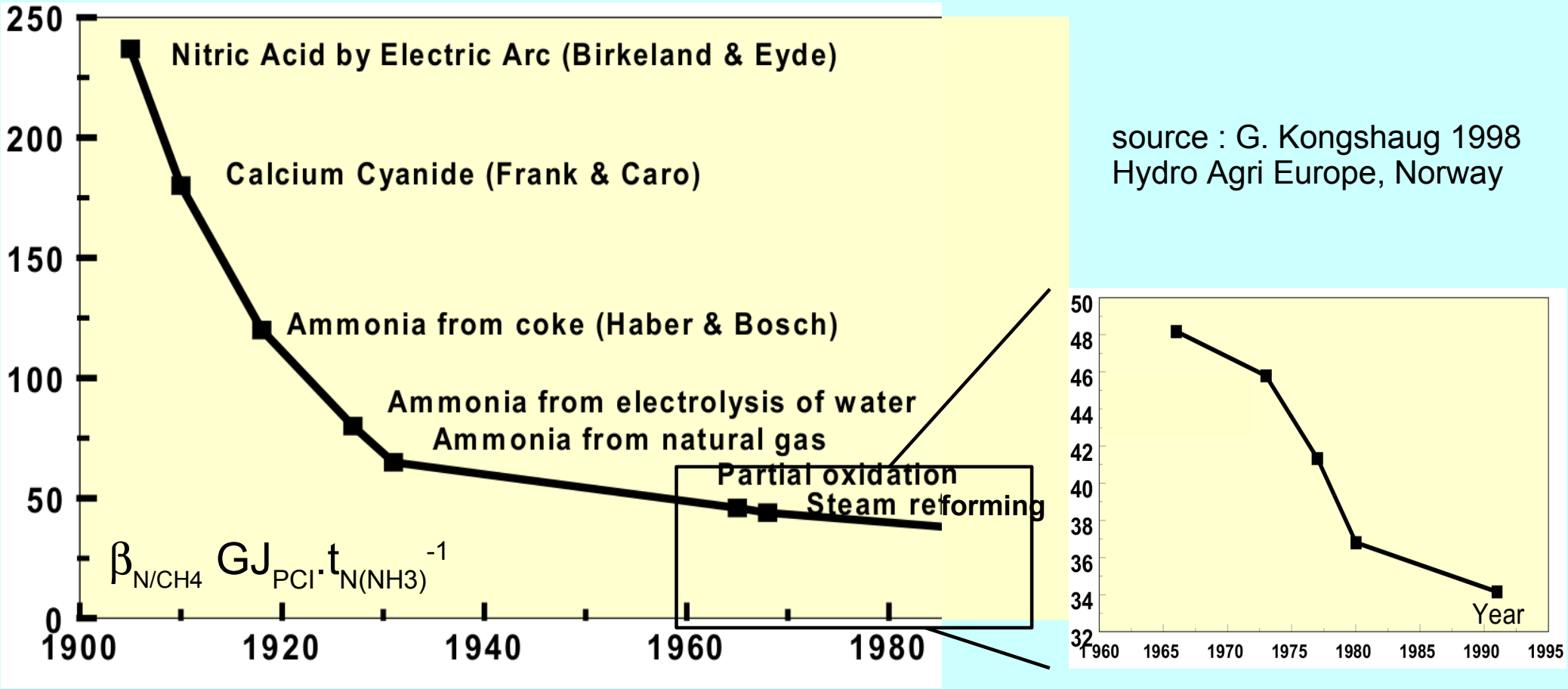
Prix trop intégré, trop fluctuant et part énergie trop faible (sauf cas particuliers)

*Consommations énergies —?→ Bilan économique sur le long terme

Si bilan détaillé (matières, équipements, procédés) pour systèmes assez énergivores.

Ex : progrès sur conversion gaz/ammoniac ?

Progrès sur conversion gaz/ammoniac ?



source : G. Kongshaug 1998
Hydro Agri Europe, Norway

Usine récente : 33 $GJ_{PCI}.t_{N(NH3)}^{-1}$ ou 30 $MJ_{PCS}.kg_{NH3}^{-1}$ (EFMA 2000).

Limite thermochimie/cinétique : 25,5 $GJ_{PCI}.t_{N(NH3)}^{-1}$ ou 23 $MJ_{PCS}.kg_{NH3}^{-1}$.

Usage d'une énergie utile ≠ efficacité d'obtention

Chauffage appartement :
>efficacité de conversion en chaleur, de transfert, d'isolation thermique.
>Mais recherche de confort : températures et volumes à chauffer plus élevés.
(En France sur 20 ans env. de 19°C à 21°C et 10 m^2 de plus par personne)

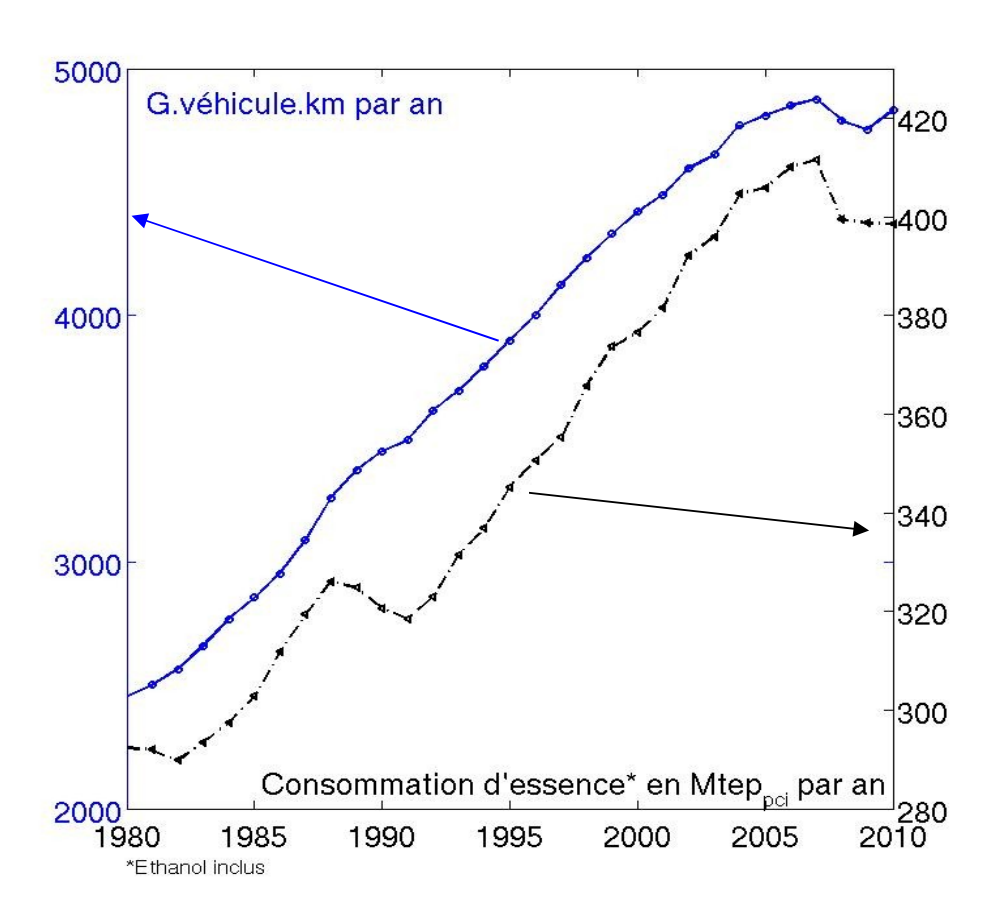
Ecrans de télévision :
>efficacité de la consommation par unité de surface
>Mais écrans plus grands, plus nombreux (salles d'attente) et plus souvent allumés. Modem 24/24 h.

Choix de société, comportement humain.
Influence des prix : gaspillage ou sobriété plus ou moins forcée (sobriété choisie voire heureuse par une minorité)

Confort ≠ bien-être (température d'une pièce)

Usage d'une énergie utile
≠ efficacité d'obtention

Cas des déplacement des particuliers aux EUd'A :



Croissance de 1980 à 2007 de la distance parcourue par tous les véhicules à moteur sur route.

Croissance simultanée de la consommation d'essence, sauf autour de 1990 (politiques d'économie décidées en 1973 et 1979).

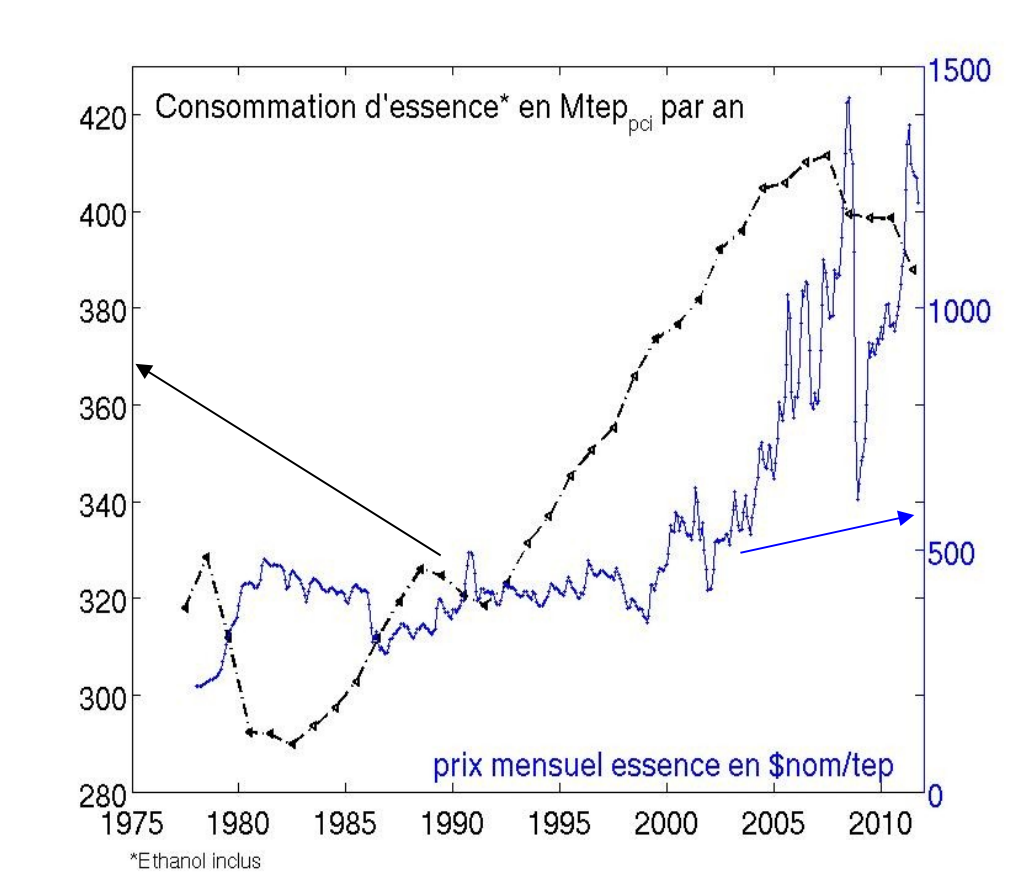
Après 1995 apparition des 4x4 et des mini-camions.

Sources : EIA, Department of Energy. USA 2012. The Transportation Energy Data Book, ed. 30, Department of Energy. USA 2011. HighWay Federal Administration 2012.

*ethanol inclus

Usage d'une énergie utile
≠ efficacité d'obtention

Prix et consommation d'essence aux EUd'A :



Prix faible de 1980 à 2003 (45 $/b).

=> Hausse de la consommation.

2002-07 : prix de l'essence x 2,5 ; mais peu de réaction !

2007-08 : choc pétrolier ; prix de l'essence x 1,5 en 6 mois.

Fin 2008 : choc économique.

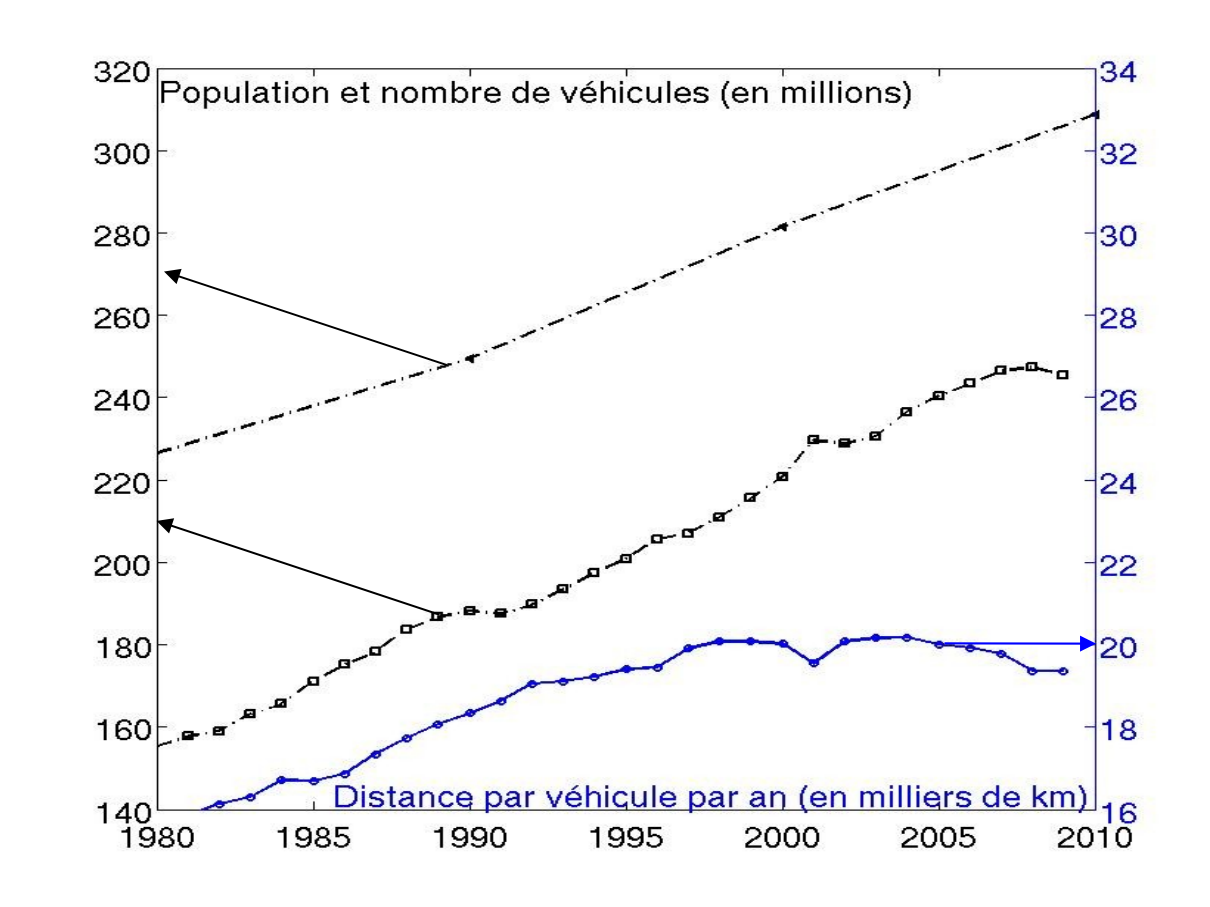
Fin 2010-211 : 2e choc pétrolier.

Les automobilistes réduisent leur consommation de 3-4 % lors des chocs. Quid long terme ?

Sources : EIA, Department of Energy. USA 2012. The Transportation Energy Data Book, ed. 30, Department of Energy. USA 2011.

Usage d'une énergie utile
≠ efficacité d'obtention

Population, parc auto et distances aux EUd'A :



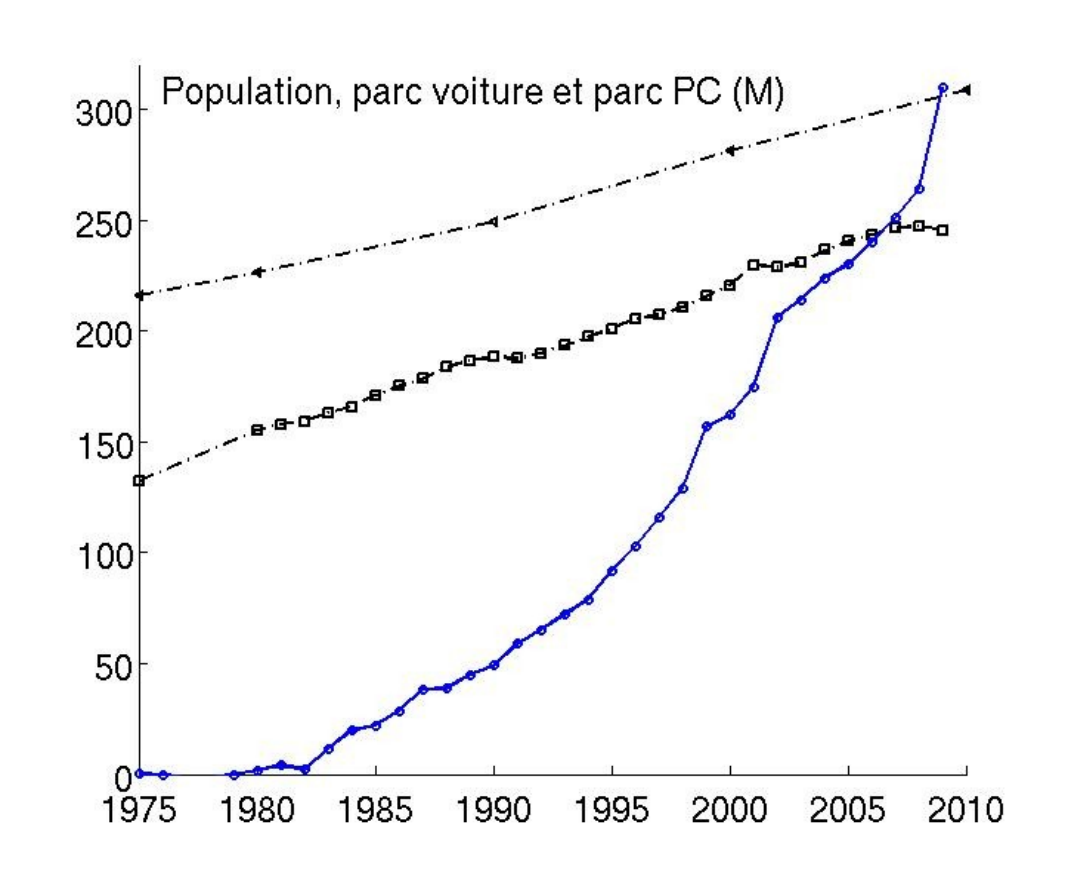
Croissance de la population depuis 1980
=> croissance du parc auto concomitante, voire plus rapide !
+
Croissance de la distance annuelle par véhicule jusqu'en 2000

Le pays dont les habitants consomment le plus de pétrole n'est pas rassasié !!

Sources : census bureau, USA 2012. The Transportation Energy Data Book, ed. 30, Department of Energy. USA 2011.

Usage d'une énergie utile ≠ efficacité d'obtention

Population et parc ordinateurs aux EUd'A :



Croissance du nombre d'ordinateurs individuels :

de quasi zéro en 1975 à plus de 1 par habitant en 2010.

Le parc informatique a eu une faible influence sur celui des automobiles.

Sources : census bureau, USA 2011. Computer Industry Almanach Inc. 2011 (crédit A. Adonis).

Abondance d'une ressource énergétique : flux et stocks

173 PW_{ph} (1,4 $kW_{ph}/m_{\perp}^2$)

IR lointain (dissipation)

52 PW_{ph} réfléchi

81 PW_{th} chaleur sensible — sol/océan

40 PW_{th} évaporation/condensation — retenues

0,3-0,1 PW_{meca} convections — vent/vague/courant

0,04 PW_{th} photosynthèse — plantes,...

< 0,1 % en moy.
+ cumul sur 0,6 G.an

C réduit fossile

0,003 PW_{meca} gravité/marée

avant 4,5 G.an

0,04-0,03 PW_{th} — accrétion terre

radioactivité K^{40},U,Th

n fissile &fertile

E.P. (homme) = 12,5 Gtep/an = 0,017 PW_{EP}

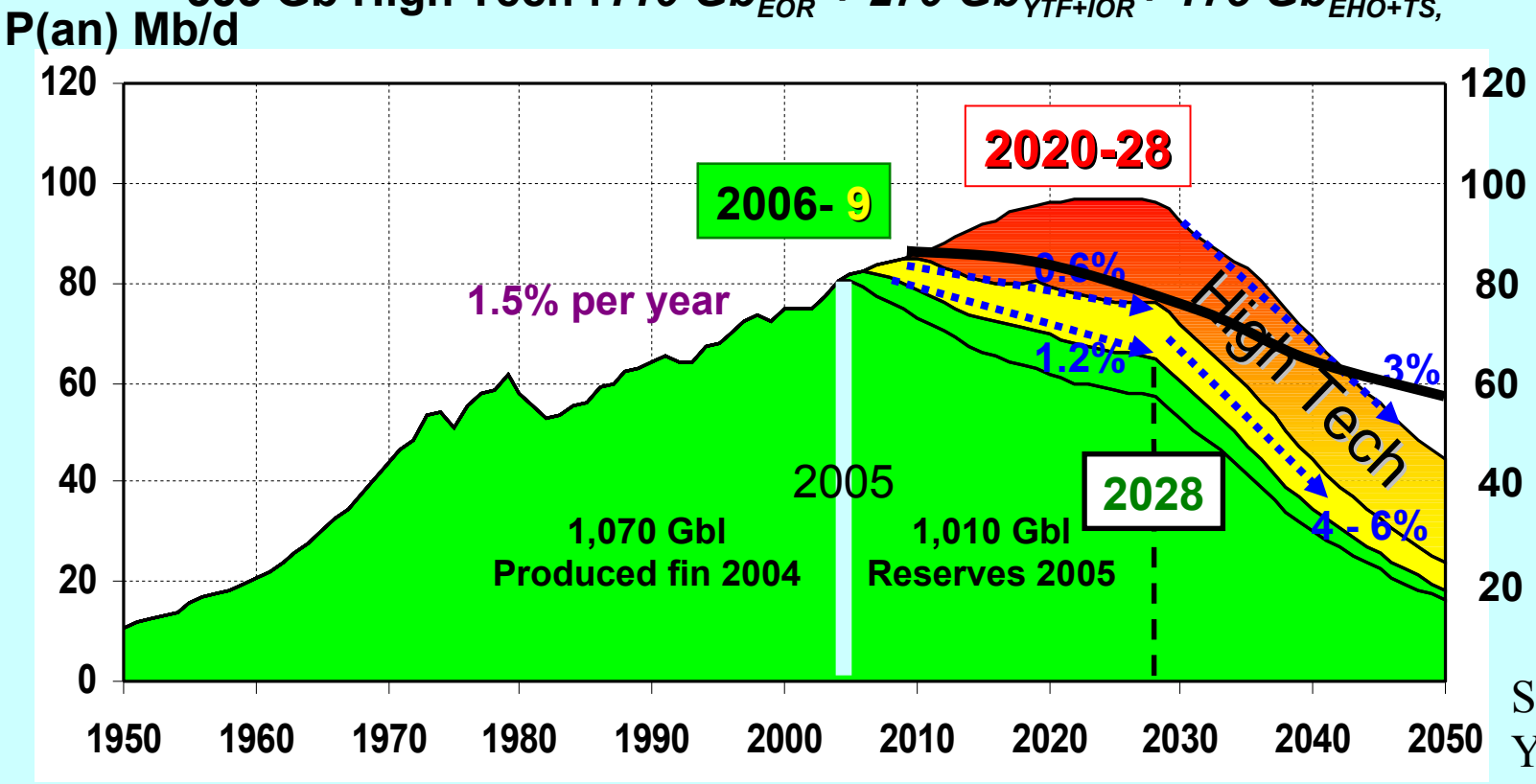
Energies de stock : limite de production

Σ^{∞}_{0} P(an) = quantité totale extractible = P(2004) + R(2004)

SCENARIO MOYEN : 1,700 Gb quantité restante incluant :

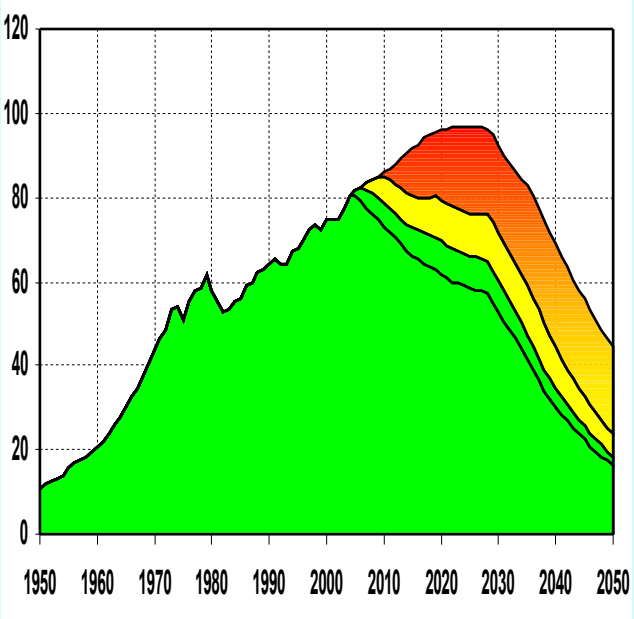
120 Gb Discovered not yet produced

555 Gb High Tech : ***110 Gb_{EOR} + 270 $Gb_{YTF+IOR}$ + 175 $Gb_{EHO+TS,}$***

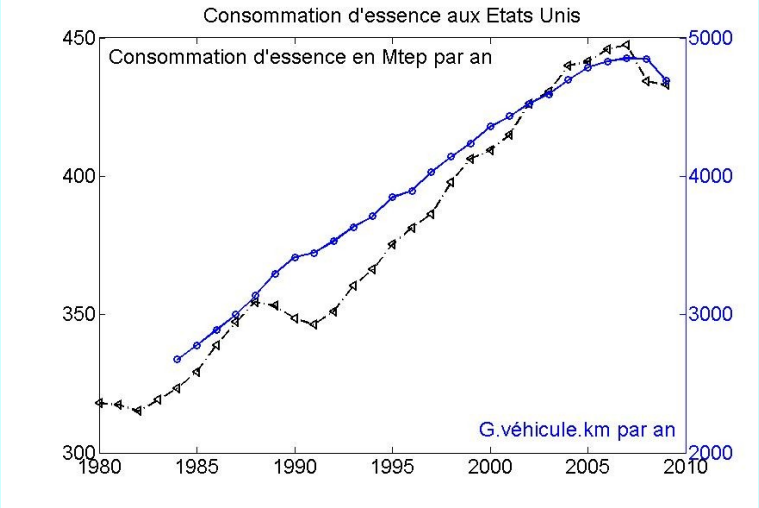


Source :
Yves Mathieu IFP 2006

Pic de pétrole + consommation accrue = le choc



+



= ???!!

Maximum de production pétrolière

Croissance de la consommation dans le pays le plus développé, hors choc

Véhicules électriques et hybrides ?

Energies de stock : oui, mais...

C réduit fossile

CO_2 ---> C + O_2 → atmosphère (4%)

O_2 → oxydes de fer, sulfates (96 %)

résidus de photosynthèse

sur récents 600 M.an

~ 10 000 Tt_C ou 7 500 $Ttep_{EP}$

U

2,7 g/t_U dans la croûte terrestre x 2 800 Pt = 7,5 Tt_U

~ 80 000 $Ttep_{EP}$ (REP)

~ 14 000 000 $Ttep_{EP}$ (potentiel, surrégénérateur/cycle fermé)

E.P. = 0,0122 Ttep/2009

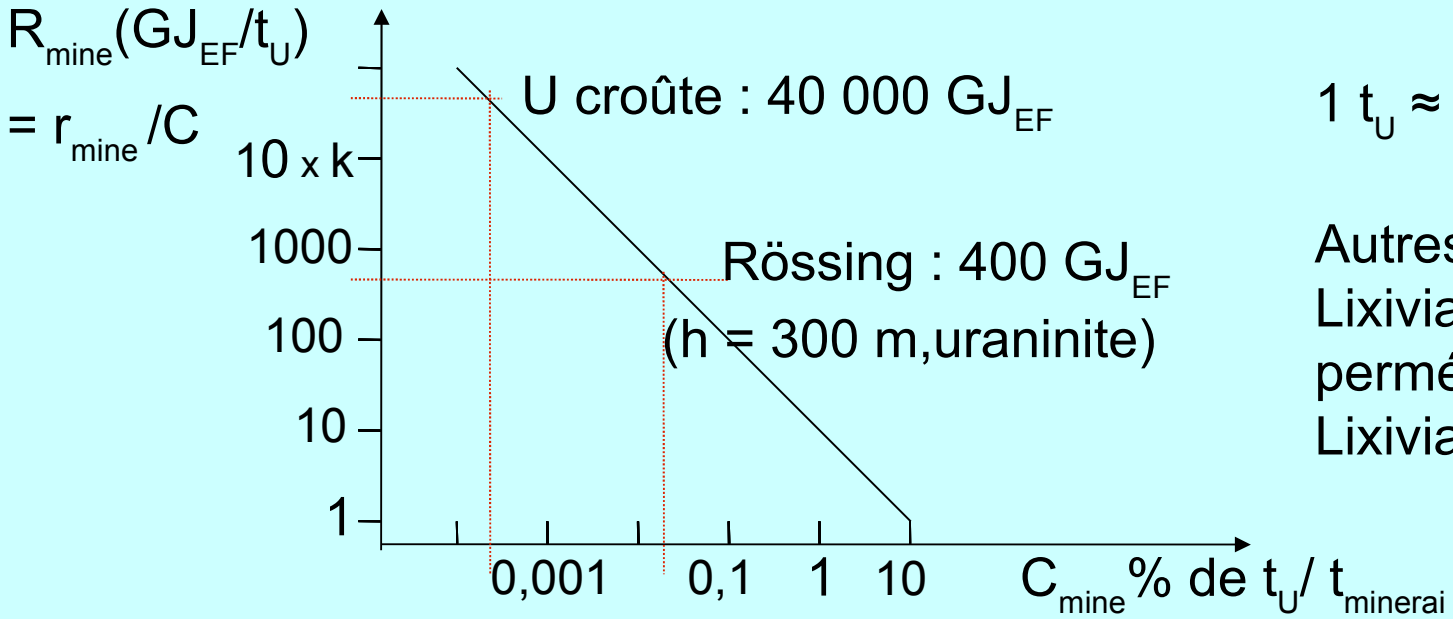
Energies de stock : réalité/réserve

C réduit fossile

réserve initiale ~ 10 Tt_c dont plus de 0,6 déjà produit

U

taux de consommation mine à ciel ouvert : r_{mine} ~ 0,1 $GJ_{EF}/t_{minerai}$
(mine U de Rössing, mines de fer, charbon...)



1 t_U ≈ 150 000 GJ_e (REP)

Autres procédés :
Lixiviation in situ ; si roche perméable !
Lixiviation en tas...

gisement extractible = suivant efficacité des procédés adaptés
= suivant caractéristiques du gisement

Relation ressource/efficacité

R dépend des caractéristiques de la ressource

Concentration énergétique entre ressources ($E_{entrée}$ par m^3) :

1 m^3 de minerai à 0,1%m U libèrera via un REP plus de 1 TJ_{th}

1 m^3 de pétrole brute contient env. 40 GJ_{PCS}

1 m^3 de gaz naturel aux conditions ambiantes contient env. 40 MJ_{PCS}

1 m^3 d'eau sur 100 m de hauteur fournit env. 1 $MJ_{méca}$

1 m^3 d'air à 25 km/h contient env. 30 $J_{méca}$ (la moitié récupérable)

=> Taux de perte E_{perte} par m^3 (= r_j) doit être inférieur à $E_{entrée}$ par m^3 (= $1/w_j$). **L'énergie éolienne part avec un lourd handicap !**

Bilan CO_2 fossile ≠ bilan énergie

Objectif : estimer l'émission équivalente de CO_2 **fossile** d'une filière

Le bilan CO_2 dépendant du bilan énergie

MAIS pas le même objectif et donc pas les mêmes résultats

$$g_{CO2}/MJ_{entrée} : \quad e_{CO2} = \Sigma R_j \,.\, coeff_j CO_2 + \delta \,.\, coeff_{en} CO_2$$

Combustibles fossiles = 1

Autres énergies = 0

$coeff_e CO_2$(charbon) : $CH + 3/2\ O_2 \text{--->} 1/2\ H_2O + CO_2 + \Delta H$

$13\ g \text{--->} + 44\ g + 480\ kJ_{PCS}$

D'où env. pour le charbon 90 g_{CO2}/MJ_{PCS} ou 270 g_{CO2}/MJ_e (centrale elc 33%)

Bilan CO_2 fossile

Cannette de votre boisson en Al

15 g_{Al}

Bauxite → 60 GJ_e/t_{Al} → 0,90 MJ_e

- → Pologne 270 g_{CO2}/MJ_e → 240 g_{CO2}
- → Norvège 9 g_{CO2}/MJ_e → 8 g_{CO2}

Recyclage → 4 GJ_e/t_{Al} → 0,06 MJ_e

- → Pologne 270 g_{CO2}/MJ_e → 16 g_{CO2}
- → Norvège 9 g_{CO2}/MJ_e → 0,5 g_{CO2}

Pour un même objet vous pouvez avoir le bilan CO_2 que vous voulez

Résumé 1ère partie

Étude de l'efficacité d'une chaîne de procédés industriels à transformer une ressource naturelle en une énergie utile

>Diffère du bilan financier qui agrège beaucoup d'autres facteurs de plus court terme plus ou moins importants pour nos économies (hom.heures, profits...).

>Diffère de la consommation finale par la société et les hommes. Sobriété/gaspillage.

>Diffère de l'abondance d'une ressource ; mais dépend de ses caractéristiques.

>Diffère du bilan de CO_2 équi. émis par l'homme. Données de base communes.

L'efficacité énergétique

Contraintes imposées à la filière et à son efficacité

- Procédés au moins en pilote industriel (non en laboratoire ; extrapolable). Durée de vie estimée des équipements. Fiabilité.
- Minimum de rentabilité économique : productivité, amortissement des équipements, qualité des produits...
- Flux contraint à la demande (compenser les intermittences).
- Contrôle des pollutions (neutralisation de DBO, CO et NH_3 par oxydation, NOx par réduction, désulfuration par H_2, piégeage par absorbeur...). N.B. : polluants en faible concentration > consommations faibles.
- Sécurité et sûreté (procédures, enceintes supplémentaires...).

L’efficacité énergétique

Introduction - liens avec d'autres indicateurs

-Efficacité économique,

-Sobriété des consommateurs,

-Abondance des ressources énergétiques,

-Bilans CO_2...

Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

-Résolution pratique et formalisme. Cas de la fabrication d'un téléphone et de la production d'agroethanol.

-Systèmes énergétiques auto-suffisants.

L’efficacité énergétique

Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

-Résolution pratique et formalisme.

Cas de la fabrication d'un téléphone.

« Analyse de cycle de vie »

Etude depuis l'extraction. D'accord sur le principe.
Mais en pratique ?

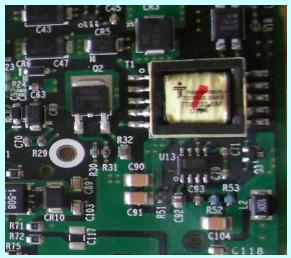
Energie de fabrication d'un téléphone IP (CISCO 7940G) à partir d'une base de données commerciale (cas d'étude E. Boulanger chez France-Télecom fin 2008).

Base de données = taux de fabrication $\mathbf{r_j}$ **en** $\mathbf{MJ_{EP}/kg_j}$ de composants électroniques et de matériaux *j*.

Stage = travail de démontage, d'identification et de pesage. Plus de 80 composants !

$$\mathbf{R_j = r_j \times w_j}$$

$\mathbf{MJ_{EP\text{-}j}/télph}$ $\mathbf{kg_j/télph}$



« Analyse de cycle de vie »

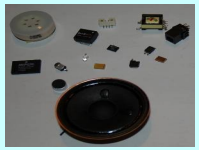
Résultats :

$R_{tél}$= 1270 MJ_{EP}/télph

Dont : écran cristaux liquides 5" passifs, N/B, 145x200 px, 88 cm^2.

61,6 g=> R_{LCD}= 880 MJ_{EP} ou 69 % !?!

transformateurs HP



7,6 g=> R_{HP}= 150 MJ_{EP} ou 12 % !?

coques plastiques

810 g=> R_{plst}= 110 MJ_{EP} ou 8,6 %

puces

8,7 g=> R_{pc}= 47 MJ_{EP} ou 3,6 % ?

« Analyse de cycle de vie »

Informations disponibles :

Composant	Source des données	Date	Description de ce que contient la donnée
Transformateur basse tension	Etude [illegible] XXXXXX	1995	Pas d'information
Ecran LCD (TN/STN monochrome)	Etude [illegible] XXXXXX 3 fabricants asiatiques	2003	Pas d'information
Circuit intégré	Etude [illegible] XXXXXX XXXXXXX (5 fabricants)	2007	Le module comprend l'ensemble des données de l'extraction des matières premières jusqu'au site de fabrication du produit. Etapes incluses : le transport de l'extraction des matières premières aux fournisseurs Etapes non incluses : le transport entre le fournisseur et la fabrication du produit final

Aucun moyen de recalculer depuis les données de base.

Appel à d'autres bases de données avec encore moins de détails.

Quelles conversions énergies primaires/énergies finales choisies ?

Bon choix du taux local r_j (MJ/kg) ?

« Analyse de cycle de vie »

Masse : essentiellement du verre plat. Four à verre sodocalcique « floaté » à 500 t/j -> 6,5 MJ_{pcs}/kg_{verre} de fioul d'où env. $r_{LCD} \sim 10\ MJ_{tot}/kg_{verre}$ ou $\mathbf{R_{LCD}^{cisco} = 0{,}6\ MJ/télph}$!!

r_{LCD} : MJ/cm² ou MJ/px ?

> US-EPA/Socoloff 2005 : écran Thin FilmTransitor 15", couleur, 705 cm², 1 024 x 768 px → 2 073 MJ ou $r_{LCD} \sim 2{,}9\ MJ/cm^2$ ou 2,6 kJ/px.

Si $r_{LCD} = 2{,}9\ MJ/cm^2$: $\mathbf{R_{LCD}^{cisco} = 255\ MJ/télph.}$ Mais TFT, 1100 px/cm² et 24 bit/px. LCD cisco : TN, 330 px/cm² et 1 bit/px

Si $r_{LCD} = 2{,}6$ kJ/px : $\mathbf{R_{LCD}^{cisco} = 76\ MJ/télph}$. Mais TFT et 24 bit/px

> Samsung Elc. 2008, LCD TFT couleur : $r_{LCD} < 0{,}46\ MJ_e/cm^2 + 0{,}05\ MJ_{pcs}/cm^2$

Alors ?

« Analyse de cycle de vie »

- Décomposition d'un système complexe en sous-systèmes/opérations *j* plus simples et en série/additives : $\mathbf{R_{tot} = \Sigma\ R_j}$ **en** $\mathbf{J/L_{syst}}$

- Utilisation d'un taux de consommation spécifique à l'opération (but) et son procédé (moyen), ou taux local : $\mathbf{r_j}$ **en** $\mathbf{J/L_j}$

Détails physico-techniques (flux matière/énergie - différentes souces, connaissances établies...).

Idéalement, choix de r_j tel que constant pour le procédé.

- Poids du procédé *j* et r_j dans système avec variable w_j, ou passage du taux local au taux global : $\mathbf{R_j = r_j \times w_j}$ **avec** $\mathbf{w_j}$ **en** $\mathbf{L_j/L_{syst}}$

- Energies directement utilisées E_D (élec., méca, chaud/froid, matériel...) :

$r_j \rightarrow r_{D\text{-}j}$ avec $\mathbf{r_{x\text{-}j} = \beta_x \times r_{D\text{-}j}}$, *x* procédé auxiliaire transverse.

L’efficacité énergétique

Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

-Résolution pratique et formalisme.

Cas de la production d'agroethanol.

Les agrocarburants en 2009

Ethanol (0,51 tep_{pci}/m^3) : **P(2009) = 37,6 $Mtep_{pci}$**

EUd'A : 20,4 Mtep *(conso. essence : 385 Mtep, 310 Mhab)*

Brésil : 12,6 Mtep *(conso. essence : 20 Mtep, 193 Mhab)*

UE-27 : 1,87 Mtep *(conso. essence : 105 Mtep, 500 Mhab)*

dont **France : 0,64 Mtep** *(conso. essence : 9 Mtep, 65 Mhab)*

Esters d'huile végétale (0,89 tep_{pci}/t) : **P(2009) = 14,2 $Mtep_{pci}$**

France : **1,75 Mtep** *(conso. diesel : 33 Mtep)*

Agrocarburants : 52 Mtep

(conso. Pétrole brut : 3 880 Mtep dont 55 % carburants)

Sources : Plateforme Biocarburants (RFA, EurObservER...), US DOE et British Petroleum Stat. Review of World Energy 2010.

Filières d'agroéthanol

Flux (par an ou jour...) :

canne à sucre (Brésil)
betterave (France)
maïs (EUd'A)
blé (France)

⇨ Σ Opérations(procédés) ⇨ L_{sortie} : J d'éthanol

⇧ E_{conso} : énergies primaires J_{EP}

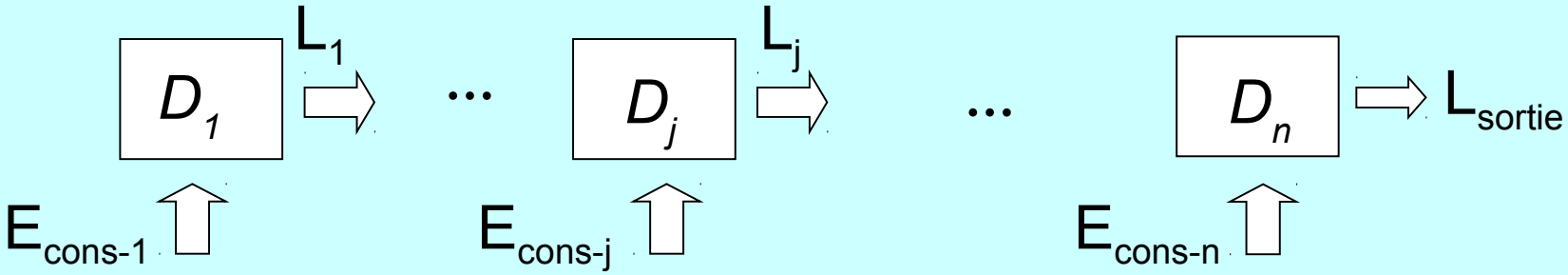
$$\text{Taux de consommation } R = \frac{E_{conso}}{L_{sortie}}(var_j) \quad J_{ep}.J_{etoh}^{-1}$$

Système complexe

=> décomposition en sous-systèmes plus simples

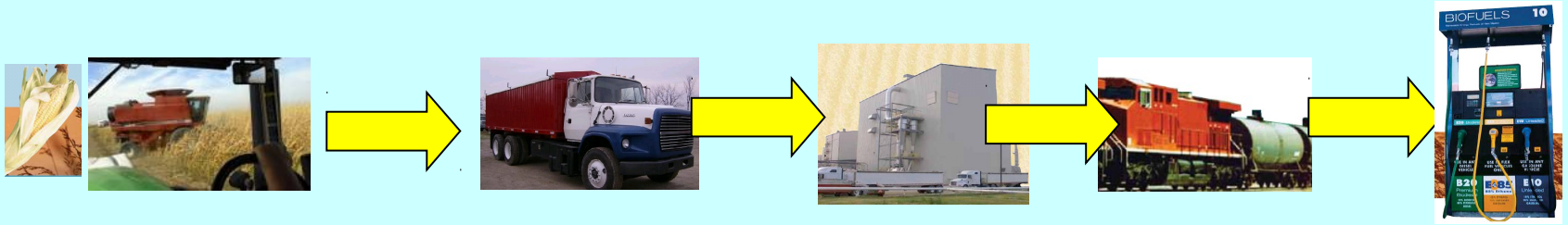
1 - Décomposition et collecte de données

Décomposition en opérations/sous-opérations de flux identifiables



Décomposition en série : $R = \Sigma R_j$ $\qquad R_j = \dfrac{E_{conso-j}}{L_{sortie}}$

Exemple : agroéthanol de maïs



$E_{éthanol}$

1 - Décomposition et collecte de données

Ferme

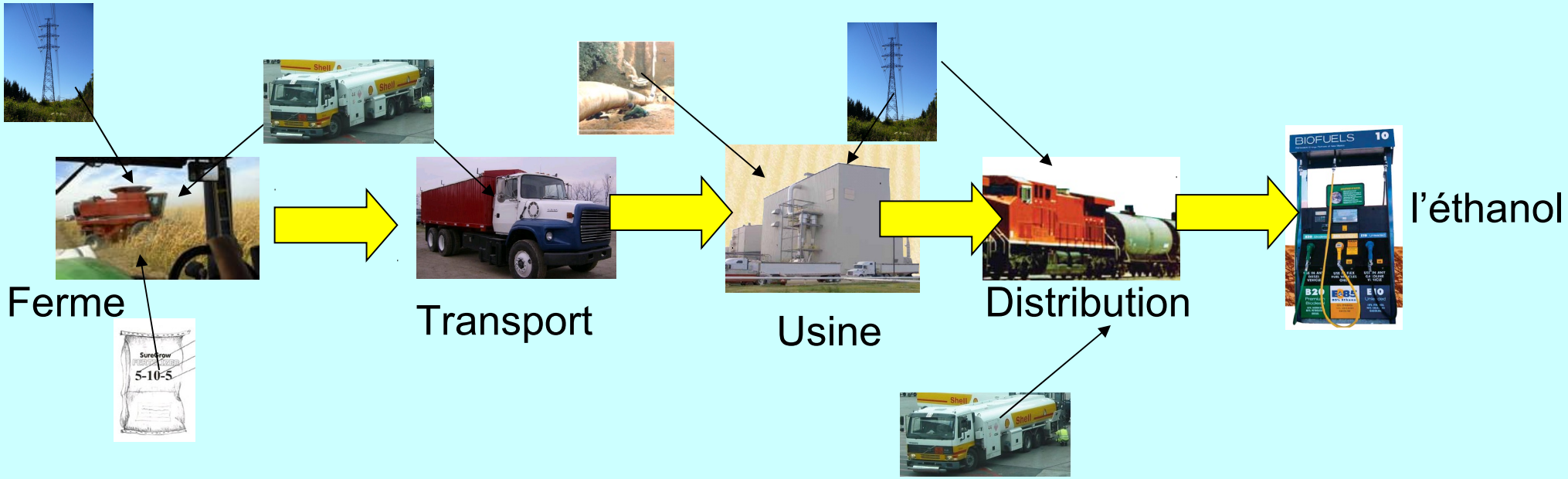
Transport

Usine

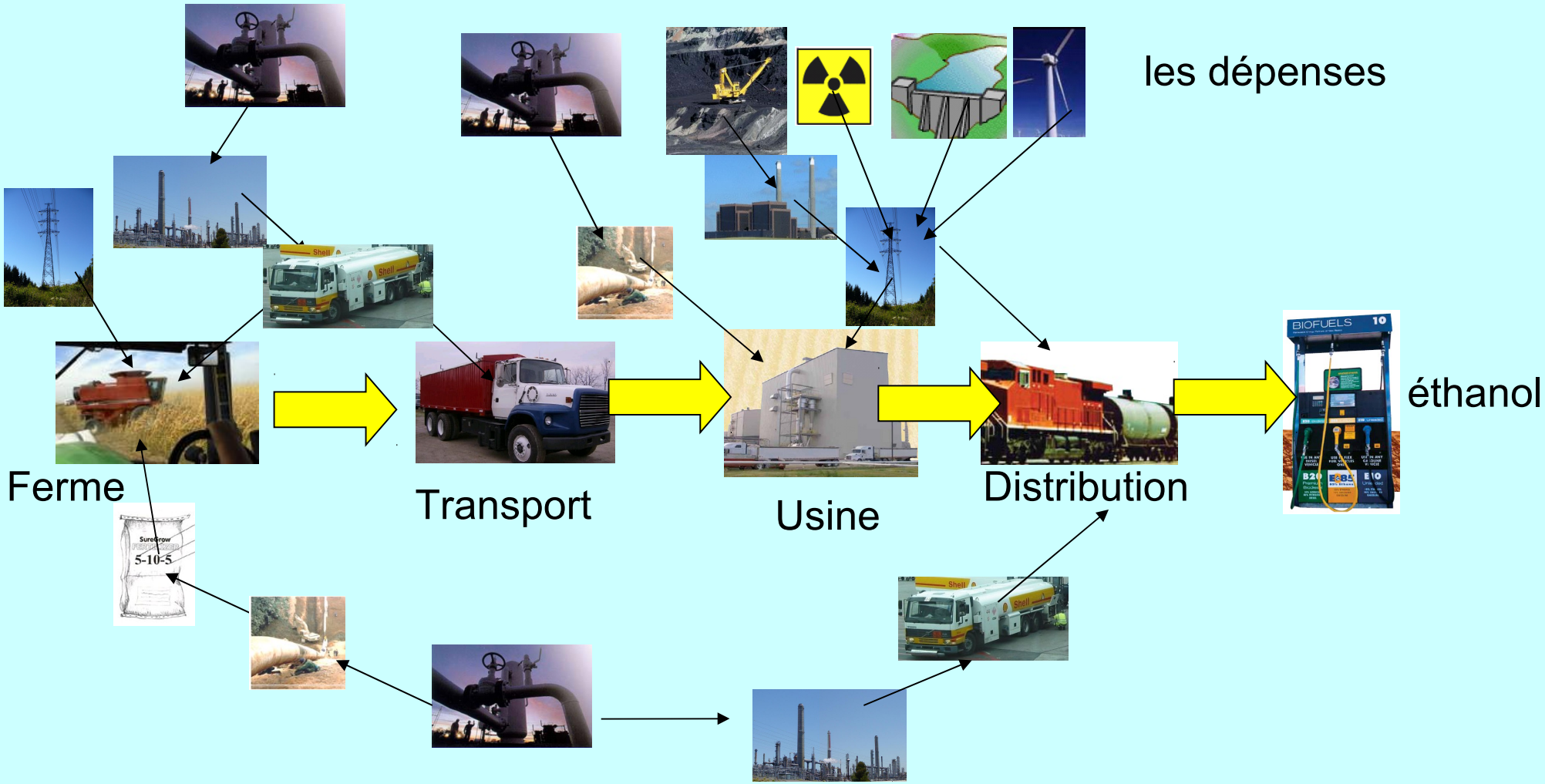
Distribution

éthanol

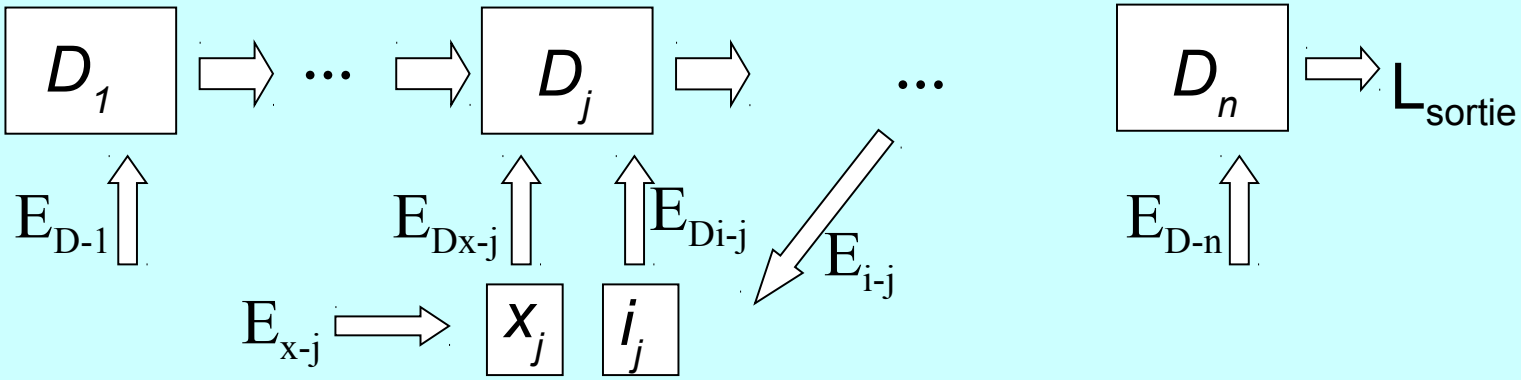
1 - Décomposition et collecte de données



1 - Décomposition et collecte de données



1 - Décomposition et collecte de données



Décomposition transverse : * $E_{x-j} = \beta_{x-j} E_{Dx-j}$

énergies primaires externes : pétrole, gaz naturel...

* $E_{i-j} = \beta_{i-j} E_{Di-j}$

énergies en interne : résidus, éthanol...

1 - Décomposition et collecte de données

Ferme

Opérations mécanisées → L_m

diesel, machines...

\+ Engrais N → L_N

$N(NH_3, AN...)$

\+ P, K, Ca... → L_j

Différents niveaux de décomposition.

Jusqu'où ?

Données sur les flux + poids en R_j.

1 - Décomposition et collecte de données

Données de base et détaillées sur les flux

Canne à sucre (Brésil) : articles scientifiques de I. Macedo 2004/8 d'après données coopératives agricoles et agences publiques pour l'état de Sao Paulo. Hassuani S. rapport PNUD 2005. Détails opérations pour des fermes types.

Maïs (USA) : Ministère de l'agriculture. Recensements 1991, 1996, 2001. Combustibles, engrais par ha et an, rendements. Moyennes par état. Rapport des producteurs de maïs.

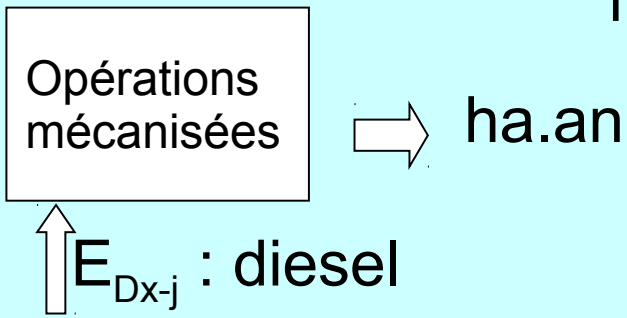
Blé et betterave (Europe) : étude ADEME/Dir Energie 2002, France, avec organisations agricoles. Rapport bureau d'étude agronomie Levington, 2000 Angleterre. Rapports de l'EPFL, Suisse. Détails par opération agricole et par culture. Relations rendement/apport d'engrais N/taux de N dans plante. Documents des fabricants européens d'engrais. Cahiers de l'agriculture durable.

Informations statistiques : surface, production par culture par an (gouvernement).

Beaucoup via l'Internet (accès mais pas source)!

1 - Décomposition et collecte de données

flux sur un cycle



1 cycle = 1 an (blé, maïs, betterave)
= 6 ans / 5 récoltes (canne)

consommation de diesel fonction du nombre d'ha planté (ramené à 1 an pour homogénéité)

> aussi du nombre d'opérations et de leur intensité (labourage, épandange...).

> dans une moindre mesure de la quantité récoltée.

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Opérations mécanisées

$r_{diesel\text{-}Fr}$: $J_{pci}.(ha.an)^{-1}$

canne à sucre : 4,6 $GJ_{pci}.(ha.an)^{-1}$

betterave : 6,6 $GJ_{pci}.(ha.an)^{-1}$

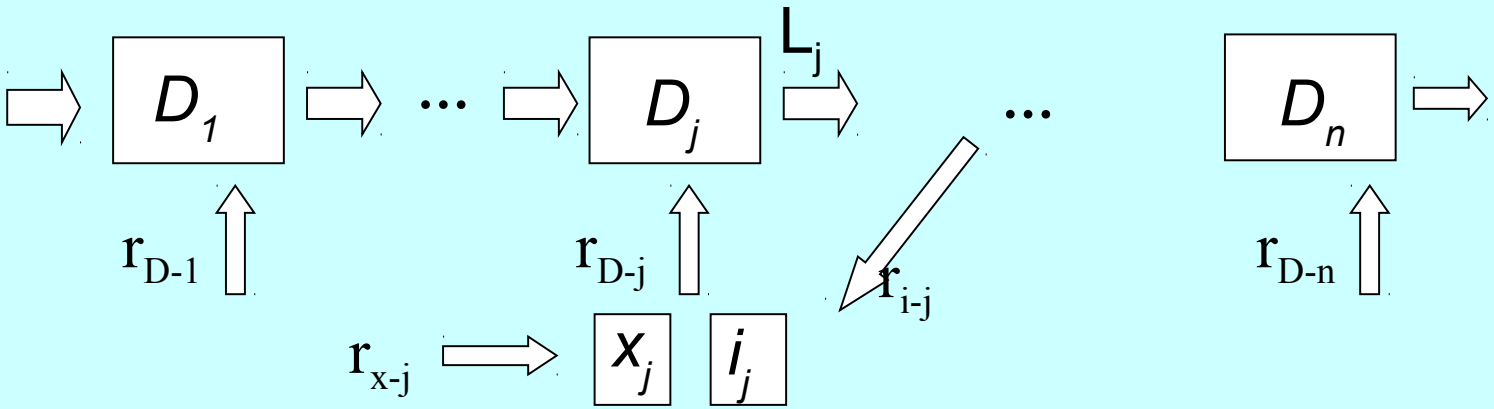
maïs : 2,4 $GJ_{pci}.(ha.an)^{-1}$

blé : 3,8 $GJ_{pci}.(ha.an)^{-1}$

Valeurs comparables malgré rendements agricoles correspondants Y_A de 73 à 9 $t_A.(ha.an)^{-1}$.

$r_{diesel\text{-}Fr}$ => ordre de grandeur pour autres cultures en l'absence de donnée.
A affiner avec le nombre d'opérations et leur intensité.

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

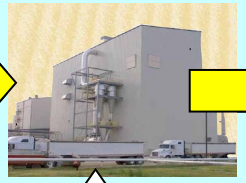


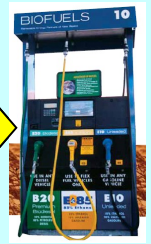
L_j : flux suivant le plus naturel ou usité pour D_j (masse, surface ou bit...)

$$r_{a-j} = \frac{E_{a-j}}{L_j}$$ (flux sur une période représentative)

Procédé/groupe de procédés D_j + r_{D-j} → modules → base de données

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j





$E_{éthanol}$

$r_{D\text{-}Fr}$ J par ha.an ou par tonne de récolte

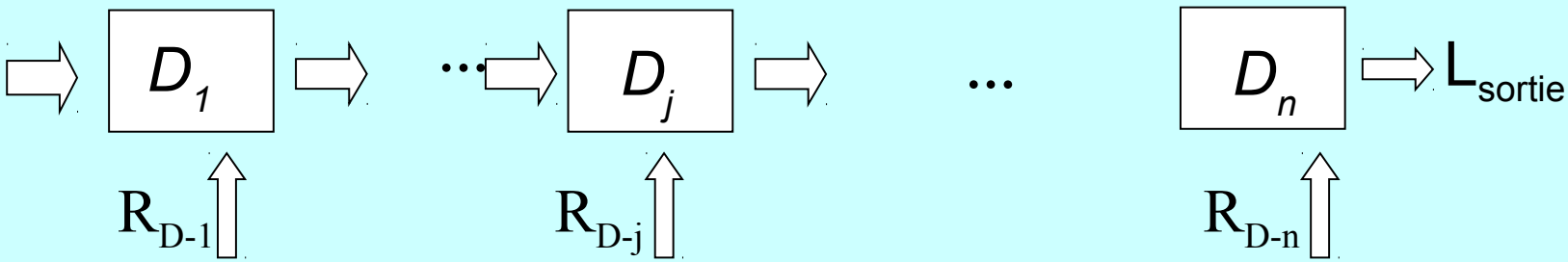
$r_{D\text{-}trans}$ J par tonne.km

$r_{D\text{-}Us}$ J par tonne ou par litre éthanol

$r_{D\text{-}dis}$ J par tonne.km

Mais r_j non comparables et non sommables

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j



$R_{D\text{-}j} = r_{D\text{-}j} \times w_j$ avec $w_j = \dfrac{L_j}{L_{sortie}}$ = poids de D_j dans la filière

w_j = un paramètre physico-technique

$$\mathbf{R_j = r_j \times w_j}$$

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

$E_{éthanol}$

J_{etoh}

$r_{D\text{-}Fr}$ $J_D/ha.an$ ou J_D/t_A

w_{ferme} : $ha.an/J_{etoh}$ ou t_A/J_{etoh}

$r_{D\text{-}trans}$ $J_D/t_{ch}.km$

w_{trans} : $km.t_A/J_{etoh}$

$r_{D\text{-}Us}$ J_D/t_A ou J_D/J_{etoh}

w_{usine} : t_A/J_{etoh} ou 1

$r_{D\text{-}dis}$ $J_D/t_{ch}.km$

w_{dis} : $km.t_{etoh}/J_{etoh}$

$$R_j = r_j \times w_j \qquad J_{D\text{-}j}/J_{etoh}$$

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Analyse avec R_j

Pourquoi R_j ? (opérations j en série et même dénominateur).

- Comparaison entre opérations avec R_j ; identification des plus énergivores.

- Analyse plus poussée sur ces opérations (travail itératif).

- Sommation des R_j => R.

- Etude influence des paramètres techniques sur R ; tester nouveaux procédés (r_j).

Prévoir les améliorations ou limites sur R.

- Comparaison avec d'autres filières en utilisant le même R.

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Opérations mécanisées

$r_{diesel\text{-}Fr} : J_{pci}.(ha.an)^{-1} \xrightarrow{\times\, w_{ha} : (ha.an).J_{etOH}^{-1}} R_{diesel\text{-}Fr} : J_{pci}.J_{etOH}^{-1}$

> $w_{ha} = (Y_A)^{-1} \times w_A$ $\quad$ $\mathbf{Y_A}$ en $t_A.(ha.an)^{-1}$; w_A en $t_A.J_{etOH}^{-1}$

> $w_A = (x_s)^{-1} \times (y_{etOH})^{-1} \times (PCI_{etOH})^{-1}$ $\quad$ $\mathbf{x_s}$: sucre ou amidon en $t_s.t_A^{-1}$

> y_{etOH} : taux de production d'ethanol en $t_{etOH}.t_s^{-1}$ (usine)

glucose > ethanol + CO_2 $\quad$ $y_{etOH} = 0{,}511 \times \alpha_{etOH}$

amidon + eau > ethanol + CO_2 $\quad$ $y_{etOH} = 0{,}568 \times \alpha_{etOH}$

$\boldsymbol{\alpha_{etOH}}$: taux de conversion sucre/amidon en ethanol < 1 (<0,94)

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Opérations mécanisées ⇨

$$r_{diesel\text{-}Fr} \times (Y_A)^{-1} \times (x_s)^{-1} \times (0{,}511/0{,}568 \times \alpha_{etOH})^{-1} \times (PCI_{etOH})^{-1} = R_{diesel\text{-}Fr}\ J_{pci}.J_{etOH}^{-1}$$

CS : $4{,}6 \times (73)^{-1} \times (0{,}145)^{-1} \times (0{,}511 \times 0{,}83)^{-1} \times (26{,}8)^{-1} = 4{,}8\ \%$

BS : $6{,}6 \times (66)^{-1} \times (0{,}180)^{-1} \times (0{,}511 \times 0{,}83)^{-1} \times (26{,}8)^{-1} = 5{,}5\ \%$

M : $2{,}4 \times (8{,}8)^{-1} \times (0{,}62)^{-1} \times (0{,}568 \times 0{,}92)^{-1} \times (26{,}8)^{-1} = 4{,}0\ \%$

B : $3{,}8 \times (9{,}0)^{-1} \times (0{,}57)^{-1} \times (0{,}568 \times 0{,}91)^{-1} \times (26{,}8)^{-1} = 6{,}6\ \%$

L'étude des séries agricoles montre que les améliorations sur w_{ha} viennent surtout de Y_A et sont faibles. Progrès sur $r_{diesel\text{-}Fr}$?

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Filière pétrolière > β_{diesel} en $J_{brutPCS}/J_{dieselPCI}$

Champ **Transport** **Raffinerie** **Distribution**

Pétrole& gaz

$E_{raffiné}$

R_{champ} = 2,3+/-0,2% (Total)

$R_{transport}$ = 0,5 + 1,1% 1000+5000km

$R_{raffinerie}$ = 7,1+/-0,1% (Fr. 2008)

$R_{distribution}$ = 0,75+/- 0,1%

$$E_{brut} = E_{diss} + E_{raffiné}(E_{dieselPCS})$$ **système quasi fermé**

$$R_j : J_{diss}/J_{brut} \Rightarrow \beta_{diesel} \approx 1/(1-\Sigma R_j) \times PCS/PCI = 1,17$$

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

N.B. : filière pétrolière aux EU d'A

Champ **Transport** **Raffinerie** **Distribution**

Pétrole& gaz

R_{champ} = 10% ?
(cas de la Californie)

$R_{transport}$ = 0,5%
1000 km

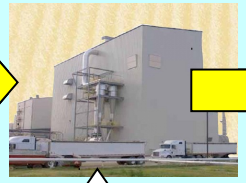
$R_{raffinerie}$ = 12%
(EUd'A 2008)

$R_{distribution}$ =
0,75+/- 0,1%

$R_j : J_{diss}/J_{brut}$ => $\beta_{diesel} \approx 1/(1-\Sigma R_j) \times PCS/PCI = 1,35$

2 - Taux locaux r_j et globaux R_j

Cas maïs/EUd'A avec $R_{x\text{-}j}$ = J d'EP pour 100 J_{etoh}



$E_{éthanol}$
100 J_{etoh}

$R_{x\text{-}fr} \approx 17\ J_{EP}$
diesel ≈ 3,7 J_{EP}
N(Gaz) ≈ 9 J_{EP}
sans irrigat.

Gaz + élec.
+ diesel

$R_{x\text{-}trans} \approx 2{,}9\ J_{EP}$
15+80 km
6t+25t cap.

Diesel

$R_{x\text{-}us1} \approx 62\ J_{EP}$
type 2007
($R_{x\text{-}us2} \approx 31\ J_{EP}$
résidus non séchés,
cogénération)

Gaz + élec. +
synthétiques

$R_{x\text{-}dist} \approx 1{,}6\ J_{EP}$
2000+50 km
train+camion

Diesel

$R \approx 17 + 2{,}9 + 62 + 1{,}6 = 84\ \ J_{EP}/100\ J_{etoh}$

3 - Erreurs systématiques et incertitudes

Sans soin, facilement erreurs insoupçonnées d'un facteur 2 à 3

-erreur sur les données utilisées. Dans la source primaire (erreur sur les moyennes census 2001 USA), données de flux incomplètes, surestimation/oublis ou par utilisation d'une source secondaire avec données mal interprétées (erreurs de conversion ou hypothèses non explicitées),

-imprécision des données ; type d'énergie (direct ? primaire ?), PCI ? PCS ? m^3 (n) ou (s) ? caractéristiques des flux (flux solaire par m^2 normal, horizontal ou incliné à angle fixe et total ou direct ? humidité du produit entrant ?),

-nos propres erreurs/imprécision lors des conversions. Hypothèses incorrectes,

-niveau d'agrégation : trop (moyenne sur 9 Etats USA), ou pas assez. Cas consommation dans Nebraska, 2 à 5 fois plus élevée à cause irrigation.

3 - Erreurs systématiques et incertitudes

-Utiliser indices (J_e, J_{tot}, J_{pci}, m^2_h , $m^2_\perp$, m^2_{in}), unités complètes + précision si ambiguïté (l[diesel]/km[aller]/t[charge] retour compris).

-Contrôler origine des données : primaire ou secondaire ? Compagnie ? Date ? Plusieurs sources réellement indépendantes pour comparaison ! Références techniques (quantitatives, précis) plutôt que commerciales (données interprétées ou trop qualitatives). Utiliser les redondances.

-paramètres importants et leur influence => culture scientifique et technique sur les procédés étudiés.

-Utilisation de relations établies en science (lois de conservation...) et en industrie (lois semi-empiriques) + valeurs tabulées.

-Niveau d'intégration ? Pays, région, compagnie, usine, procédé ? Valeur moyenne satisfaisante ou trop différente de notre cas particulier ? > rôle des paramètres.

3 - Erreurs systématiques et incertitudes

Traitement des incertitudes sur R_j

Au mieux précision de 2 ou 3% sur les données de base (ne pas confondre avec la résolution). Propagation d'erreurs sur R > théorie des variables aléatoires indépendantes avec distribution de probabilité normale.

$$R = \Sigma_j R_j = \Sigma_j r_j \; w_j \quad \text{->} \quad \text{écart type } \delta R \; (\delta r_j, \delta w_j)$$

$$\delta R^2 = \Sigma_j \, \delta R_j^2 \quad \text{et} \quad (\delta R_j/R_j)^2 = (\delta r_j/r_j)^2 + (\delta w_j/w_j)^2$$

N. B. : cas de deux taux de moyennes et incertitudes très différentes

$R = R_1 + R_2$ avec

> $R_1 = 0{,}05\ R$ et $\delta R_1/R_1 = 100\ \%$

> $R_2 = 0{,}95\ R$ et $\delta R_2/R_2 = 5\ \%$

$$\delta R^2 = \delta R_1^2 + \delta R_2^2 = 2\,(0{,}05)^2\,R^2$$

$\delta R/R = 1{,}4\ \delta R_2/R_2$ => R_2 impose son incertitude

4 - Consommations d'exploitation et d'investissement

Opérations mécanisées

$r_{diesel\text{-}Fr}$: $J_{tot}.(ha.an)^{-1}$

$r_{tr\text{-}Fr}$: $J_{tot}.(ha.an)^{-1}$?

<u>Consommations d'investissement</u> : r_{tr}' en $J_{tot}.(tracteur)^{-1}$.

Tracteur récent type : 6 tonnes, principalement acier (+ pneux...)

sources : fabricants Valtra, New Holland...

Filière acier recyclé : four élec + transports + usinage

> $\beta_{acier,recy} \sim 13\ GJ_{tot}/t_{acier}$

$r_{tr}' \sim 80\ J_{tot}.(tracteur)^{-1}$.

4 - Consommations d'exploitation et d'investissement

$r_{tr\text{-}Fr}$: $J_{tot}.(ha.an)^{-1}$?

<u>Consommations d'investissement</u> : $r_{tr}' \sim 80\ GJ_{tot}.(tracteur)^{-1}$.

$$r_{tr\text{-}Fr} = r_{tr}' \times w_{tr}'$$

$1/w_{tr}'$: nombre d'ha traités pendant la durée de vie du tracteur.

D'après fabricant Valtra : 22 kh possible pour ses tracteurs.

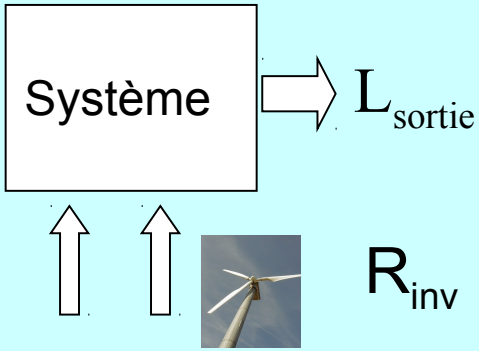
D'après US EPA un moteur diesel (voiture ?) : 4 kh à pleine charge.

Etudes Ademe et Levington : 4,6 - 5,2 h/ha.an de tracteur pour blé.

$1/w_{tr}' \sim 20$ kh/tr / 5 h/(ha.an) = 4 kha.an/tr (= 20 ans x 200 ha /tr)

$$\left.\begin{array}{ll} r_{tr\text{-}Fr} \sim 20\ MJ_{tot}.(ha.an)^{-1} & \delta r_{tr\text{-}Fr}/r_{tr\text{-}Fr} \sim 100\ \% \\ r_{diesel\text{-}Fr} \sim 4400\ MJ_{tot}.(ha.an)^{-1} & \delta r_{m\text{-}Fr}/r_{m\text{-}Fr} \sim 5\ \% \end{array}\right\} \text{D'où...}$$

4 - Consommations d'exploitation et d'investissement : principe



R_{expl} : $J_{expl}.(L_{sortie})^{-1}$

R_{inv} : $J_{inv}.(L_{sortie})^{-1}$?

<u>Consommations d'investissement</u> : r_{inv} en $J_{inv}.(equipm)^{-1}$.

$$R_{inv} = r_{inv} \times w_{inv}$$

$1/w_{inv}$: quantité de $\mathbf{L_{sortie}}$ **produit** pendant **durée de vie** de l'équipement.

L’efficacité énergétique

Introduction - liens avec d'autres indicateurs

-Efficacité économique,

-Sobriété des consommateurs,

-Abondance des ressources énergétiques,

-Bilans CO_2...

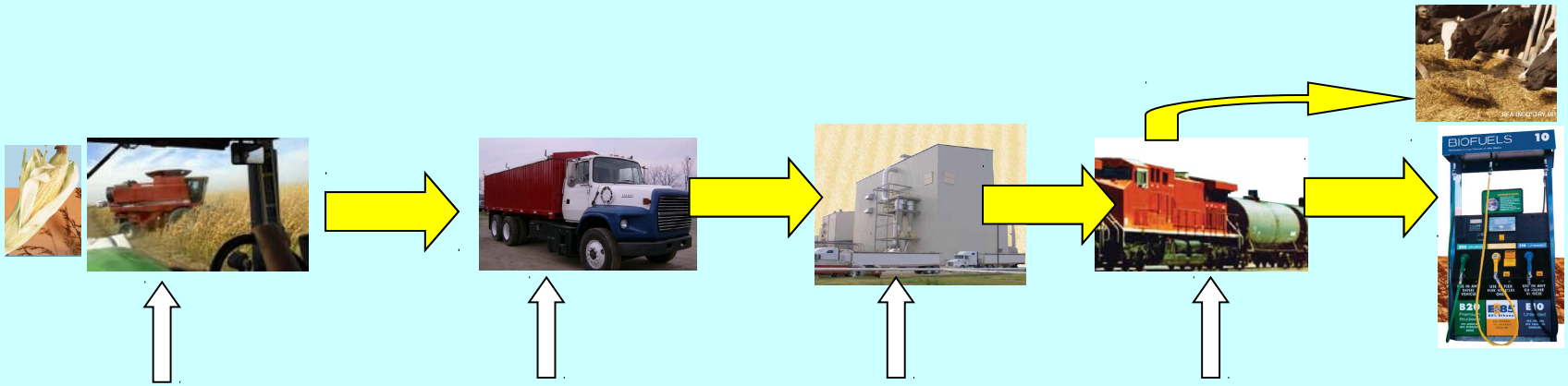
Des données brutes aux indicateurs d'efficacité

-Résolution pratique et formalisme. Cas de la fabrication d'un téléphone et de la production d'agroethanol.

-Systèmes énergétiques auto-suffisants.

5 - Choix d'un taux thermodynamique

Cas maïs/EUd'A 2007 avec $R_{x\text{-}j}$ = J d'EP pour 100 J_{etoh}



$R_{x\text{-ferme}} \approx 17\ J_{EP}$ $R_{x\text{-trans}} \approx 2{,}9\ J_{EP}$ $R_{x\text{-usine1}} \approx 62\ J_{EP}$ $R_{x\text{-dist}} \approx 1{,}6\ J_{EP}$

$R_{x\text{-maïsUSA}} \approx 84\ J_{EP}$

Totalité des flux énergétiques pour 100 J_{etoh}

entrée : 187 J_{pcs}
PCS mat. séche

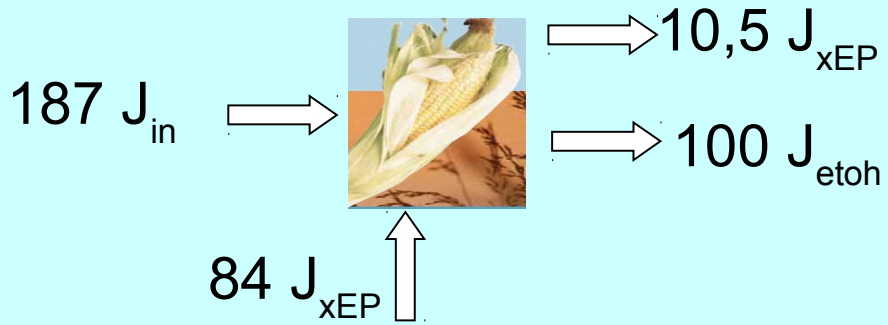
10,5 J_{xEP}

100 J_{etoh}

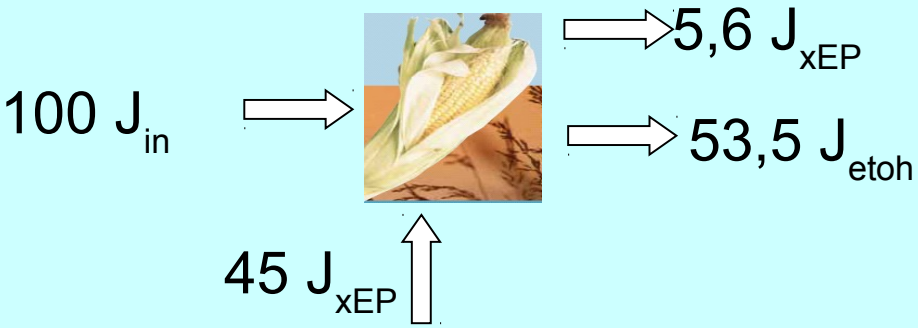
84 J_{xEP}

$R_x^{etoh} = 74{,}5\ J_{EP}$

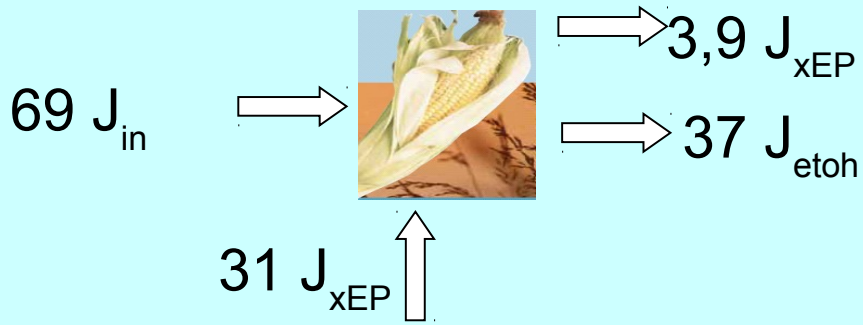
5 - Choix d'un taux thermodynamique



R_x^{etoh} = 74,5 J_{EP}/100 J_{etoh} : énergies externes rapportées à etoh



R_{x+i}^{in} = 86 J/100 J_{in} : énergies internes dissipées + externes rapportées à l'entrée



R_{x+i}^{x+in} = 59 J/100 J_{in+x} : énergies internes et externes ramenées à l'entrée et l'extérieur **=> < 1**

6 - Systèmes énergétiques auto-suffisants

*Bassin houiller de la Loire (1928) : 3,3 Mt charbon, 0,55 Mt coke...

- gaz de coke pour machineries mines (électricité) R ~ 2,5 %
- charbon pour le transport (locomotive vapeur) + marché local
- coke pour l'acier

*Filière pétrolière : système quasi-autosuffisant

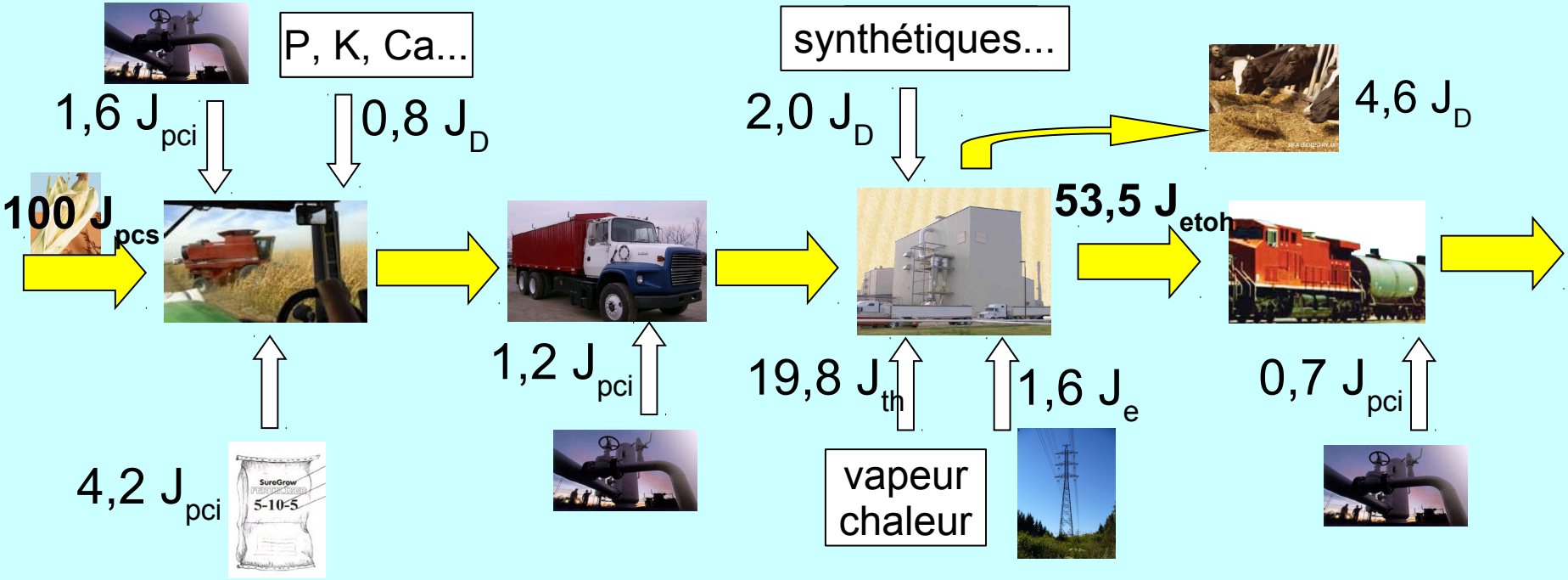
100 J_{in} ⇒ ⇒ 80 $J_{raffiné}$

$R_{x+i}^{x+in} \equiv R_i^{in}$
$= 20\ J/100\ J_{in}$

Filière agroethanol autosuffisante ?

6 - Système énergétique auto-suffisant

Maïs/EUd'A 2007 avec $R_{D\text{-}j}$ = J d'énergie directe pour 100 $J_{entrée}$



Procédés à l'ethanol :

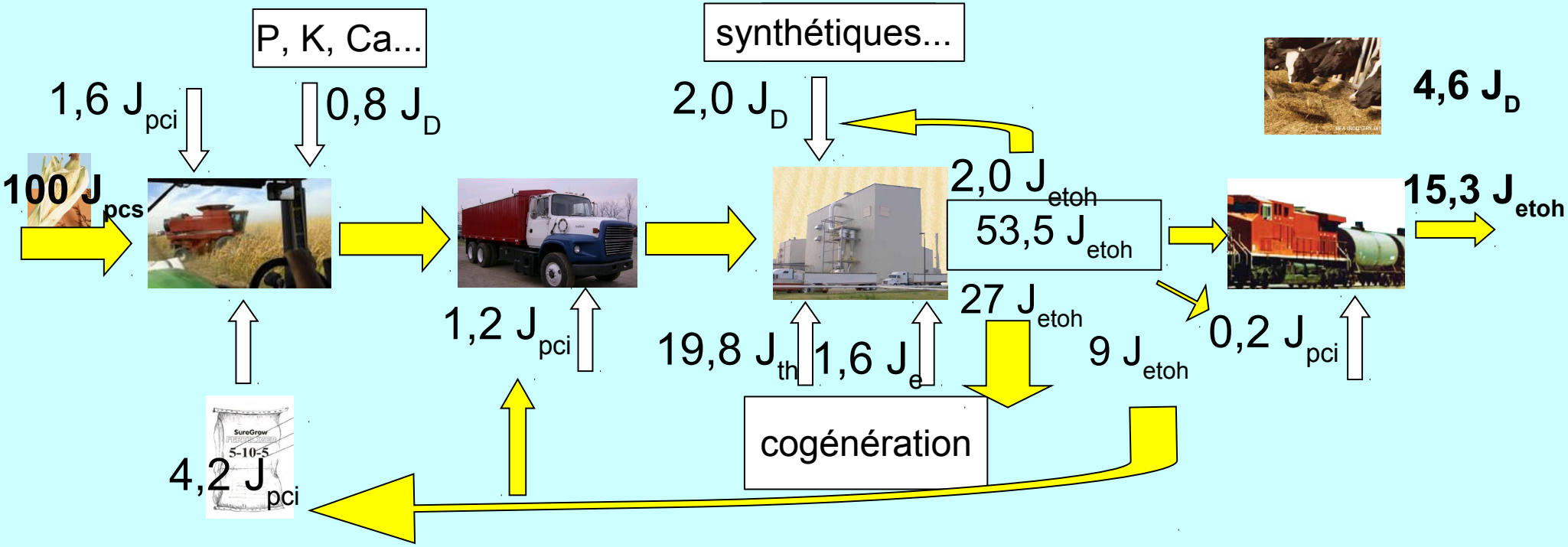
1 J_{pci} diesel ↔ 1 J_{pci} ethanol (bus à l'éthanol cycle diesel)

1 J_{pci} gaz pour NH_3 ↔ 1 J_{pci} ethanol (reformage vapeur)

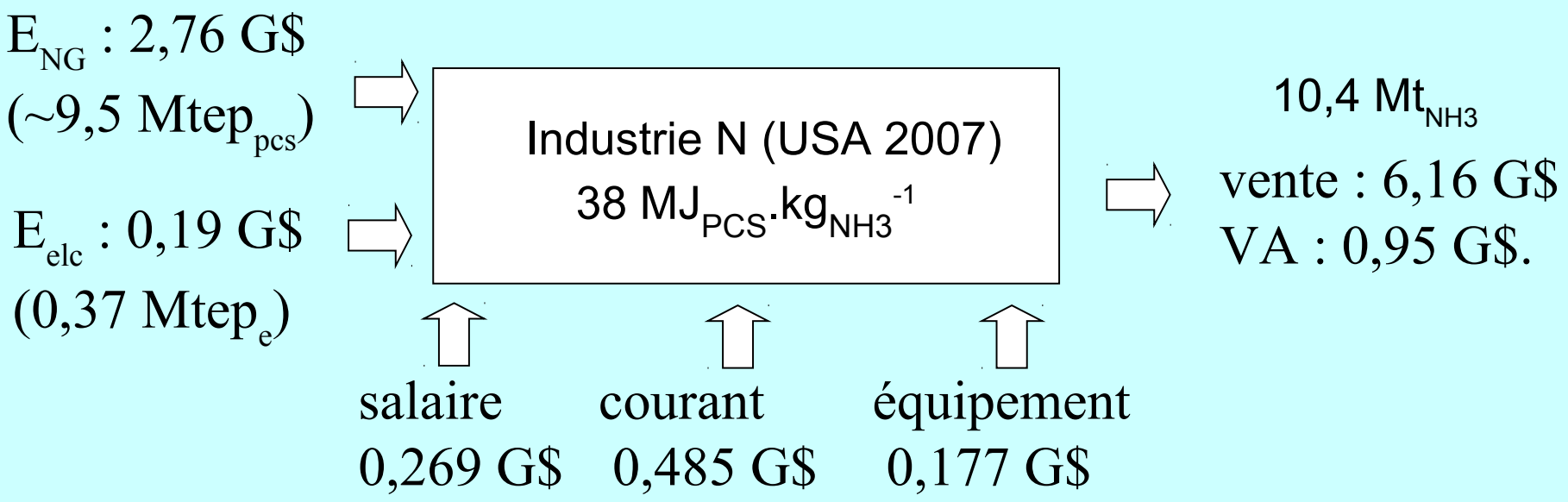
Thermique +élec usine ↔ cogénération éthanol (80% th+e/PCI)

6 - Système énergétique auto-suffisant

Maïs/EUd'A 2007 avec R_{D-j} = J d'énergie directe pour 100 $J_{entrée}$



Aspects économiques



Coût de l'énergie : 110 % de la valeur ajoutée ; 3640 kep_{EF} par k$ de VA

Industrie dite intensive en énergie (mais pas forcément inefficace).

En 2007 : fermeture des usines d'ammoniac inefficaces. Augmentation des importations de NH_3.

Source : USA gouvernement economic census 2007 (2011). ERS USDA 2007. USGS minerals info. 2011.

Aspects économiques

E_{NG} : 1,76 G$
(~11,5 $Mtep_{pcs}$)

E_{elc} : 0,12 G$
(0,255 $Mtep_e$)

Industrie N (USA 2002)
38 $MJ_{PCS}.kg_{NH3}^{-1}$

12,5 Mt_{NH3}
vente : 3,18 G$
VA : 0,95 G$.

salaire 0,267 G$
courant 0,285 G$
équipement 0,109 G$

Coût de l'énergie : 110 % de la valeur ajoutée ; 3640 kep_{EF} par k$ de VA

Source : USA gouvernement economic census 2007 (2011). ERS USDA 2007. USGS minerals info. 2011.