

L'efficacité énergétique des procédés industriels

Par X. Chavanne Physicien/Ing. Recherche

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

L'efficacité énergétique

Définition d'un indicateur.

Systemes industriels. Exemples

- Indicateur pratique : taux de consommations directes
- Indicateur plus complet : taux de consommations d'énergie primaire

Des données brutes à l'indicateur pour un système complexe.

Formalisme et résolution pratique

- Cas de la fabrication d'un téléphone
- Cas de la production d'agroethanol

L'efficacité énergétique

Définition d'un indicateur.

Systemes industriels. Exemples

- Indicateur pratique : taux de consommations directes
- Indicateur plus complet : taux de consommations d'énergie primaire

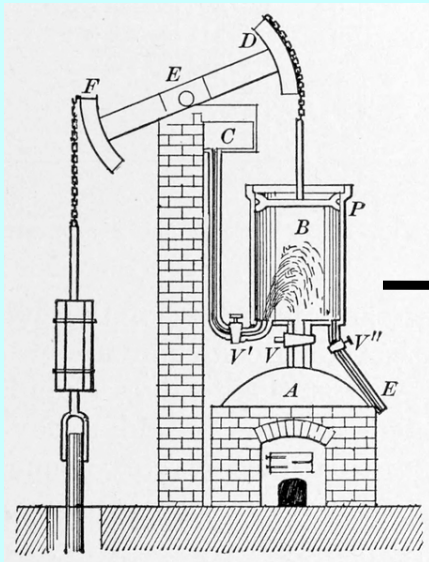
Des données brutes à l'indicateur pour un système complexe.

Formalisme et résolution pratique

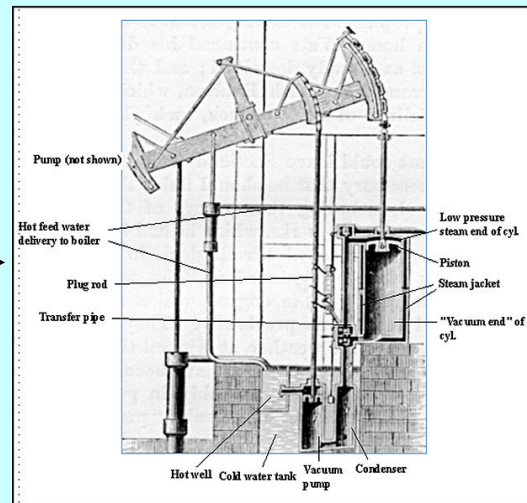
- Cas de la fabrication d'un téléphone
- Cas de la production d'agroethanol

Historique : la machine à vapeur

Th. Newcomen 1712



J. Watt 1769 (machine de
Chaillot à Paris 1780)



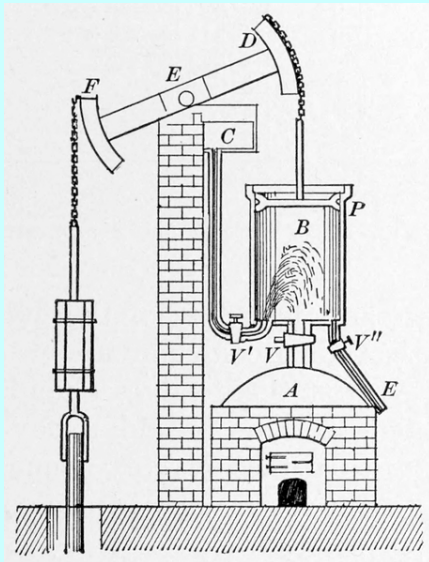
Progrès : condenseur
séparé....

Comment mesurer l'efficacité ?

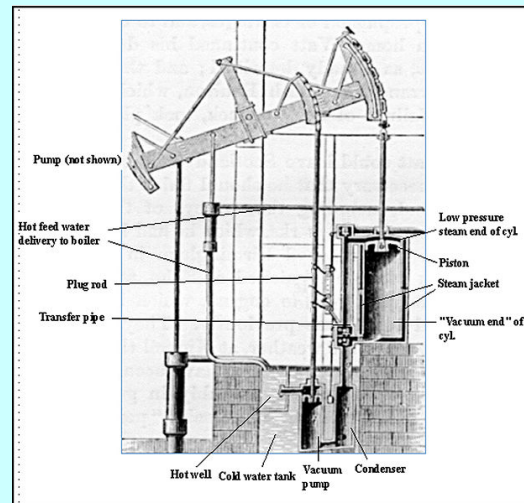
Historique : la machine à vapeur

Flux sur une durée (an, mois, cycle...) :

Th. Newcomen 1712



J. Watt 1769



⇒ F_{sortie} : travail de
pompage eau en m_w^3
d'eau par m_h de haut

Production/sortie

↑
 E_D : kg ou kcal_{PCI} (calorimètre) de charbon

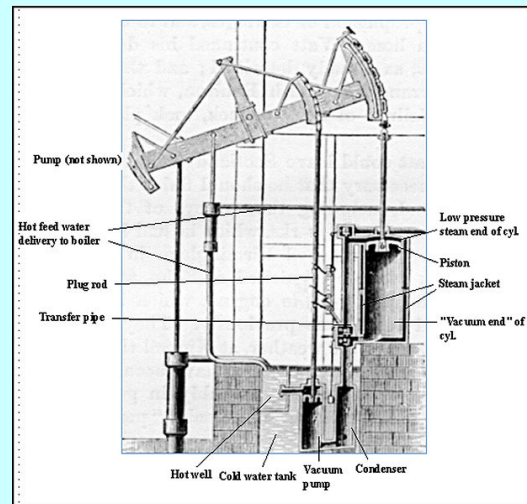
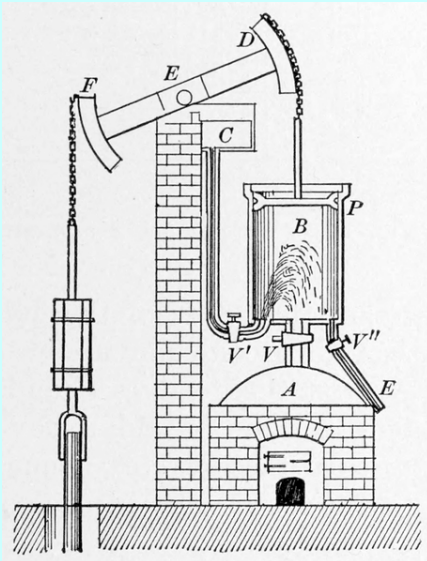
Consommation directe

Historique : la machine à vapeur

Flux sur une durée (an, mois, cycles...) :

Th. Newcomen 1712

J. Watt 1769



⇒ F_{sortie} : pompage eau

Taux de consommation

$$R_D^{\text{vap}} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}}$$

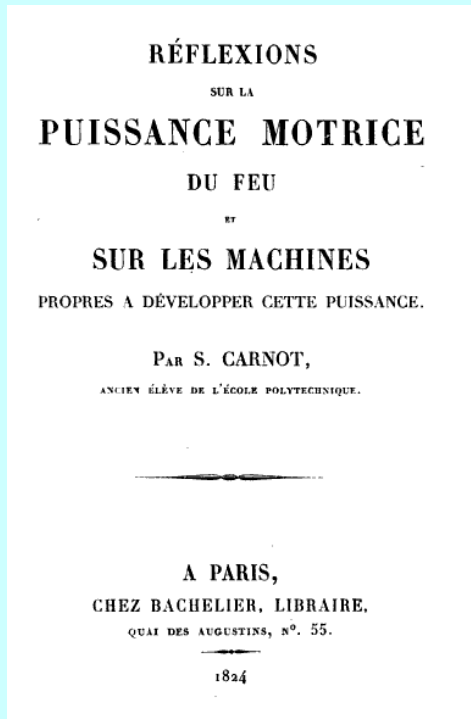
(rendement $Y_D = 1/R_D^{\text{vap}}$)

↑
 E_D : charbon

J. Watt : taux de consommation R_D^{vap} 4 fois moindre !

Source : rapport Académie des Sciences sur machine de Chaillot 1783 (d'après J. Payen 1965).

La machine à vapeur : les données



Voilà la puissance motrice d'un kilogramme de charbon.

Pour comparer ce résultat théorique avec les résultats d'expérience, examinons combien un kilogramme de charbon développe réellement de puissance motrice dans les meilleures machines à feu connues.

Les machines qui ont présenté jusqu'ici les résultats les plus avantageux sont les grandes machines à deux cylindres employées à l'épuisement des mines d'étain et de cuivre de Cornwall. Voici les meilleurs produits qu'elles aient jamais fournis.

65 millions de livres d'eau ont été élevées d'un pied anglais par boisseau de charbon brûlé (le boisseau pèse 88 livres). Cet effet équivaut à élever, par kilogramme de charbon, 195 mètres cubes d'eau à un mètre de hauteur, à produire par conséquent 195 unités de puissance motrice par kilogramme de charbon brûlé (*).

195 unités ne sont que le vingtième de 3920, maximum théorique : par conséquent $\frac{1}{20}$ seulement de la puissance motrice du combustible a été utilisé.

Nous avons cependant choisi notre exemple parmi les meilleures machines à vapeur connues.

(*) Le résultat que nous rapportons ici a été fourni par une machine dont le grand cylindre a pour dimensions 45 pouces de diamètre et 7 pieds de course ; elle est employée à l'épuisement d'une des mines de Cornwall, nommée Wheal Abraham. Ce résultat doit être considéré en quelque sorte comme une exception, car il n'a été que momentané et ne s'est soutenu que pendant un seul mois. Le produit de 30 millions de livres, élevées de 1 pied anglais par boisseau de charbon de 88 livres, est regardé généralement comme un excellent résultat des machines à vapeur. Il est quelquefois atteint par les machines du système de Watt, mais bien rarement dépassé. Ce dernier produit revient, en mesures françaises, à 104 000 kilogrammes élevés à 1 mètre de hauteur par kilogramme de charbon brûlé.

D'après ce que l'on entend ordinairement par force d'un cheval, dans l'évaluation des effets des machines à vapeur, une machine de 10 chevaux doit élever par seconde 10×75 kilogrammes, ou 750 kilogrammes, à 1 mètre de hauteur, ou bien, par heure, $750 \times 3600 = 2\,700\,000$ kilogrammes à 1 mètre. Si nous supposons que chaque kilogramme de charbon élève à cette hauteur 104 000 kilogrammes, il faudra, pour connaître le charbon brûlé en une heure par notre machine de 10 chevaux, diviser 2 700 000 par 104 000, ce qui donne $\frac{2700}{104} = 26$ kilogrammes. Or il est bien rare de voir une machine de 10 chevaux consommer moins de 26 kilogrammes de charbon par heure.

SUR LA PUISSANCE MOTRICE DU FEU.

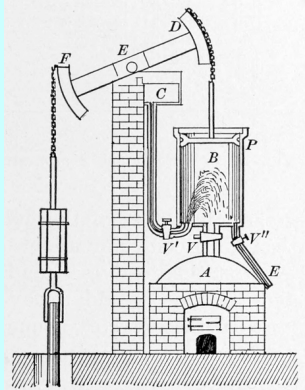
65

La plupart des autres leur sont bien inférieures. L'ancienne machine de Chaillot, par exemple, élève 20 mètres cubes d'eau à 33 mètres pour 30 kilogrammes de charbon brûlé, ce qui revient à 22 unités de puissance motrice par kilogramme, résultat neuf fois moindre que celui cité ci-dessus, et cent quatre-vingts fois moindre que le maximum théorique.

On ne doit pas se flatter de mettre jamais à profit, dans la pratique, toute la puissance motrice des combustibles. Les tentatives que l'on ferait pour approcher de ce résultat seraient même plus nuisibles qu'utiles, si elles faisaient négliger d'autres considérations importantes. L'économie du combustible n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu ; dans beaucoup de circonstances, elle n'est que secondaire : elle doit souvent céder le pas à la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc. Savoir apprécier, dans chaque cas, à leur juste valeur, les considérations de convenance et d'économie qui peuvent se présenter ; savoir discerner les plus importantes de celles qui sont seulement accessoires, les balancer toutes convenablement entre elles, afin de parvenir, par les moyens les plus faciles, au meilleur résultat, tel doit être le principal talent de l'homme appelé à diriger, à coordonner entre eux les travaux de ses semblables, à les faire concourir vers un but utile de quelque genre qu'il soit.

$$1 \text{ kg de charbon} = 7\,000 \text{ kcal} = 29,3 \text{ MJ}_{\text{PCI}}$$

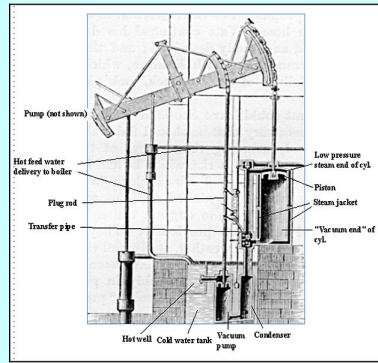
La machine à vapeur : les données



Newcomen

1712 :

$$R_D = 180 \text{ g.} \cdot (m_w^3 \cdot m_h)^{-1}$$



Watt

1769 :

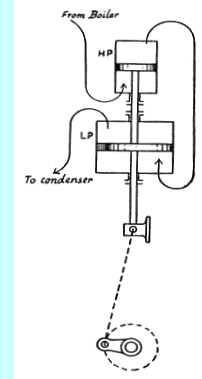
$$R_D = 45 \text{ g.} \cdot (m_w^3 \cdot m_h)^{-1}$$



Watt

1820 :

$$R_D = > 10 \text{ g.} \cdot (m_w^3 \cdot m_h)^{-1}$$

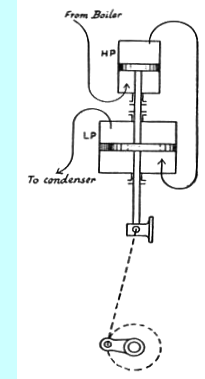
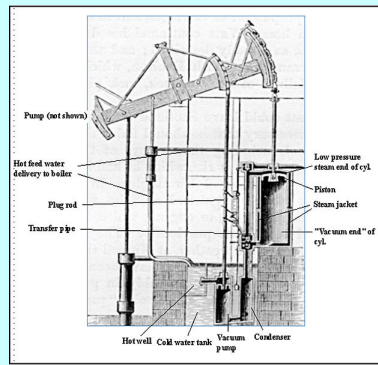
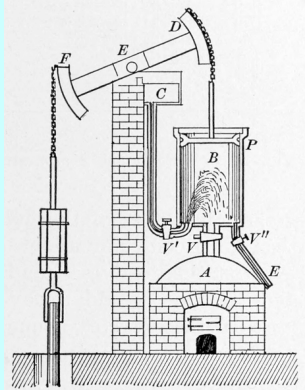


Woolf

1820 :

$$R_D > 5 \text{ g.} \cdot (m_w^3 \cdot m_h)^{-1}$$

La machine à vapeur : les données



Newcomen

1712 :

$$R_D = 180 \text{ g.} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1}$$

$$Y = 0,2 \%$$

Watt

1769 :

$$R_D = 45 \text{ g.} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1}$$

$$Y = 0,75 \%$$

Watt

1820 :

$$R_D = > 10 \text{ g.} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1}$$

$$Y = < 3.5 \%$$

Woolf

1820 :

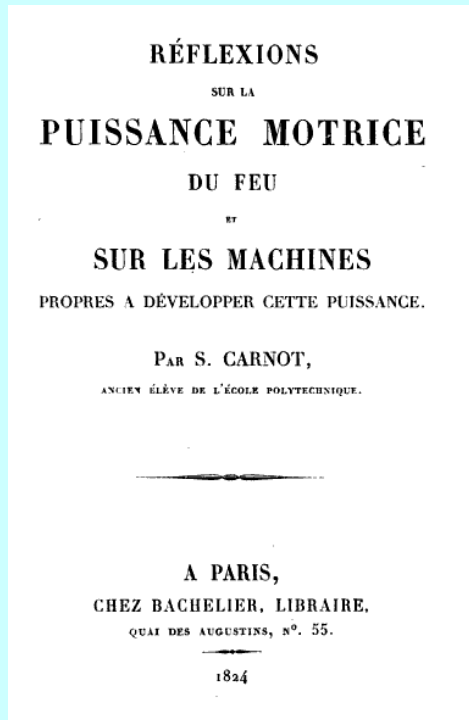
$$R_D > 5 \text{ g.} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1}$$

$$Y = < 6.5 \%$$

$$\text{rendement en } \% Y = 1/(3,0 R_D^{\text{vap}})$$

$$\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h = 9800 \text{ J}_m \text{ (équivalence chaleur travail)} ; 1 \text{ g.} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1} = 3,0 \text{ J}_{\text{th}} \cdot \text{J}_m^{-1}$$

La machine à vapeur : la théorie



Rendement du cycle réversible d'un moteur ditherme :

$$Y = 1 - T_- / T_+$$

Moteur idéal proposé par Carnot :

$T_+ = 1\,000^\circ\text{C}$ ou $1\,273\text{ K}$ (combustion)

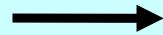
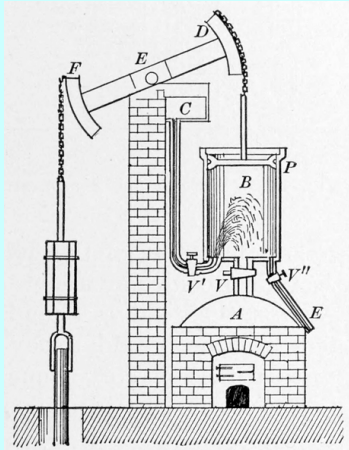
$T_- = 0^\circ\text{C}$ ou 273 K (glace)

$$Y = 78,5\ \% \text{ ou } R_D = 0,42\ \text{g} \cdot (\text{m}_w^3 \cdot \text{m}_h)^{-1}$$

Machines de Newcomen et Watt : $T_+ \sim T_{\text{vap}}(1\ \text{bar}) = 100^\circ\text{C}$ + pertes + cycle irréversible = rendement mauvais à très mauvais.

Machine de Woolf : $T_+ \sim T_{\text{vap}}(3\ \text{bars}) = 135^\circ\text{C}$ + pertes + cycle irréversible = rendement restant mauvais.

La machine à vapeur : progrès et limite



Th. Newcomen 1712

$Y = 0,2 \text{ \% net/PCI}$

$T_+ \sim 100^\circ\text{C} / T_- = 20^\circ\text{C}$

Centrale électrique au charbon
en 2000 :

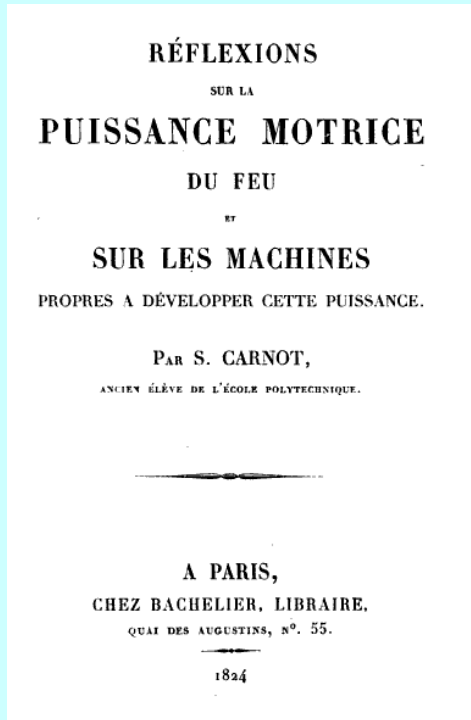
$Y = 47\% \text{ net/PCI}$

$T_+ = 580^\circ\text{C} / T_- = 10^\circ\text{C}$

Progrès depuis Newcomen 1712 : facteur 250 !

Progrès futurs : < 20% ou facteur 1,2 (augmenter T_+ vers 800°C , P vers 400 bars)

La machine à vapeur : les contraintes d'un système industriel



SUR LA PUISSANCE MOTRICE DU FEU. 65

La plupart des autres leur sont bien inférieures. L'ancienne machine de Chaillot, par exemple, élève 20 mètres cubes d'eau à 33 mètres pour 30 kilogrammes de charbon brûlé, ce qui revient à 22 unités de puissance motrice par kilogramme, résultat neuf fois moindre que celui cité ci-dessus, et cent quatre-vingts fois moindre que le maximum théorique.

On ne doit pas se flatter de mettre jamais à profit, dans la pratique, toute la puissance motrice des combustibles. Les tentatives que l'on ferait pour approcher de ce résultat seraient même plus nuisibles qu'utiles, si elles faisaient négliger d'autres considérations importantes. L'économie du combustible n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu; dans beaucoup de circonstances, elle n'est que secondaire : elle doit souvent céder le pas à la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc. Savoir apprécier, dans chaque cas, à leur juste valeur, les considérations de convenance et d'économie qui peuvent se présenter; savoir discerner les plus importantes de celles qui sont seulement accessoires, les balancer toutes convenablement entre elles, afin de parvenir, par les moyens les plus faciles, au meilleur résultat, tel doit être le principal talent de l'homme appelé à diriger, à coordonner entre eux les travaux de ses semblables, à les faire concourir vers un but utile de quelque genre qu'il soit.

S. Carnot : attention aux contraintes d'économie et de sécurité !

Investissement : taux de consommation d'acier, ou nombre de kg d'acier par m^3 d'eau et m_h de haut.

Contraintes d'un système industriel

Contraintes imposées à la filière et à son efficacité

- Procédés au moins en pilote industriel (extrapolable).
 - Minimum de rentabilité économique : fiabilité, productivités, amortissement des équipements sur leur durée de vie...
 - Qualité des produits pour le consommateur.
 - Contrôle des pollutions (neutralisation de DBO, CO et NH₃ par oxydation, NOx par réduction, désulfuration, piégeages...).
- N.B. : polluants en faible concentration > consommations faibles.
- Sécurité et sûreté (procédures, enceintes supplémentaires...).

Exploitation charbonnière

Flux sur 1 an :


$F_{\text{entrée}}$: charbon brut



Production

F_{sortie} : charbon trié

t_{charbon} ou J_{PCI}

Consommation directe  E_D : travail pour pomper eau et monter charbon en t.m_h (J_{meca} ou J_e)

$$\text{Taux de consommation } R_D^{\text{mine}} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}}$$

Bassin houiller de la Loire en 1927

(mines souterraines de charbon dans et près de St Etienne)

Flux en 1927 :

F_{in} : env. 4 Mt de
charbon brut extrait



F_{out} : vente de 3,3 Mt charbon,
0,55 Mt coke... ou 110 000 TJ_{PCS}

Consommation directe

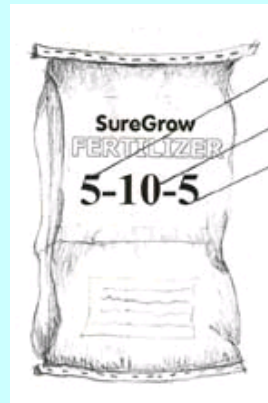
E_D : 360 TJ_e pour soulever 6,5 t eau et
charbon par t brut sur 800 m + machines

$$R_D^{mine} = 0,0033 J_e \cdot J_{PCS}^{-1}$$

Source : bassin houiller de la Loire en 1927 (article de 1930).

Usine d'ammoniac NH_3

Flux sur 1 an
(ou 1 mois...) :



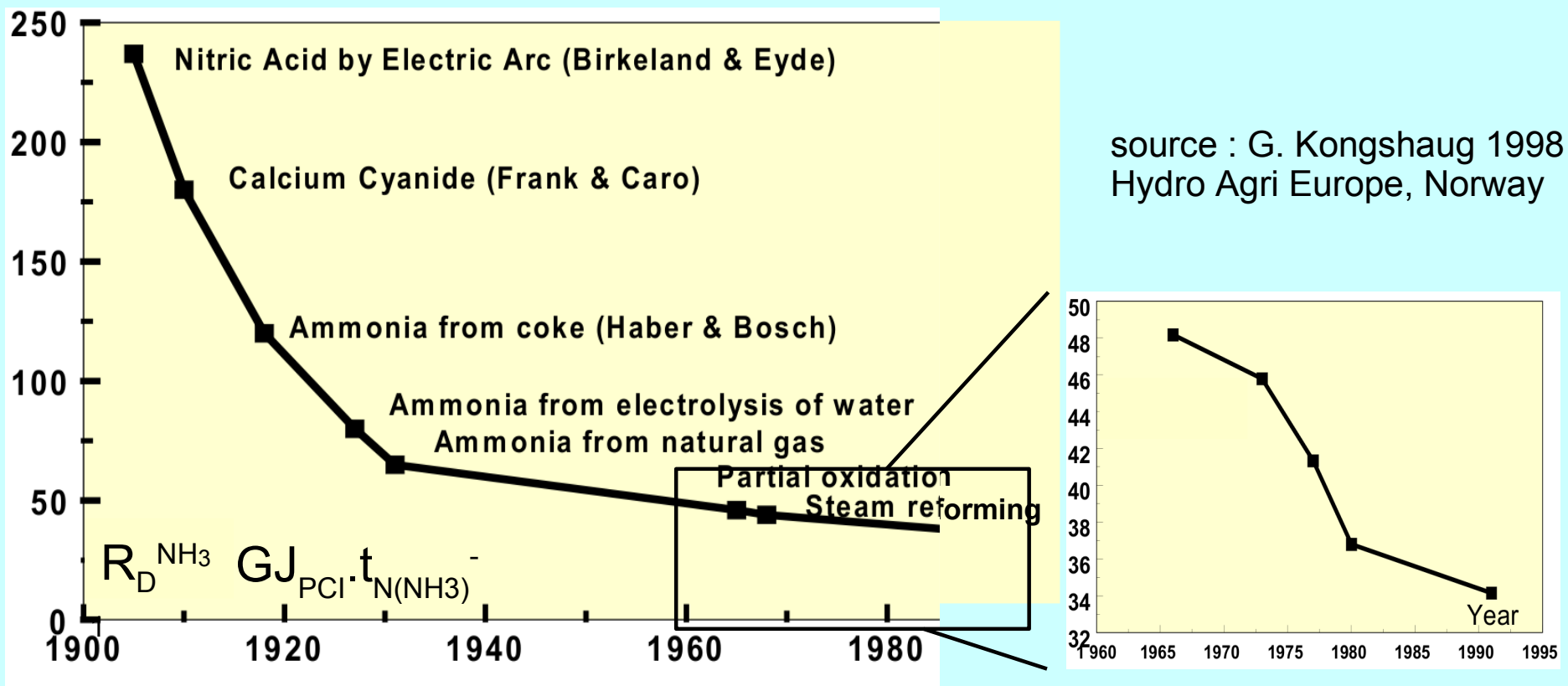
Production

⇒ F_{sortie} : ammoniac
(engrais) en t_{NH_3}

Consommation directe ↑ E_D : gaz (charbon ou fioul lourd) en J_{PCI}
ou élec. en J_e

Taux de consommation $R_D^{\text{NH}_3} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}}$ en $\text{GJ}_{\text{PCI}} \cdot t_{\text{N}(\text{NH}_3)}^{-1}$

Progrès sur taux $R_D^{NH_3}$?



Usine récente : $33 \text{ GJ}_{\text{PCI}} \cdot \text{t}_{\text{N(NH}_3\text{)}}^{-1}$ (EFMA 2000).

Limite thermochimie/cinétique $\text{CH}_4 \rightarrow \text{NH}_3$: $25,5 \text{ GJ}_{\text{PCI}} \cdot \text{t}_{\text{N(NH}_3\text{)}}^{-1}$.

(NB : autre unité en $\text{J}_{\text{PCS}} \cdot \text{t}_{\text{NH}_3}^{-1}$. CH_4 : $1 \text{ J}_{\text{PCI}} = 1,1 \text{ J}_{\text{PCS}}$. NH_3 : $1 \text{ t}_{\text{NH}_3} = 0,822 \text{ t}_{\text{N(NH}_3\text{)}}$)

Industrie pétrolière

Flux sur 1 an... :

$\left[\begin{array}{l} F_{\text{entrée}} \\ \text{brut} \end{array} : \rightarrow \right]$



Production

$\Rightarrow F_{\text{sortie}} : \text{produits pétroliers au consommateur en litre, t ou J}$

Consommation directe \uparrow E_D : diesel pour générateurs sur champs, gaz ou diesel pour oléoducs, fioul pour tankers, combustibles pour raffineries...

Taux de consommation $R_D^{\text{oil}} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}} \quad (\text{ou } \frac{E_D}{F_{\text{entrée}}})$

(+ taux de consommation acier,... $R_{\text{aci}}^{\text{Tr}}$ en $t_{\text{aci}} \cdot J^{-1}$)

Transport marchandise

**Flux sur 1 an
(ou 1 trajet ...) :**



Production
 $F_{\text{sortie}} : \text{en } t_{\text{charge}} \cdot \text{km}$

Consommation directe  $E_D : \text{litre de diesel}$

Taux de consommation $R_D^{\text{Tr}} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}}$ en l ou $\text{MJ}_{\text{PCi}} \cdot (t_{\text{ch}} \cdot \text{km})^{-1}$
(de l'ordre de 1 à 10 MJ)

(+ taux de consommation acier,... $R_{\text{aci}}^{\text{Tr}}$ en $t_{\text{aci}} \cdot (t_{\text{ch}} \cdot \text{km})^{-1}$)


Transport personne

**Flux sur 1 an
(ou 1 trajet ...) :**



Production

F_{sortie} : en pers.km

Consommation directe  E_D : énergie musculaire ($S C_x$, v ,
masse totale, $\Gamma_{\text{roue}} \dots$)

Taux de consommation $R_D^{\text{TrPers}} = \frac{E_D}{F_{\text{sortie}}}$

(+ taux de consommation acier, ... $R_{\text{aci}}^{\text{Tr}}$ en $t_{\text{aci}} \cdot (\text{pers.km})^{-1}$)

L'efficacité énergétique

Définition d'un indicateur.

Systemes industriels. Exemples

- Indicateur pratique : taux de consommations directes
- Indicateur plus complet : taux de consommations d'énergie primaire

**Des données brutes à l'indicateur pour un système complexe.
Formalisme et résolution pratique**

- Cas de la fabrication d'un téléphone
- Cas de la production d'agroethanol

Consommations directes E_D

$E_D : J_e$ d'électricité



$E_D : J_{PCI}$ de pouvoir calorifique de carburant (ou litre)



Ferme

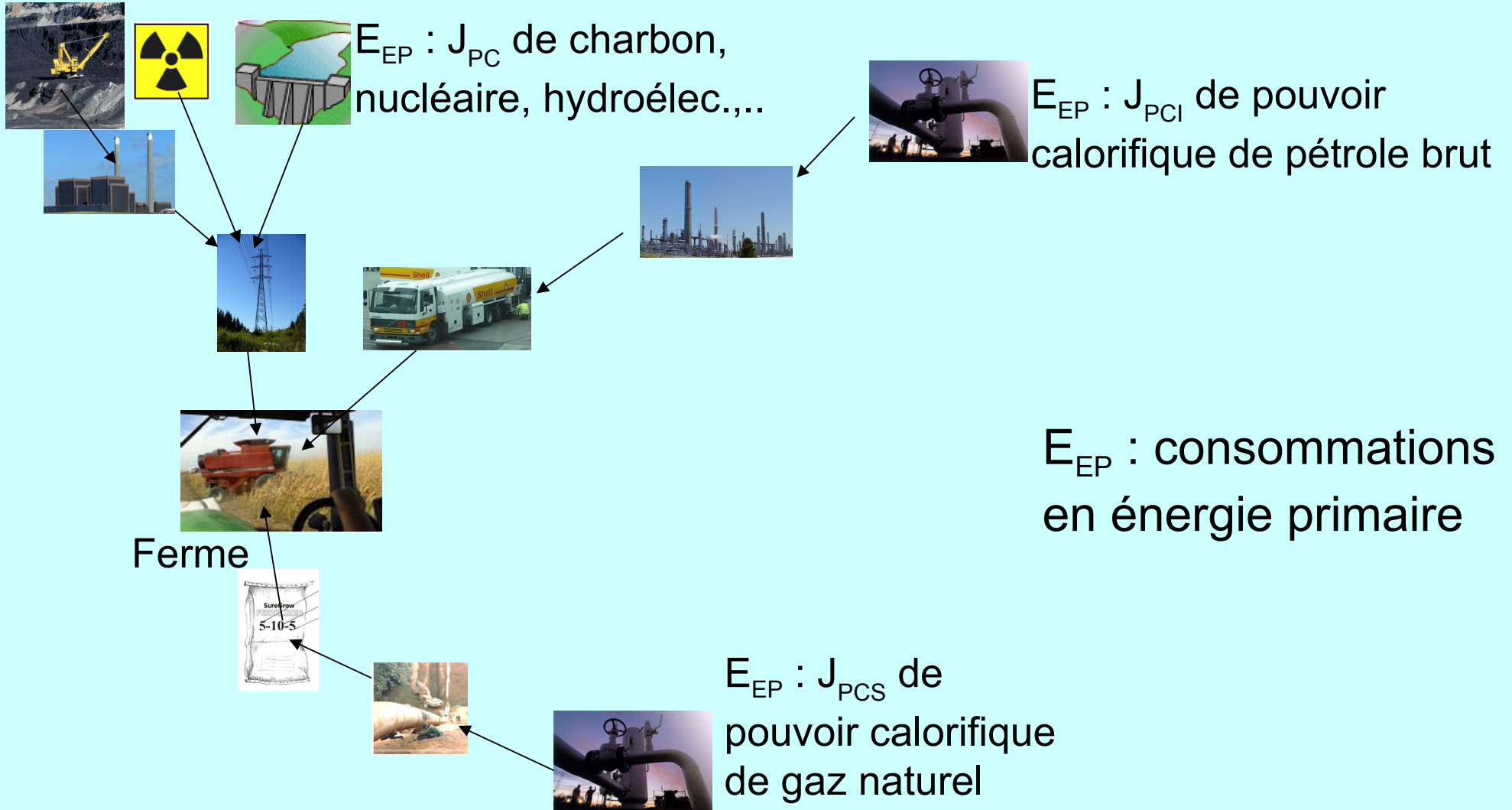


$E_D : kg_N$ d'engrais azoté

E_D : non homogènes.

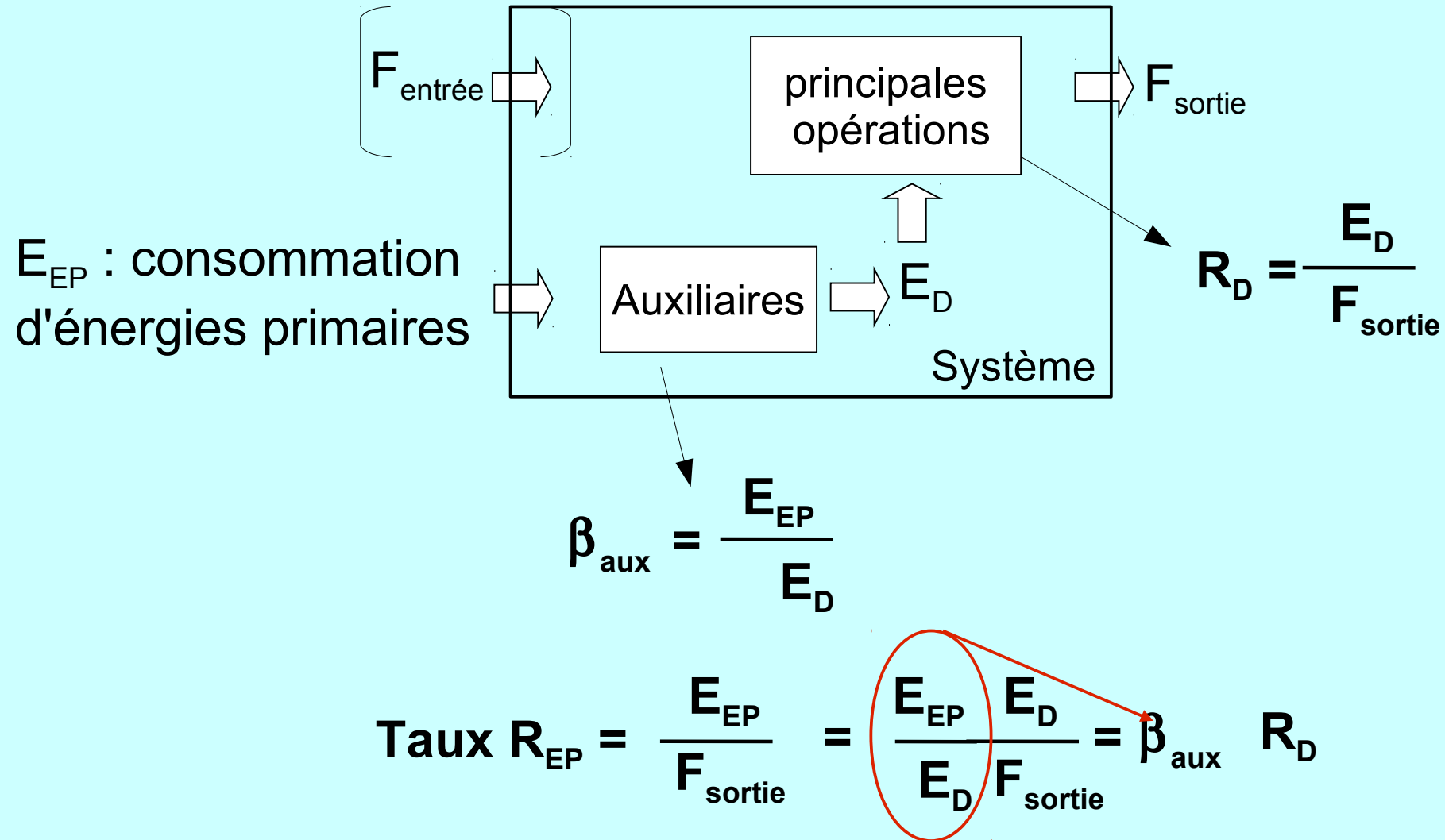
Et comparaison difficile avec d'autres filières (pétrole...)

Consommations $E_D \rightarrow E_{EP}$



Flux et taux d'un système

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



Transport marchandise

**Flux sur 1 an
(ou 1 trajet ...) :**



F_{sortie} : en $t_{\text{charge}} \cdot \text{km}$



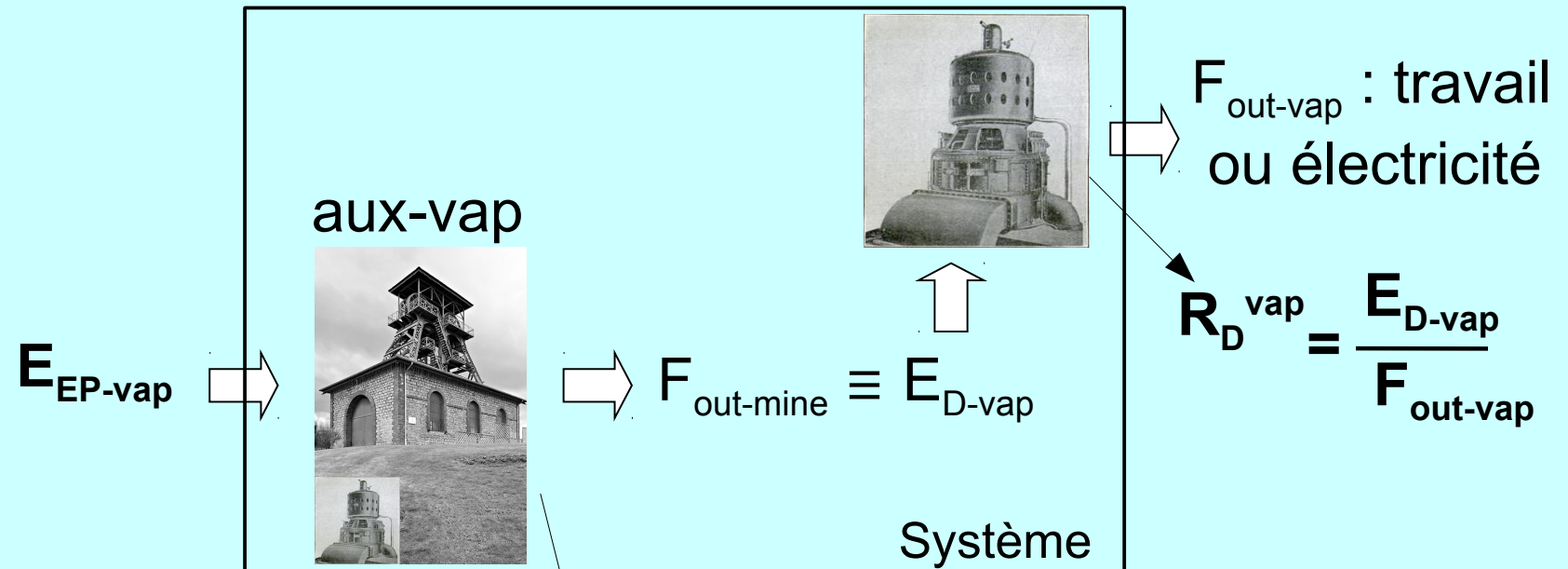
E_D : litre de diesel

E_{EP} :
brut



Taux de consommation $R_{EP}^{Tr} = \frac{E_{EP}}{F_{\text{sortie}}}$ en $\text{MJ}_{\text{tot}} \cdot (t_{\text{ch}} \cdot \text{km})^{-1}$

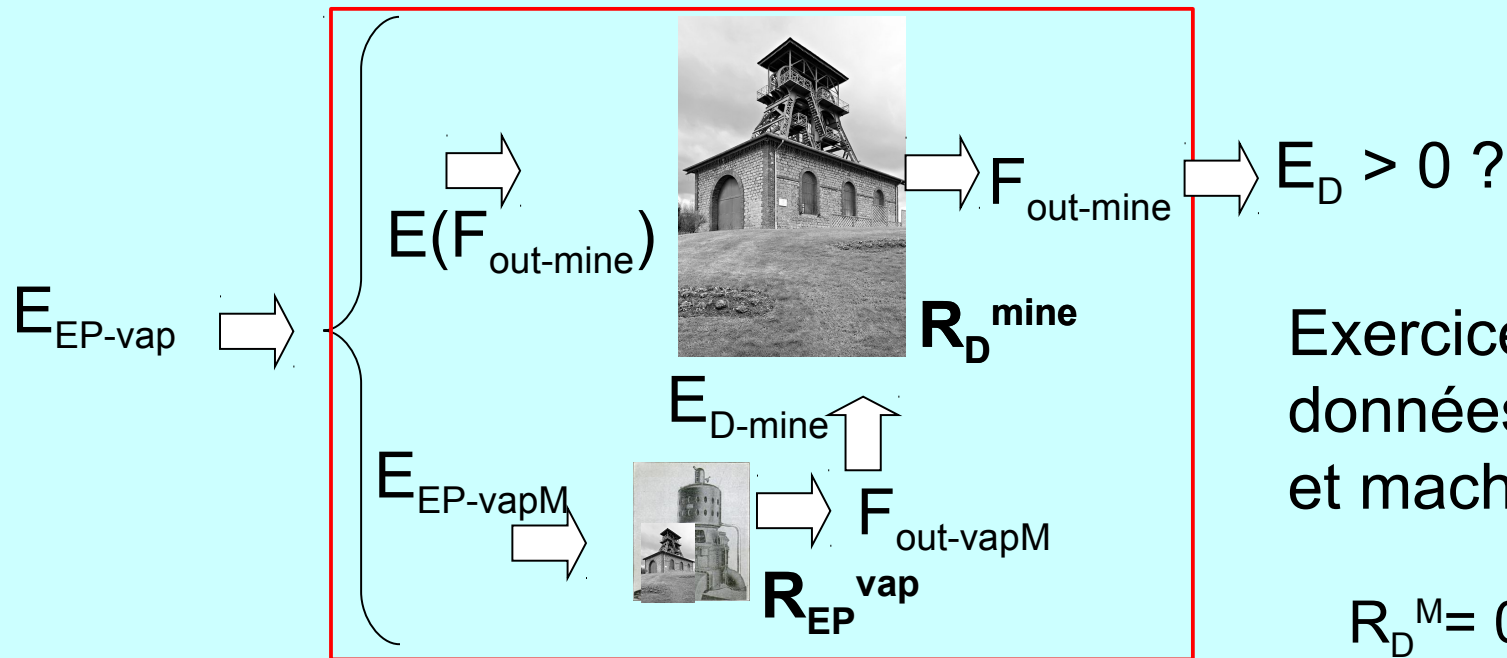
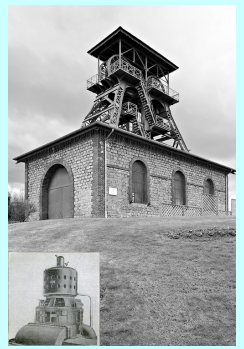
Systeme machine à vapeur + mine



$$\beta_{aux-vap} = \frac{E_{EP-vap}}{E_{D-vap}}$$

$$\text{Taux } R_{EP}^{vap} = \frac{E_{EP-vap}}{F_{out-vap}} = \frac{E_{EP-vap}}{F_{out-mine}} \frac{E_D}{F_{out-vap}} = \beta_{aux-vap} R_D^{vap}$$

Auxiliaire de la machine à vapeur



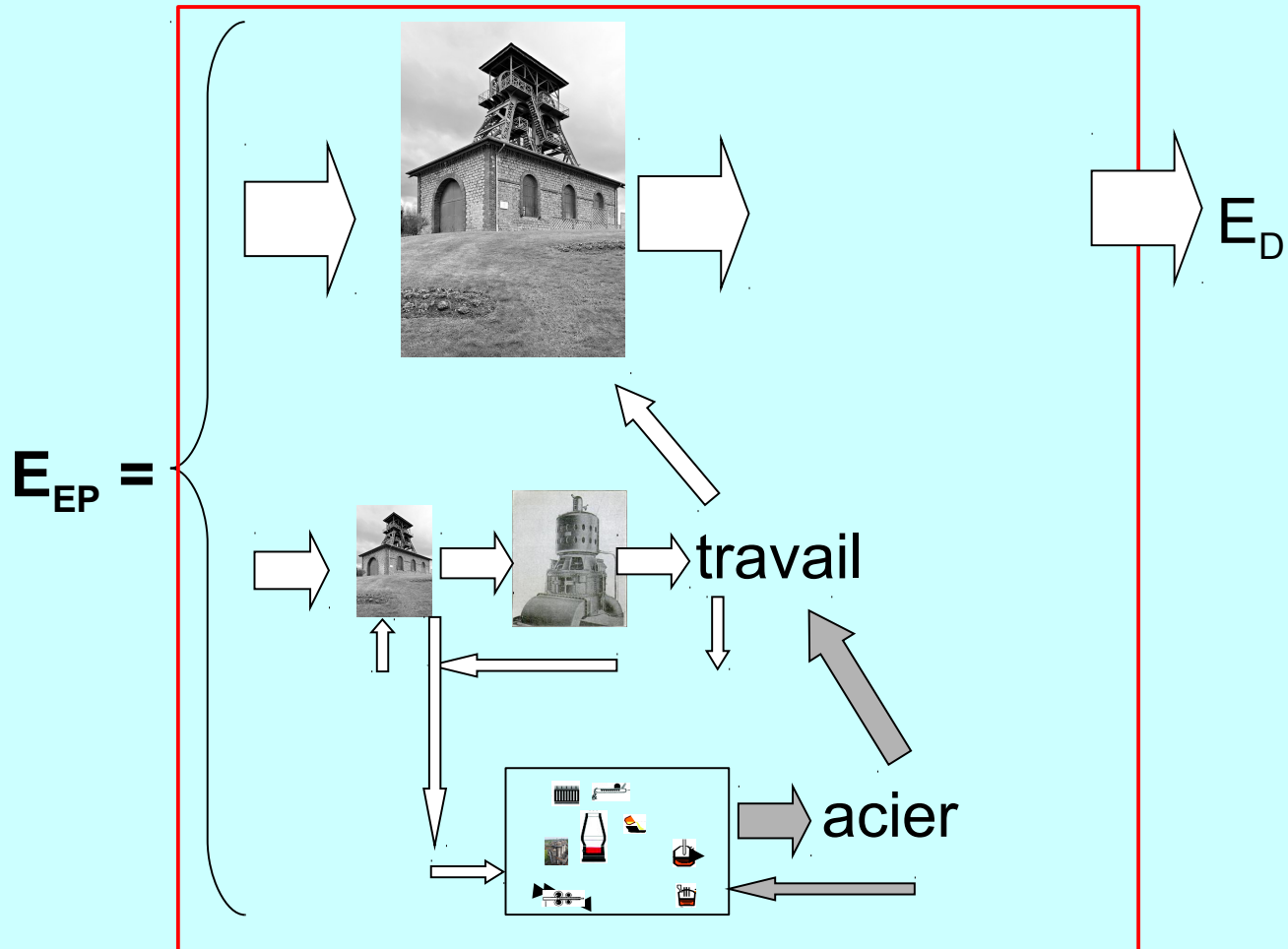
Exercice à faire avec données bassin de la Loire et machines à vapeur

$$R_D^M = 0,0033 J_e \cdot J_{PCS}^{-1}$$

$$\beta_{aux} = ? \quad F(R_D^{mine}, R_D^{vap})$$

$$\text{Rép. } \beta_{aux-vap} = \frac{1}{1 - R_D^{mine} R_D^{vap}}$$

Mine de charbon auto suffisante



Système énergétique
auto-suffisant ?

Cas du bassin de la
Loire en 1927

Actuellement au
niveau du monde:
Pétrole + gaz.

L'efficacité énergétique

Définition d'un indicateur.

Systemes industriels. Exemples

- Indicateur pratique : taux de consommations directes
- Indicateur plus complet : taux de consommations d'énergie primaire

**Des données brutes à l'indicateur pour un système complexe.
Formalisme et résolution pratique**

- Cas de la fabrication d'un téléphone
- Cas de la production d'agroethanol

« Analyse de cycle de vie »

Selon la norme ISO 14040 (management environnemental/ACV/Principe et cadre), la méthodologie se construit en 4 phases :

- 1- objectifs et champ de l'étude
- 2- **bilan matière énergie**
- 3- analyse des impacts
- 4- interprétation

- Phase 2 = génie des procédés et des systèmes industriels.
 - Identifier et quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant des systèmes.
 - Les données utilisées (...) correspondent à l'*unité fonctionnelle* choisie (taux R).
 - La validation de ces bilans par conservation (matière, énergie).
 - L'existence d'erreurs est inhérente et doivent être estimées.
 - Bien décrire chaque système (nature du procédé, paramètres de fonctionnement...).
- Faire ce bilan soulève 2 remarques :
- nb important d'entrant et de sortants à prendre en compte. La collecte des données exige recherche biblio importante et des contacts avec les professionnels,
 - insuffisance notoire des banques de données disponibles.

D'accord sur le principe. Mais en pratique ?

« Analyse de cycle de vie »

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

Bilan de flux (par an, jour, heure...) :



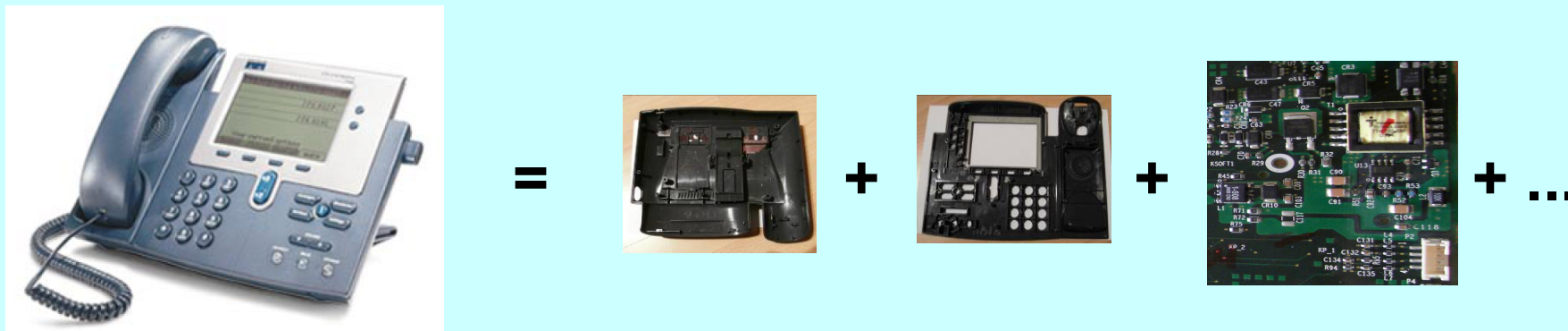
$$\text{D'où taux } R_{\text{EP}}^{\text{tél}} = \frac{E_{\text{EP}}}{F_{\text{sortie}}} \quad \text{MJ}_{\text{EP}}/\text{télph}$$

« Analyse de cycle de vie »

Base de données = liste de composants électroniques et de matériaux j , et leur énergie primaire de fabrication.

Consommation = somme des consommations pour chaque composant du téléphone :

$$R^{\text{tél}} = \sum_j R_{\text{EP-}j}^{\text{tél}} \quad (= \sum_j R_j) \quad \text{MJ}_{\text{EP}}/\text{télph}$$

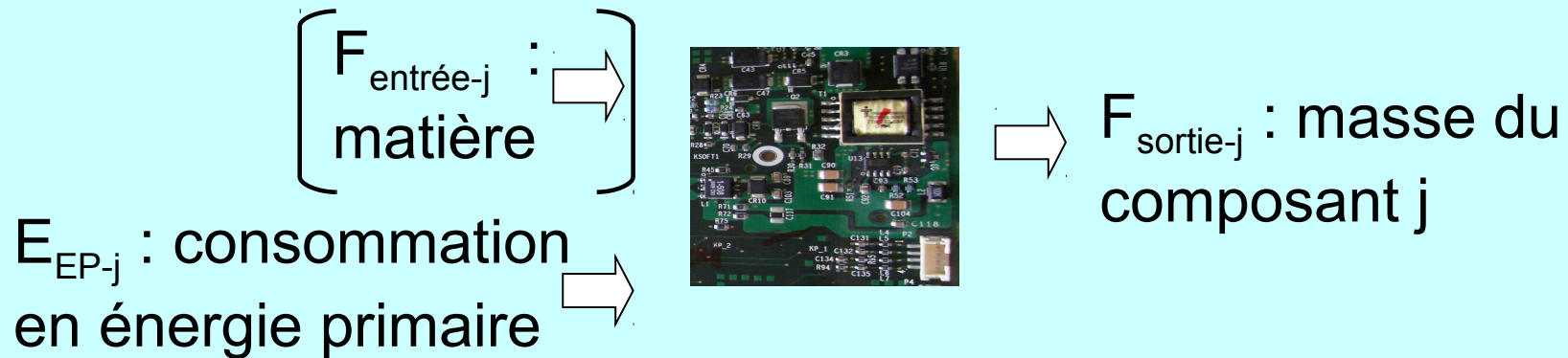


Stage/phase 1 : travail de démontage et d'identification.
Plus de 80 composants !

« Analyse de cycle de vie »

Base de données = liste de composants électroniques et de matériaux j ,
et leur énergie primaire de fabrication en $\text{MJ}_{\text{EP}}/\text{kg}_j$.

Bilan de flux (par an, jour, heure...) :



$$\text{D'où taux pour } j : r_{\text{EP-}j} (= r_j) = \frac{E_{\text{EP-}j}}{F_{\text{sortie-}j}} \text{ MJ}_{\text{EP}}/\text{kg}_j$$

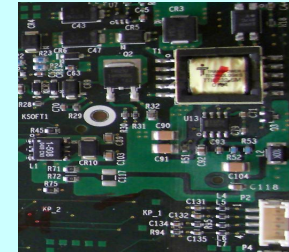
r_j choisi le plus approprié pour j (moins variable que R_j).

« Analyse de cycle de vie »

De l'opération au système :

$$R_j = r_j \times w_j$$

$MJ_{EP}/\text{télph}$ MJ_{EP}/kg_j



w_j : masse du composant j dans 1 téléphone ($kg_j/\text{télph}$).

Poids du taux local r_j dans taux du système $R^{\text{tél}}$

Stage/phase 2 = pesage des plus de 80 composants $\longrightarrow w_j$

« Analyse de cycle de vie »

Résultats :

écran cristaux liquides 5"
passifs, N/B, 145x200 px,
88 cm².

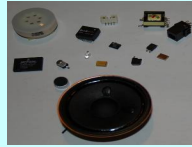


$$w_j \Rightarrow R_j = r_j \times w_j$$

$$61,6 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{LCD}} = 880 \text{ MJ}_{\text{EP}}$$

+

transformateurs HP



$$7,6 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{HP}} = 150 \text{ MJ}_{\text{EP}}$$

+

coques plastiques



$$810 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{plst}} = 110 \text{ MJ}_{\text{EP}}$$

+

puces



$$8,7 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{pc}} = 47 \text{ MJ}_{\text{EP}}$$

+

....

....

=

$$R^{\text{tél}} = 1270 \text{ MJ}_{\text{EP}}/\text{télph}$$



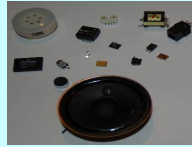
« Analyse de cycle de vie »

Résultats :

écran cristaux liquides 5"
passifs, N/B, 145x200 px,
88 cm².



transformateurs HP



coques plastiques



puces



....



$$w_j \Rightarrow R_j = r_j \times w_j$$

$$61,6 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{LCD}} = 880 \text{ MJ}_{\text{EP}} \text{ ou } 69 \% \text{ !?!}$$

+

$$7,6 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{HP}} = 150 \text{ MJ}_{\text{EP}} \text{ ou } 12 \% \text{ ?}$$

+

$$810 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{plst}} = 110 \text{ MJ}_{\text{EP}} \text{ ou } 8,6 \%$$

+

$$8,7 \text{ g} \Rightarrow R_{\text{pc}} = 47 \text{ MJ}_{\text{EP}} \text{ ou } 3,6 \% \text{ ?}$$

+

....

=

$$R^{\text{tél}} = 1270 \text{ MJ}_{\text{EP}}/\text{télph}$$

« Analyse de cycle de vie »

Analyse critique :

Informations disponibles :

Composant	Source des données	Date	Description de ce que contient la donnée
Transformateur basse tension	Etude [REDACTED]	1995	Pas d'information
Ecran LCD (TN/STN monochrome)	Etude [REDACTED] 3 fabricants asiatiques	2003	Pas d'information
Circuit intégré	Etude [REDACTED] IIIIIIIIII (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

=> $6,5 \text{ MJ}_{\text{pcs}}/\text{kg}_{\text{verre}}$ de fioul (+ extraction, transformation, transport...)

$$\left. \begin{array}{l} \text{d'où env. } r_{\text{LCD}} \sim 10 \text{ MJ}_{\text{tot}}/\text{kg}_{\text{verre}} \\ w_{\text{LCD}} = 61,6 \text{ g} \end{array} \right\} \mathbf{R_{LCD}^{\text{tél}} \sim 0,6 \text{ MJ/télph !!}}$$

(Base ACV => $R_{\text{LCD}} = 880 \text{ MJ}_{\text{EP}}$)

r_{LCD} : **MJ/cm² ou MJ/px ?**

« Analyse de cycle de vie »



D'après US-EPA/Socoloff 2005 :

1 écran Thin Film Transistor 15", couleur, 705 cm², 1 024 x 768 px

Energie de fabrication = 2073 MJ,

D'où $r_{\text{LCD}} \sim 2,9 \text{ MJ/cm}^2$ ou 2,6 kJ/px.

Si $r_{\text{LCD}} = 2,9 \text{ MJ/cm}^2$: **$R_{\text{LCD}}^{\text{tél}} = 255 \text{ MJ/télph.}$**

Mais TFT, 1100 px/cm² et 24 bit/px.

LCD cisco : TN, 330 px/cm² et 1 bit/px

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

« Analyse de cycle de vie »



$$r_{\text{LCD}} : \text{MJ}/\text{cm}^2 \text{ ?}$$

Source plus directe : Samsung Elc., principal fabricant de LCD TFT couleur

Rapport environnemental 2009 : consommation électricité+gaz en 2008 pour activités puces et écrans

Communiqués de presse : production en m² des écrans pour 2008

$$r_{\text{LCD}} < 0,46 \text{ MJ}_e/\text{cm}^2 + 0,05 \text{ MJ}_{\text{pcs}}/\text{cm}^2$$

$$R_{\text{LCD}}^{\text{tél}} < 40 \text{ MJ}_e/\text{télph} + 4,4 \text{ MJ}_{\text{pcs}}/\text{télph}.$$

Alors ?

« Analyse de cycle de vie »

- Décomposition d'un système complexe en sous-systèmes/opérations j plus simples et en série/additives :

$$R^{syst} = \sum R_j^{syst} \text{ en } J/F_{syst}$$

- Utilisation d'un taux de consommation spécifique à l'opération (but) et son procédé (moyen), ou taux local :

$$r_{D-j} \text{ en } J_D/F_j$$

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

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

Idéalement, choix de r_{D-j} tel que constant pour le procédé \rightarrow paramètre.

« Analyse de cycle de vie »

- Conversion d'énergie E_D en énergie primaire (ou intermédiaire) avec procédés auxiliaires *aux-j* et son taux : $r_{D-j} \rightarrow r_j$ avec

$$r_j = \beta_{aux-j} \times r_{D-j} .$$

- Poids w_j du taux r_j pour opération j dans le taux système R^{syst} , ou passage du taux local r_j au taux global R_j^{syst} :

$$R_j^{syst} = r_j \times w_j^{syst} \quad \text{avec } w_j \text{ en } F_j/F_{syst}$$

$$R^{syst} = R^{syst} (w_j^{syst} ; r_{D-j} , \beta_{aux-j})$$

L'efficacité énergétique

Définition d'un indicateur.

Systemes industriels. Exemples

- Indicateur pratique : taux de consommations directes
- Indicateur plus complet : taux de consommations d'énergie primaire

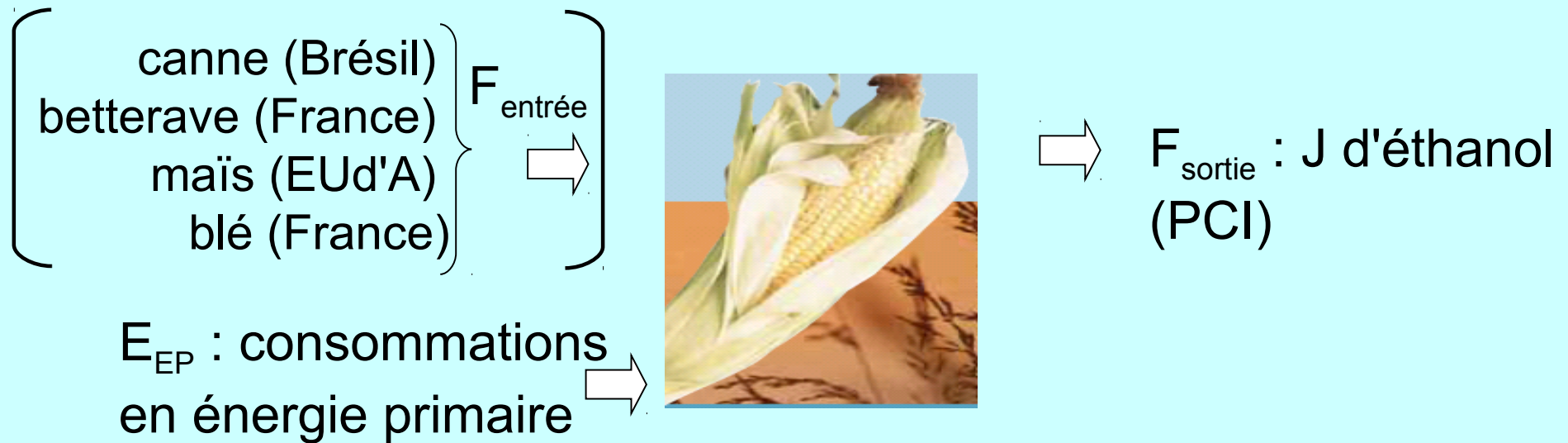
**Des données brutes à l'indicateur pour un système complexe.
Formalisme et résolution pratique**

- Cas de la fabrication d'un téléphone
- Cas de la production d'agroethanol

Production d'agroéthanol

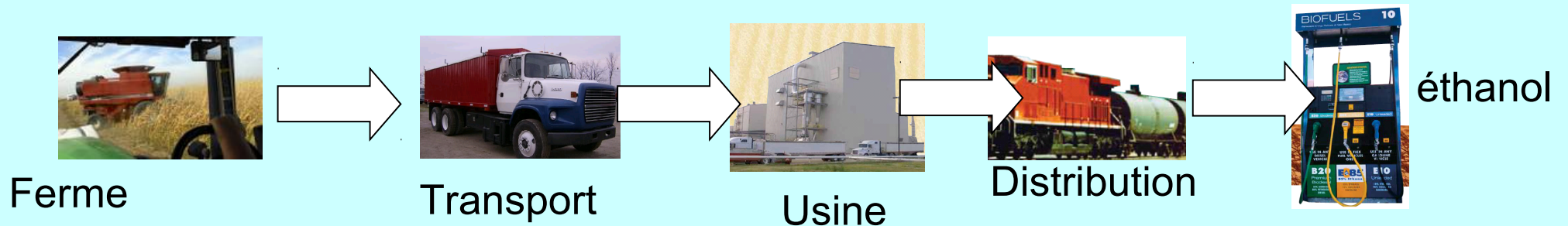
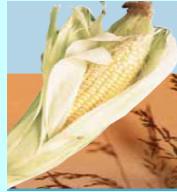
Industrie de l'éthanol ex plantes agricoles (agroéthanol)

Bilan de flux (par an, jour, heure...) :



$$\text{D'où taux } R^{\text{OH}} = \frac{E_{\text{EP}}}{F_{\text{sortie}}} \quad J_{\text{EP}}/J_{\text{OH}}$$

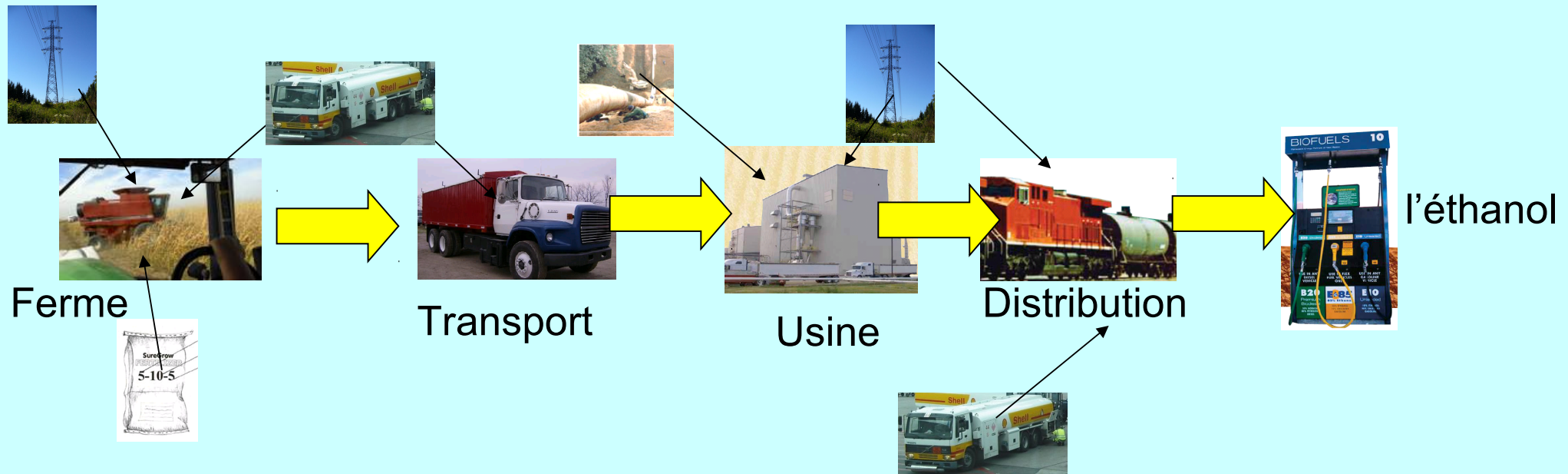
Chaîne d'opérations...



... dont consommations additives

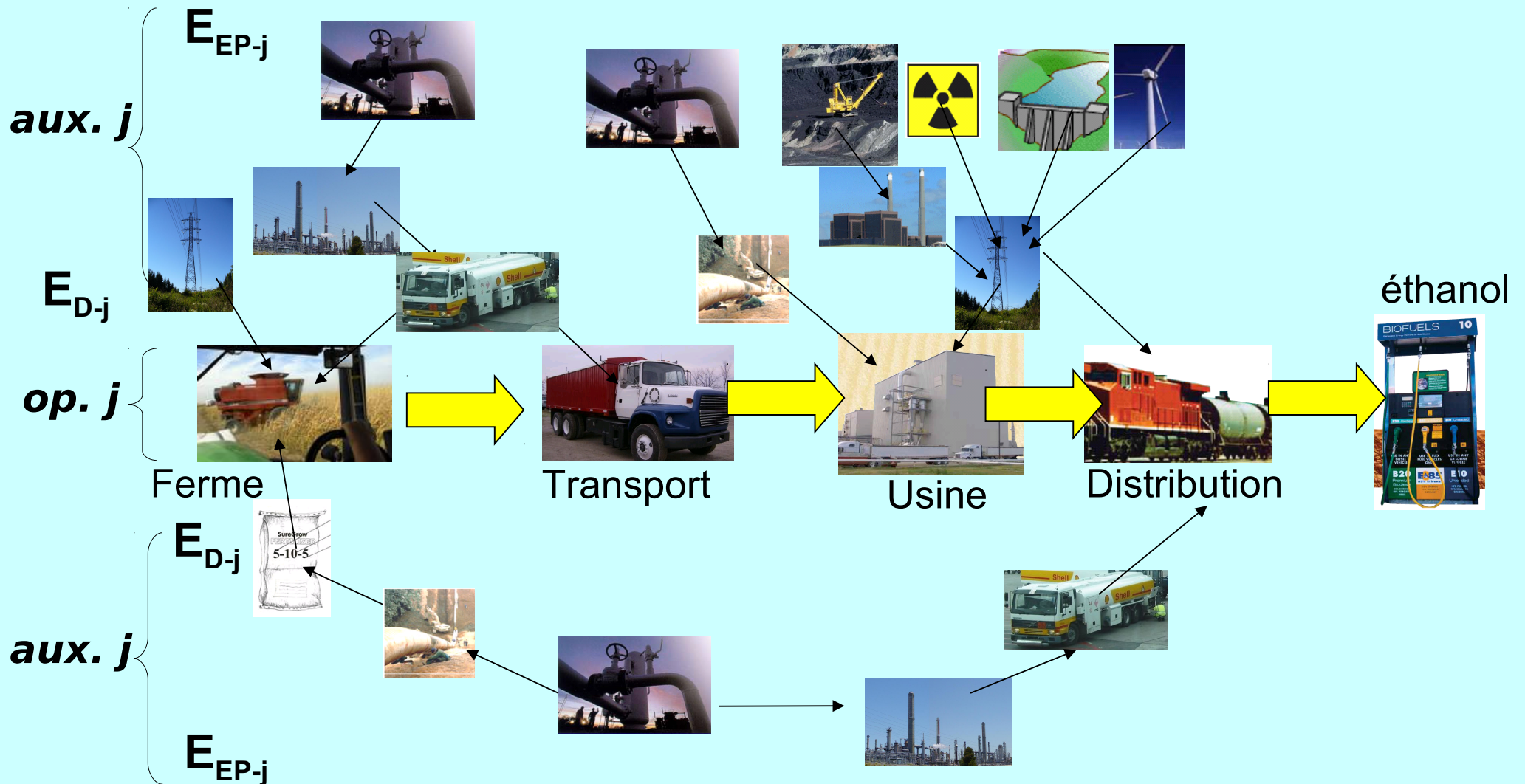
$$R^{OH} = \sum_j R_j^{OH}$$

(décomposition série ; cas du téléphone IP)



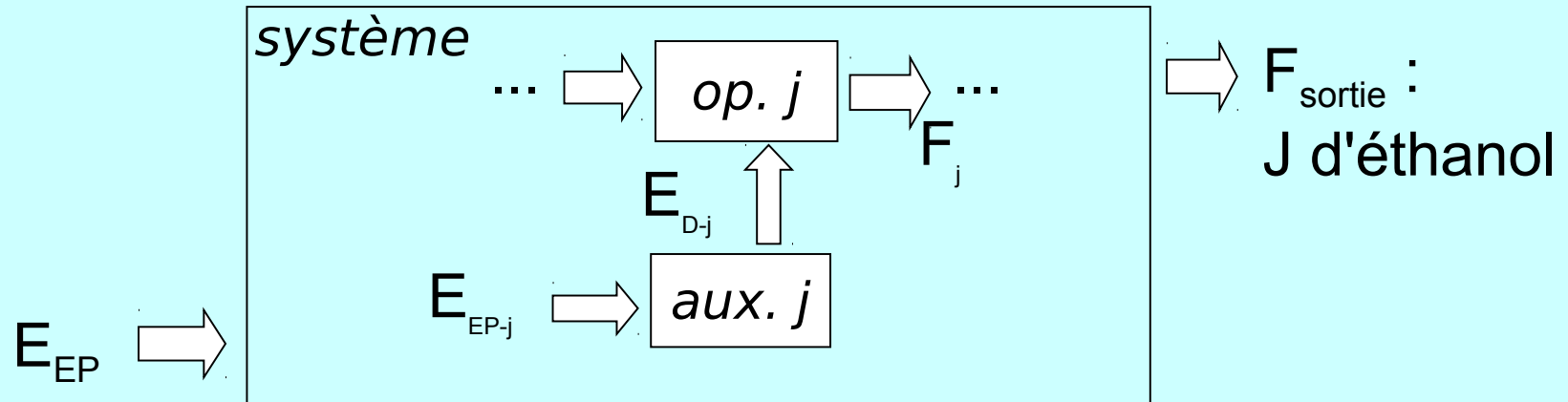
Décompositions série et transverse

$$\mathbf{R}^{\text{OH}} = \sum_j \mathbf{R}_j^{\text{OH}} = \sum_j \beta_{\text{aux-}j} \times \mathbf{r}_{\text{D-}j} \times \mathbf{w}_j^{\text{OH}}$$



Flux et taux d'un système

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



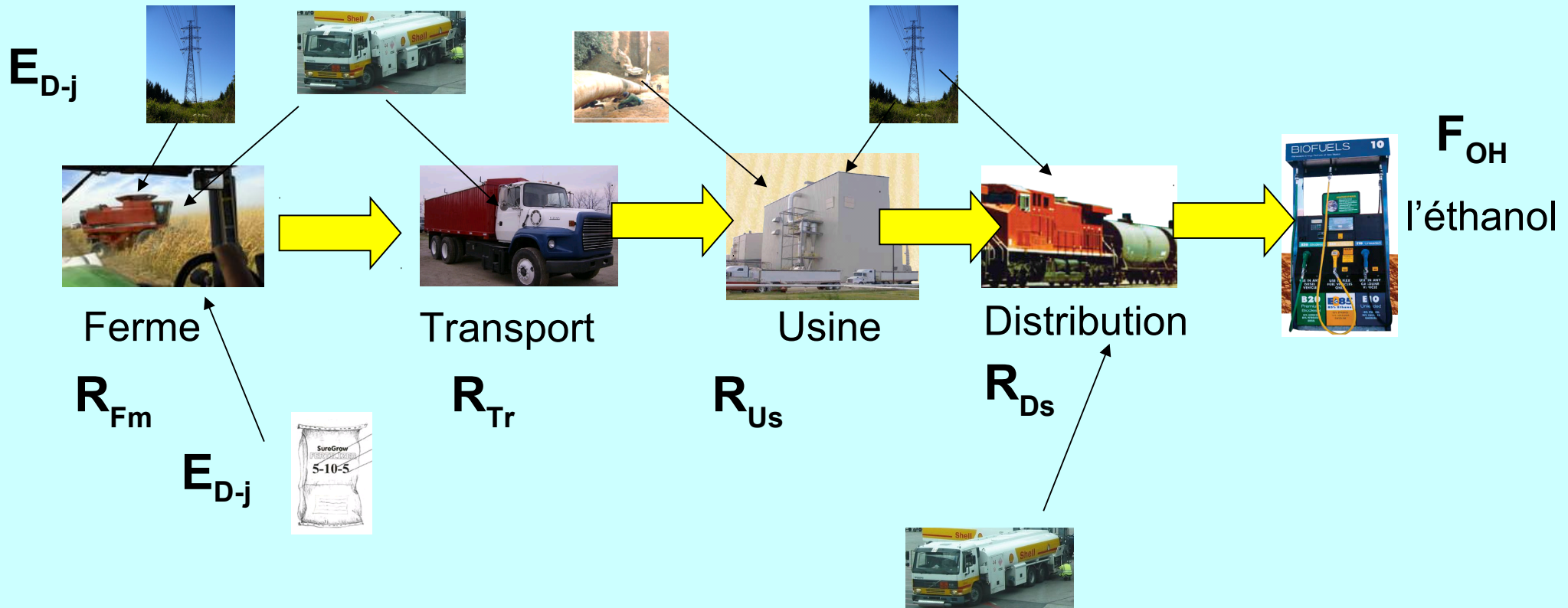
$$\text{Indicateur : } R^{OH} = \frac{E_{EP}}{F_{sortie}} = \sum_j R_j^{OH} = \sum_j \beta_{aux-j} \times r_{D-j} \times w_j^{OH}$$

$$R^{OH} = R(w_j^{OH} ; r_{D-j}, \beta_{aux-j})$$

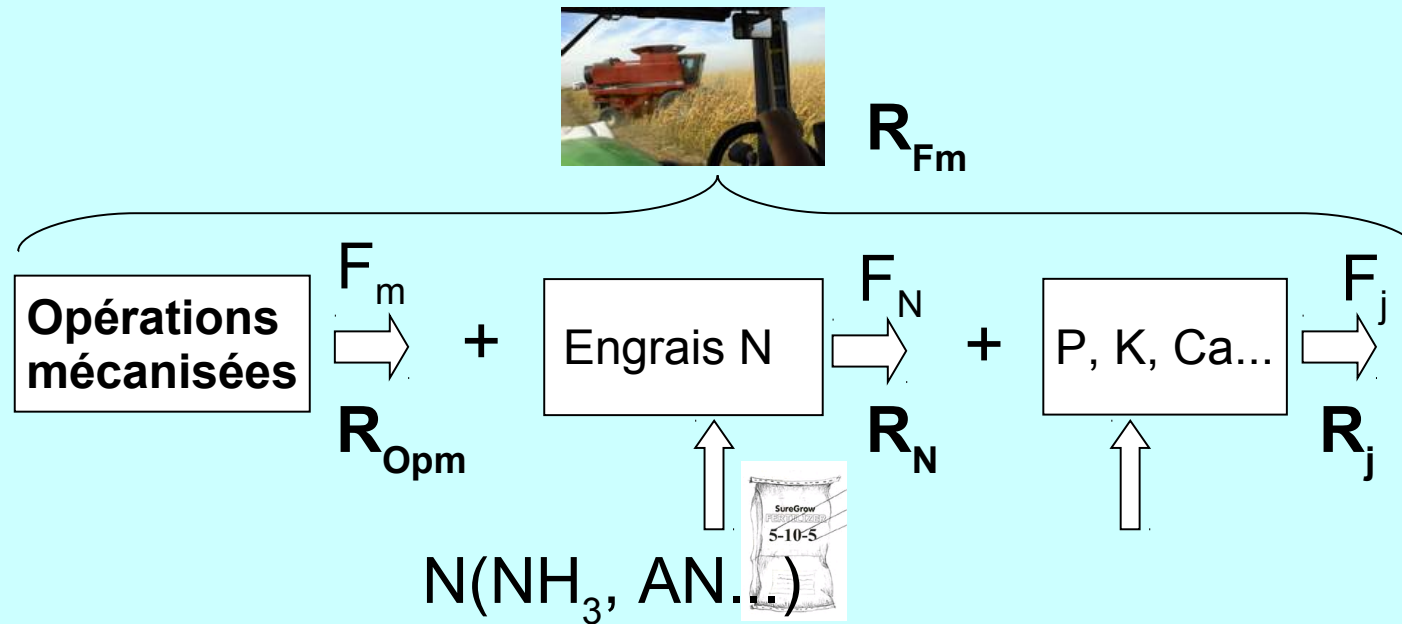
Efficacité : réduction de R^{OH} en jouant sur $w_j^{OH} ; r_{D-j}, \beta_{aux-j}$

Décompositions successives

$$R_{D-j} = \frac{E_{D-j}}{F_{OH}} \quad \text{en } J_D/J_{OH}$$



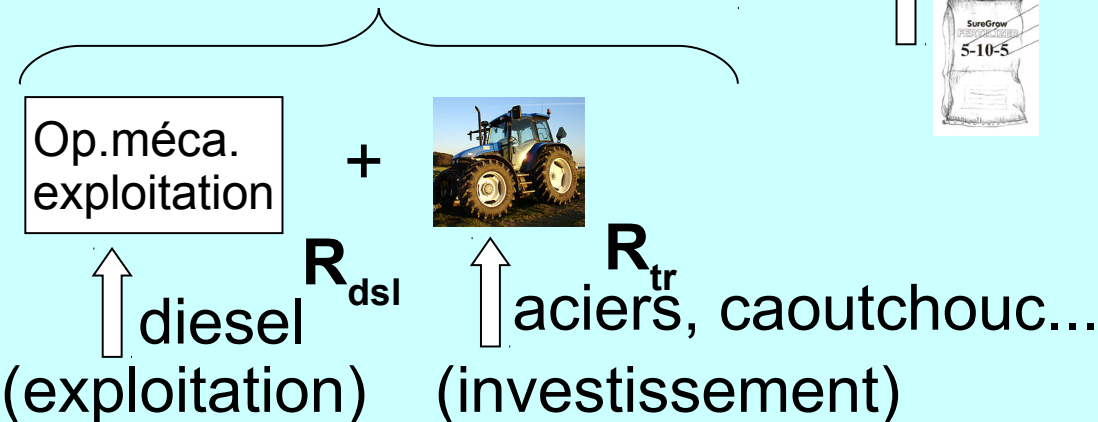
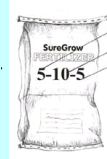
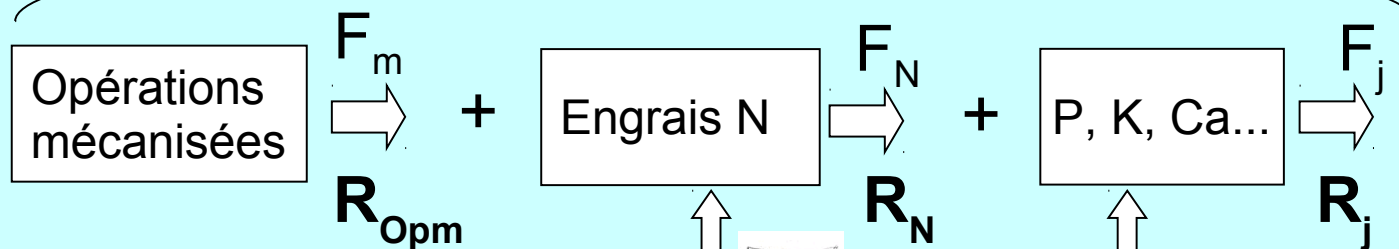
Décompositions successives



Décompositions successives



R_{Fm}



Différents niveaux de décomposition. Jusqu'où ?
Compromis : - données sur l'opération j et ses procédés
 - contribution R_j de l'opération dans R

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)!

Taux locaux r_j et globaux R_j

R_{dsi} en J_D/J_{OH}

Flux sur un cycle de culture

Op. méca.
exploitation

⇒ ha.an

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

↑ E_{D-j} : diesel

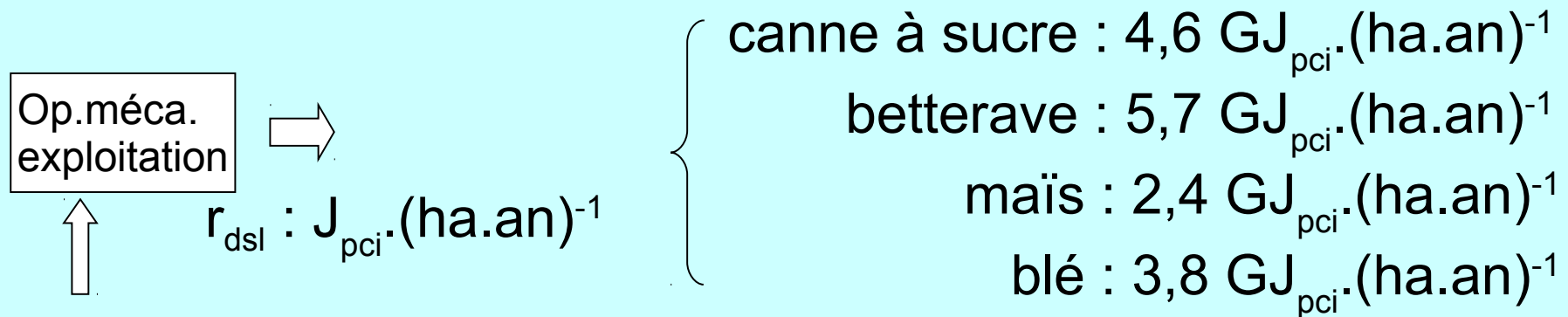
Flux : consommation de diesel E_{D-j} <----> distance parcourue.

-> hectares cultivés en **ha.an**

(dépend aussi du nombre d'opérations, intensité
- labourage ≠ épandage -, quantité récoltée...)

> taux local des opérations méca. (diesel) : r_{dsi} en $J_D/ha.an$

Données et analyses



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

$r_{dsi} \Rightarrow$ ordre de grandeur pour autres cultures en l'absence de donnée. A affiner avec le nombre d'opérations et leur intensité.

Taux locaux r_j et globaux R_j

R_{dsl} en J_D/J_{OH}

> flux sur un cycle

Op.méca.
exploitation

⇒ ha.an

↑ $E_{\text{D-m}}$: diesel

> taux local opération r_{dsl} en $J_D/\text{ha.an}$

> taux global diesel $R_{\text{dsl}} = r_{\text{dsl}} \times w_{\text{dsl}}^{\text{OH}}$ en J_D/J_{OH}

⇒ $w_{\text{dsl}}^{\text{OH}}$ ou $w_{\text{ha}}^{\text{OH}}$: **ha.an/ J_{OH}**

Taux locaux r_j et globaux R_j

R_{dsl} en J_D/J_{OH}

> flux sur un cycle

Op.méca.
exploitation

⇒ ha.an

↑ $E_{\text{D-m}}$: diesel

> taux local opération r_{dsl} en $J_D/\text{ha.an}$

> taux global diesel $R_{\text{dsl}} = r_{\text{dsl}} \times w_{\text{ha}}^{\text{OH}}$ en J_D/J_{OH}

$$\Rightarrow w_{\text{ha}}^{\text{OH}} : \text{ha.an}/J_{\text{OH}} = \underbrace{\text{ha.an}/t_A}_{Y_A} \times \underbrace{t_A/t_S}_{(x_s)^{-1}} \times \underbrace{t_S/t_{\text{OH}}}_{(y_{\text{OH}})^{-1}} \times \underbrace{t_{\text{OH}}/J_{\text{OH}}}_{(\text{PCI}_{\text{mOH}})^{-1}}$$

$$\Rightarrow w_{\text{ha}}^{\text{OH}} : \text{ha.an}/J_{\text{OH}} = 1/Y_A \times (x_s)^{-1} \times (y_{\text{OH}})^{-1} \times (\text{PCI}_{\text{mOH}})^{-1}$$

Y_A : rendement agricole en $t_A \cdot (\text{ha.an})^{-1}$

x_s : fraction de sucre ou amidon en $t_s \cdot t_A^{-1}$

PCI_{mOH} : pouvoir calorifique massique de l'éthanol = $26,8 \text{ GJ}_{\text{pci}} \cdot t_{\text{OH}}^{-1}$

Taux locaux r_j et globaux R_j

Op.méca.
exploitation

⇒ ha.an

$$\Rightarrow w_{ha}^{OH} : 1/Y_A \times (x_s)^{-1} \times (y_{OH})^{-1} \times (PCI_{mOH})^{-1}$$

> y_{OH} : **taux de production d'éthanol** en $t_{OH} \cdot t_s^{-1}$ (en usine)

glucose > éthanol + CO_2 $y_{OH} = 0,511 \times \alpha_{OH}$

ou amidon + eau > éthanol + CO_2 $y_{OH} = 0,568 \times \alpha_{OH}$

α_{OH} : fraction de sucre/amidon convertie en éthanol.

Par conservation massique < 1

Rendement de Pasteur (limite naturelle) < 0,94

Données et analyses

Op.méca.
exploitation \Rightarrow

$r_{dsl} : J_{pci} \cdot (ha \cdot an)^{-1}$

W_{ha}^{OH}

$$r_{dsl} \times (Y_A)^{-1} \times (x_s)^{-1} \times (0,511/0,568 \times \alpha_{OH})^{-1} \times (PCI_{mOH})^{-1} = R_{dsl} \text{ (en } J_{pci} \cdot J_{OH}^{-1})$$

$$CS : 4,6 \times (73)^{-1} \times (0,145)^{-1} \times (0,511 \times 0,83)^{-1} \times (26,8)^{-1} = 3,8 \%$$

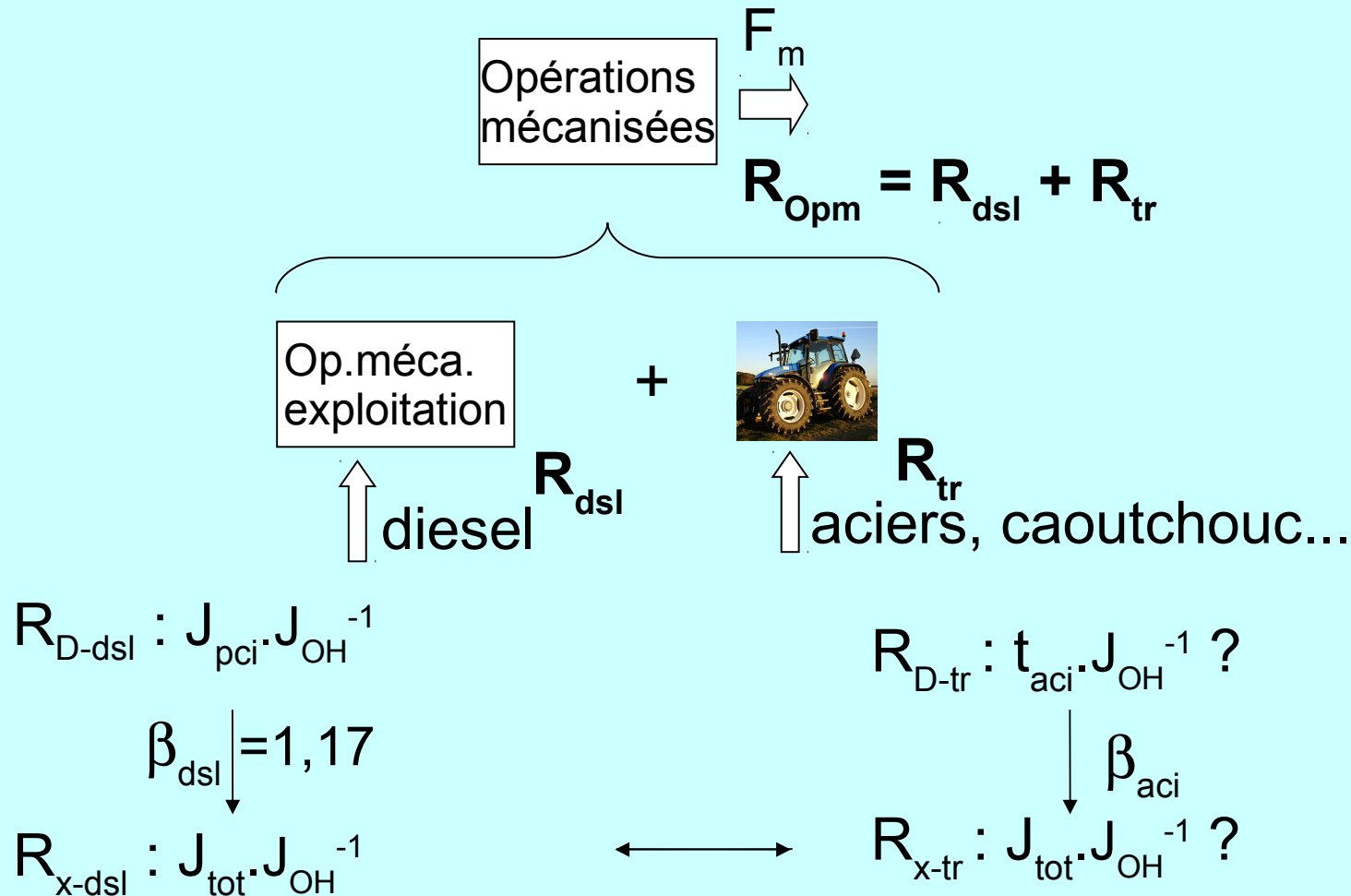
$$BS : 5,7 \times (66)^{-1} \times (0,180)^{-1} \times (0,511 \times 0,83)^{-1} \times (26,8)^{-1} = 3,9 \%$$

$$M : 2,4 \times (8,8)^{-1} \times (0,62)^{-1} \times (0,568 \times 0,92)^{-1} \times (26,8)^{-1} = 3,2 \%$$

$$B : 3,8 \times (9,0)^{-1} \times (0,57)^{-1} \times (0,568 \times 0,91)^{-1} \times (26,8)^{-1} = 5,3 \%$$

L'étude des séries agricoles montre que les améliorations sur w_{ha}^{OH} viennent surtout de Y_A et sont faibles. Progrès sur r_{dsl} ?

Consommations d'exploitation et d'investissement



Consommations d'exploitation et d'investissement



tracteurs,...



r_{tr}



aciers, caoutchouc...

Consommations d'investissement : r_{tr} en $J_{tot} \cdot (\text{tracteur})^{-1}$.

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

sources : fabricants Valtra, New Holland...

Filière acier recyclé : four élec + transports + usinage

$> \beta_{acier,recy} \sim 13 \text{ GJ}_{tot} / t_{acier}$

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

Consommations d'exploitation et d'investissement



$$R_{tr}^{OH} \text{ en } J_{tot} \cdot J_{OH}^{-1} ?$$

Consommations d'investissement : $r_{tr} \sim 80 \text{ GJ}_{tot} \cdot tr^{-1}$.

$$R_{tr}^{OH} = r_{tr} \times w_{tr}^{OH} = r_{tr} \times w_{tr}^m \times w_{ha}^{OH}$$

$1/w_{tr}^m$ en (ha.an)/tr : nombre d'ha traités pendant la durée de vie du tracteur.

Sources : d'après fabricant Valtra : 22 000 h possibles pour ses tracteurs.

D'après US EPA un moteur diesel (voiture ?) : 4 000 h à pleine charge.

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

D'où $1/w_{tr}^m \sim (20\,000 \text{ h/tr}) / (5 \text{ h/(ha.an)}) = 4\,000 \text{ ha.an.tr}^{-1}$ (= 20 ans x 200 ha/tr)

$$r_{tr} \times w_{tr}^m \text{ env. } 20 \text{ MJ}_{tot} \cdot (\text{ha.an})^{-1}$$

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 flux incomplètes, surestimation /oublis, ou 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 ? m³ (n) ou (s) ? retour du transport compri ? humidité du produit entrant ?),

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 flux incomplètes, surestimation /oublis, ou 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 ? m³ (n) ou (s) ? retour du transport compri ? 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.

Erreurs systématiques et incertitudes

- Utiliser indices (J_e , J_{tot} , J_{pci} ...), 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.

Erreurs systématiques et incertitudes

- Utiliser indices (J_e , J_{tot} , J_{pci} ...), 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.
- Niveau d'intégration ? Pays, région, compagnie, usine, procédé ? Valeur moyenne satisfaisante ou trop différente de notre cas particulier ? > rôle des variables/paramètres.
- 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.

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.

$$R = \sum_j R_j \quad \text{et} \quad R_j = \sum_j r_j w_j$$

-> écart type δR (δr_j , δw_j)

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

Erreurs systématiques et incertitudes

Traitement des incertitudes sur R_j

$$R = \sum_j R_j \quad \text{et} \quad R_j = \sum_j r_j w_j$$

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

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

$$\left. \begin{array}{l} R = R_1 + R_2 \quad \text{avec} \\ > R_1 = 0,05 R \quad \text{et} \quad \delta R_1/R_1 = 100 \% \\ > R_2 = 0,95 R \quad \text{et} \quad \delta R_2/R_2 = 5 \% \end{array} \right\} \begin{array}{l} \delta R^2 = \delta R_1^2 + \delta R_2^2 \\ = 2 (0,05)^2 R^2 \end{array}$$

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

Erreurs systématiques et incertitudes

Op.méca.
exploitation

+



$$r_{x-dsl} : 4400 \text{ MJ}_{\text{tot}} \cdot (\text{ha} \cdot \text{an})^{-1}$$

$$r_{x-tr} \times w_{tr}^m \text{ env. } 20 \text{ MJ}_{\text{tot}} \cdot (\text{ha} \cdot \text{an})^{-1}$$

$$r_{\text{Opm}} = r_{\text{dsl}} + r_{tr} \times w_{tr}^m$$

$$(\delta r_{\text{Opm}})^2 = (\delta r_{\text{dsl}}^m)^2 + (\delta[r_{tr} \times w_{tr}^m])^2$$

$$* r_{\text{dsl}}^m \sim 4400 \pm 250 \text{ MJ}_{\text{tot}} \cdot (\text{ha} \cdot \text{an})^{-1} (\text{blé})$$

$$* r_{tr} \times w_{tr}^m \sim 20 \pm \delta[r_{tr} \times w_{tr}^m] \text{ MJ}_{\text{tot}} \cdot (\text{ha} \cdot \text{an})^{-1}$$

D'où...

$$\text{avec } (\delta[r_{tr} \times w_{tr}^m] / r_{tr} \times w_{tr}^m)^2 = (\delta r_{tr} / r_{tr})^2 + (\delta w_{tr}^m / w_{tr}^m)^2$$

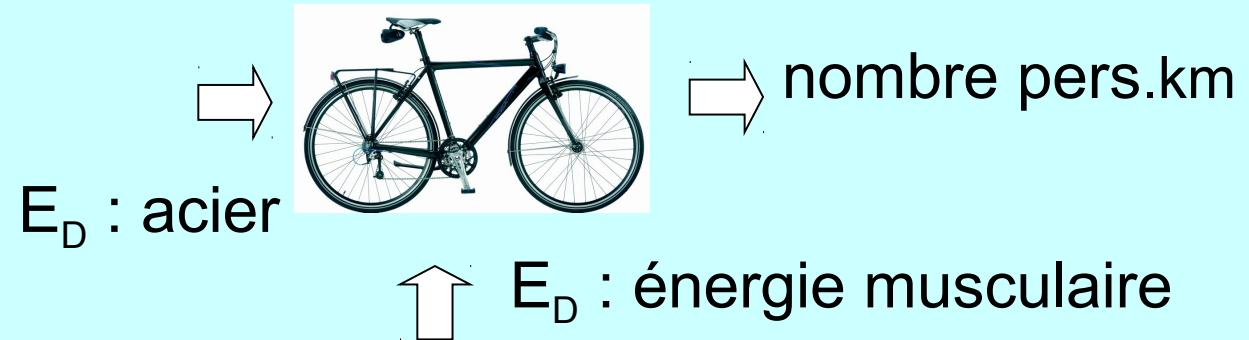
$$(\delta[r_{tr} \times w_{tr}^m] / r_{tr} \times w_{tr}^m)^2 \sim (40/80)^2 + (1,2/4)^2$$

$$\delta[r_{tr} \times w_{tr}^m] \sim \pm 12 \text{ MJ}_{\text{tot}} \cdot (\text{ha} \cdot \text{an})^{-1}$$

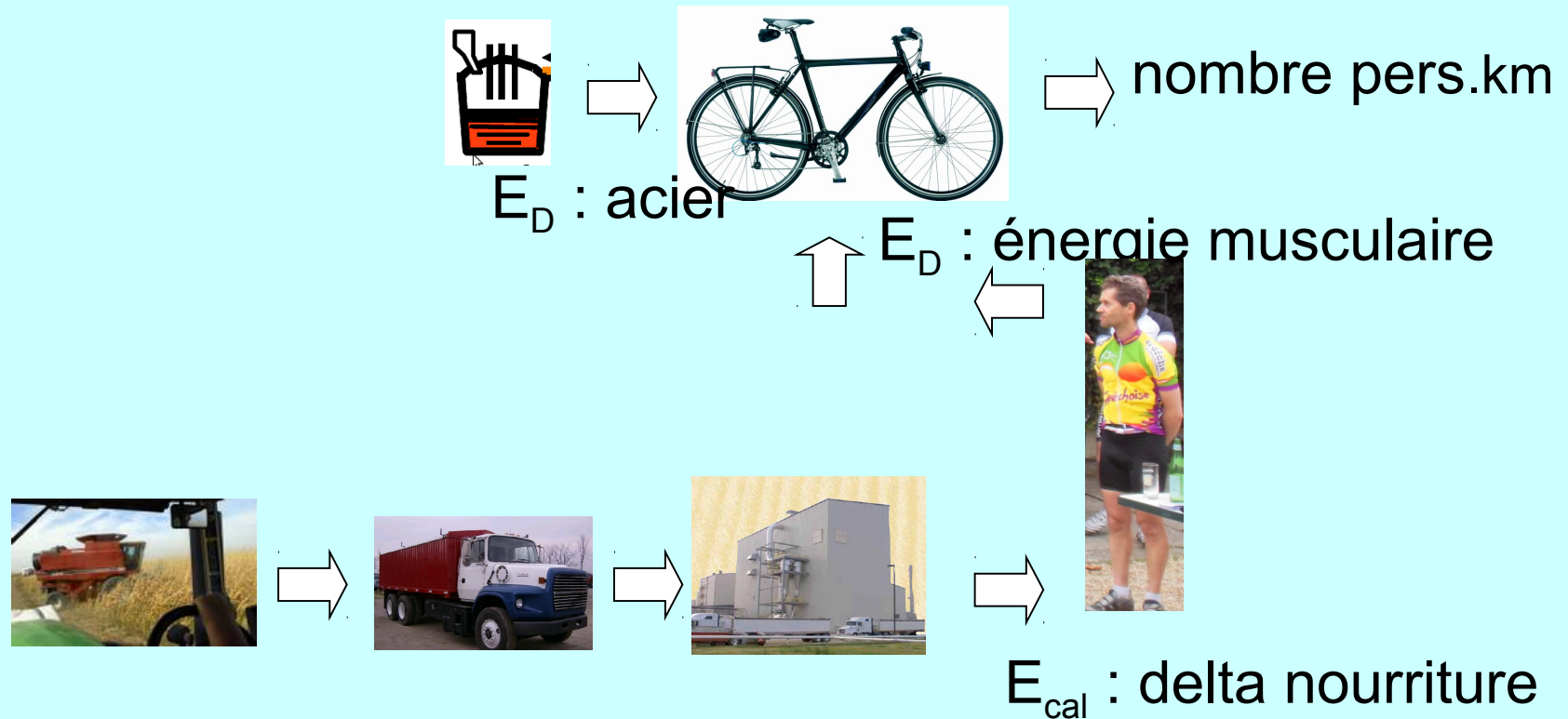
Efficacité énergétique

Mot de fin

Systeme complexe : somme de consommations



Système complexe : auxiliaires



Systeme complexe : auxiliaires d'auxiliaires

