# 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

## L'efficacité énergétique

- Importance ; ce que c'est ; ce que ce n'est pas
  - Energies brute et utile, ressources, utilisation
  - Bilans économique, CO<sub>2</sub>...
- Des données brutes à des indicateurs d'efficacité
  - Flux et taux d'une filière réelle
  - Résolution pratique : décomposition d'une filière
- Application à quelques systèmes
  - Filière pétrolière
  - Filière de la production d'acier

## L'efficacité énergétique

- Importance ; ce que c'est ; ce que ce n'est pas
  - Energies brute et utile, ressources, utilisation
  - Bilans économique, CO<sub>2</sub>...
- Des données brutes à des indicateurs d'efficacité
  - Flux et taux d'une filière réelle
  - Résolution pratique : décomposition d'une filière
- Application à quelques systèmes
  - Filière pétrolière
  - Filière de la production d'acier

## Filières énergétiques

 $E_{
m entr\'ee}$   $\Longrightarrow$   $\Sigma_{
m Op\'erations(proc\'ed\'es)}$   $\Longrightarrow$   $E_{
m sortie}$ 

#### énergies primaires

Hydrocarbures fossiles : pétrole, gaz naturel, charbon

Nucléaire: fission (U, Th),

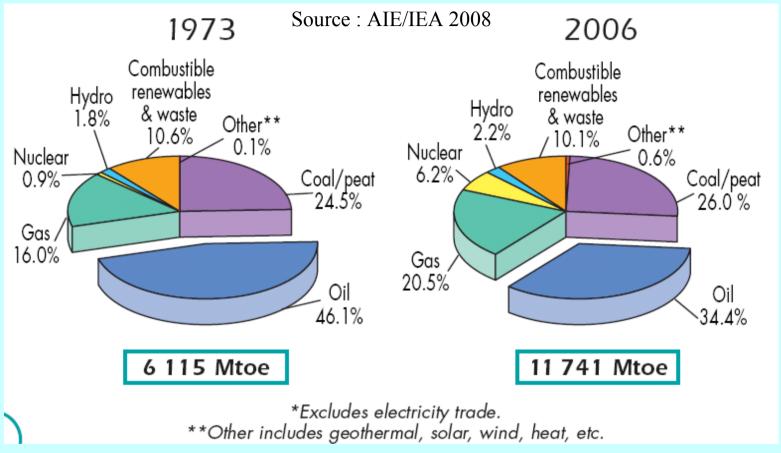
(fusion (Li<sup>6</sup>, Deutérium)?)

«Renouvelables»: soleil, vent, chutes d'eau, biomasse, vagues...

#### énergies utiles

électricité, combustibles...ou énergie mécanique des roues, chaleur à haute température, lumière, produits chimiques...

## Energies primaires dans le monde



```
Pétrole 1973: 2,7 Gtep ou 20 Gb ou 55 Mb/j; 2006: 4,0 Gtep ou 30 Gb ou 81 Mb/j; 0,71 tep/pers/an (USA: 3,6!)
```

1 tep (tonne équivalent pétrole) =  $41,868 \text{ GJ} \approx \text{PCI } 1 \text{ t pétrole}$ 

b : baril = 159 litres ; 1 baril de brut  $\approx 6.1 \text{ GJ}_{PCS}$ 

AIE : Agence Internationale de l'énergie

Oct. 2010 X. Chavanne Eff. Energie 5

- > Chauffage, transport, conservation des aliments...
- > Production d'eau potable : au Koweit 65% à partir d'eau de mer et de pétrole (2003 : 3,4 Mtep(E<sub>p</sub>) > 433 M.m<sup>-3</sup> ou 330 kJ<sub>tot</sub>.kg<sup>-1</sup>, distillation flash). Stations d'épuration (1,5 kJ<sub>e</sub>.kg<sup>-1</sup> à 0,13 g<sub>DBO</sub>.l<sup>-1</sup>)...
- > Production d'engrais (méthane -> NH<sub>3</sub>)...
- > Prévention et traitement des pollutions : désulfuration des carburants (H₂), épuration des fumées des centrales thermiques (absorbeur à régénérer)...
- > Recyclage métaux, verre (qques MJ, .kg<sup>-1</sup>)...

>...

Sources: WEO 2005, Degrésmont Suez

En France pour 2009

E



ΣValeurs ajoutés



PIB : 2000 G€

#### Energies consommées

Pétrole brut 95 Mtep > 45 G€ Gaz naturel 38 Mtep > 10 G€ Charbon 13 Mtep > 1,3 G€ Electricité nette (nucl. et renouv.) 450 TWh (39 Mtep<sub>e</sub>) > 20 G€

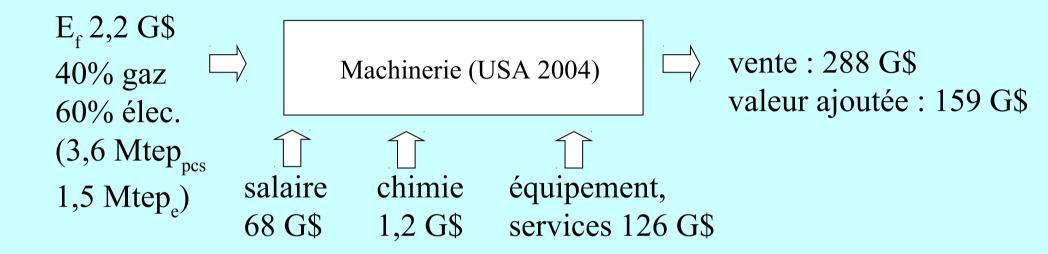
#### **Produit Intérieur Brut**

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

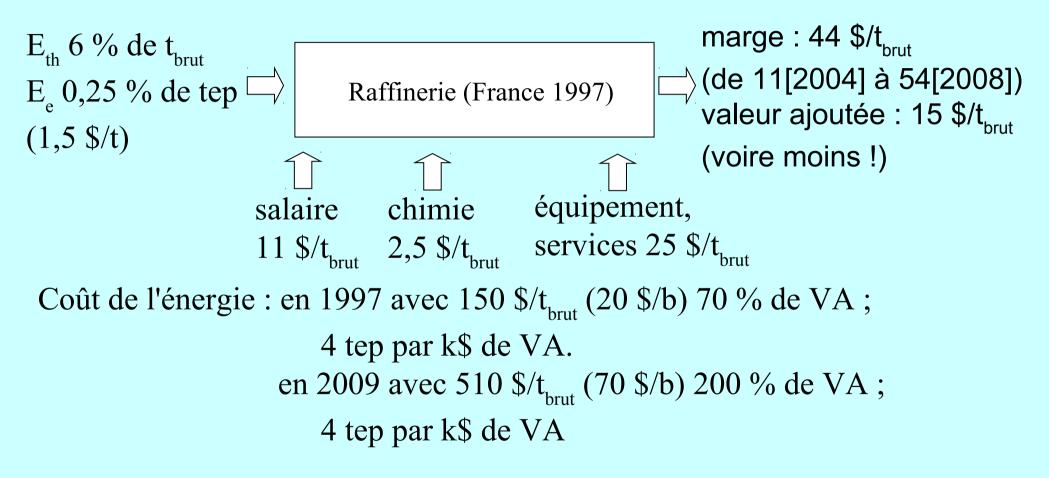
Source : ministère du développement durable, BP statistical review of world energy 2010



Coût de l'énergie : 1,4% de la valeur ajoutée ; 26 kep par k\$ de VA

Similaire aux données à l'échelle d'un pays (attention 2004)

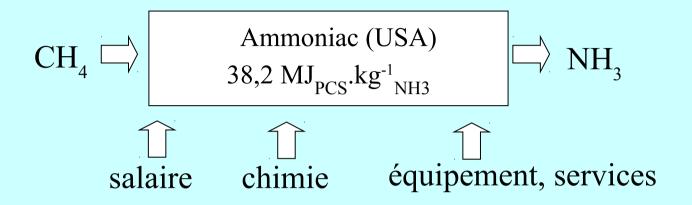
Source: Oil&Gas Journal 28 juillet 2006



Très différent de la situation à l'échelle d'un pays

Source : Fuels&Engines IFP 1999 ; Industrie pétrolière et gazière en 2008. DGEC-DGE.

X. Chavanne Eff. Energie



```
En 2000 : vente à 132 $/t_{NH3} (250 $/t_{NH3} à la ferme) ; prix du gaz 3 $/GJ_{PCS} ou 115 $/t_{NH3}. En 2007 : vente à 350 $/t_{NH3} (575 $/t_{NH3} à la ferme) ; prix du gaz 13 $/GJ_{PCS} ou 500 $/t_{NH3}.
```

Fermeture des usines petites et inefficaces. Augmentation des importations de NH<sub>3</sub>.

Source: Department of Agriculture USA 2007

## Filières énergétiques

 $E_{
m entr\'ee}$   $\square$   $\Sigma$  Opérations(procédés)  $\square$   $E_{
m sortie}$ 

#### énergies primaires

Hydrocarbures fossiles : pétrole, gaz naturel, charbon

Nucléaire: fission (U, Th),

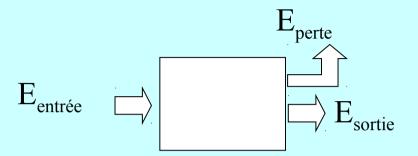
(fusion (Li<sup>6</sup>, Deutérium)?)

«Renouvelables» : soleil, vent, chutes d'eau, biomasse, vagues...

#### énergies utiles

électricité, combustibles...ou énergie mécanique des roues, chaleur à haute température, lumière, produits chimiques...

## L'efficacité énergétique



E<sub>perte</sub>: énergie non récupérée (chaleur basse température, énergie des déchets...)

 $E_{\text{entrée}} = E_{\text{sortie}} + E_{\text{perte}}$  (1er principe de la thermodynamique)

E<sub>perte</sub> est dissipée (2e principe de la thermodynamique)

Rendement Y = 
$$\frac{E_{\text{sortie}}}{E_{\text{entrée}}}$$
;  $0 \le Y \le 1$  ou 100 %

N.B.: taux de dissipation R = 
$$\frac{E_{perte}}{E_{entrée}}$$
 = 1-Y; 0 ≤ R ≤ 100 %

## Importance de l'efficacité énergétique

Ressource -> E<sub>entrée</sub> = quantité d'énergie extractible

La disponibilité utile d'une énergie va dépendre aussi du

$$\mathbf{E}_{\text{sortie}} = \mathbf{Y}_{\mathsf{x}} \mathbf{E}_{\text{entrée}}$$

\*Gisements avec Y = 45 %

(charbon presque pur en surface avec une centrale moderne):

$$E_{\text{sortie}} = 0.45 \times E_{\text{entrée}}(45\%)$$
 (électricité)

\*Gisements avec Y = 15 % (beaucoup d'impuretés - eau,cendre -) :

$$E_{\text{sortie}} = 0.15 \times E_{\text{entrée}} (15\%)$$

$$=> E_{entrée}(45\%) = 3 \times E_{entrée}(15\%)$$

## Importance de l'efficacité énergétique

#### Equivalence des énergies

Soit 2 énergies E<sub>entrée1</sub> et E<sub>entrée2</sub> telles que :

$$PCS(E_{entrée1}) = PCS(E_{entrée2})$$

1 J<sub>th</sub> de chaleur nucléaire et 1 J<sub>PCS</sub> de pétrole brute

E<sub>sortie</sub> : énergie au niveau des roues à partir de 1 J<sub>PCS</sub>

$$E_{\text{sortie1}} = Y_1(\text{\'elec.})_{\times} E_{\text{entr\'ee1}} \neq E_{\text{sortie2}} = Y_2(\text{carburant})_{\times} E_{\text{entr\'ee2}}$$

Y fournit une sorte d'équivalence entre énergies primaires (ou intermédiaires)

## Abondance d'une ressource ≠ efficacité de sa filière

```
*Pétrole brute > essence :
```

de 0,09 à 0,21 J<sub>PCS</sub> dissipée par J de PCI(essence).

\*Maïs aux Etats Unis > ethanol:

de 0,7 à 1 J<sub>PCS</sub> dissipée par J de PCI(ethanol).

#### Et pourtant :

\*Pétrole brute > énergie de stock ou finie > pic de production.

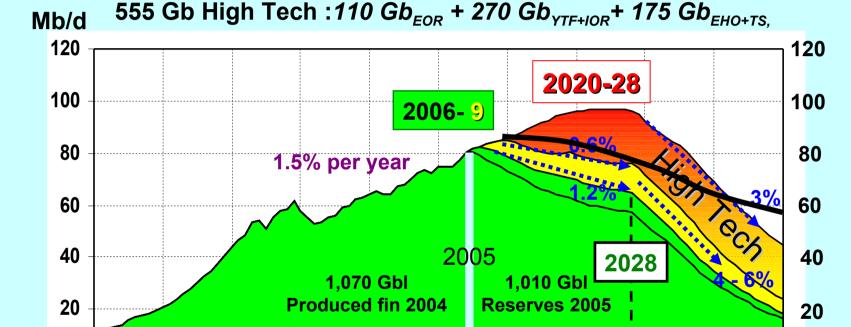
\*Maïs > énergie de flux permanent (tant que le soleil brille + eau + NPK...).

Oct. 2010

## Maximum de production de pétrole

SCENARIO MOYEN: 1,700 Gb quantité restante incluant :

120 Gb Discovered not yet produced



Source: Yves Mathieu IFP 2006

## Relation ressource/efficacité

R dépend des caractéristiques de la ressource

Concentration énergétique entre ressources (E<sub>entrée</sub> par m³):

1 m³ de «yellow cake» libèrera via un REP env. 2800 TJ<sub>th</sub>

1 m³ de pétrole brute contient env. 40 GJ<sub>PCS</sub>

1 m³ d'eau sur 100 m de hauteur fournit env. 1 MJ<sub>méca</sub>

1 m³ d'air à 25 km/h contient env. 30 J<sub>méca</sub> (la moitié récupérable)

=> E<sub>perte</sub> par m³ doit être inférieur à E<sub>entrée</sub> par m³

L'énergie éolienne part avec un lourd handicap!

## Relation ressource/efficacité

R dépend des caractéristiques de la ressource

#### Variation de Y entre gisements d'une même ressource :

Pour U, suivant la concentration, la profondeur, la forme minérale, le procédé... (mine ; faible contribution au niveau de toute la filière).

Pour le pétrole brut, suivant sa mobilité dans la roche, la profondeur, la présence d'autres fluides (sur le champ), son éloignement des centres de consommation, de la densité, teneur en S (raffinerie).

Pour l'hydroélectrique, R à l'entrée réseau moins de 15%. Ressource : débits nets et hauteur de chute (potentiel d'un pays).

<u>Pour l'éolien</u>, vitesse moyenne, turbulence (fatigue), variabilité (gestion réseau), taille, accessibilité (?). Différences entre terre et mer.

## Relation ressource/efficacité

#### R peut fixer les quantités extractibles de la ressource

Ressource en **HC fossile** dans la croûte terrestre : approximativement **10 000 Tt de C** sous forme réduite  $(CH_x)$ ! (d'après quantité de  $CO_2$  initialement présent dissociée pour fournir  $O_2$  de l'air et oxydes dans la croûte).

L'essentiel sous forme très diluée à différentes profondeurs => R très élevé (>1!).

Réserves initiales possibles de charbon de 2000 à 4000 Gt 400 Gt pour le pétrole, à peu près pareil pour le gaz naturel.

N.B.: en réalité critères économiques plus stricts que R, mais évoluant et difficilement prévisibles (souvent subjectifs).

## 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. 19°C à 21°C, 10 m² de plus par personne)

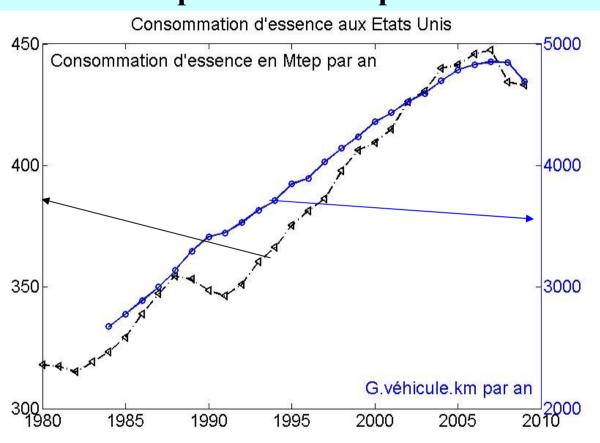
#### Ecrans de télévision :

- >efficacité de la consommation par unité de surface
- >Mais écrans plus grands, plus nombreux (salles d'attente) et plus souvent allumés.
- 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 jusqu' à 2007 de la distance parcourue par tous les véhicules à moteur sur route.

Croissance simultanée de la consom -mation d'essence, sauf autour de 90 (politiques d'économie d'énergie décidées en 1973 et 1979).

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

2007-08 : choc pétrolier ; triplement du prix de l'essence ! Fin 2008 : choc économique.

Baisse de deux courbes.

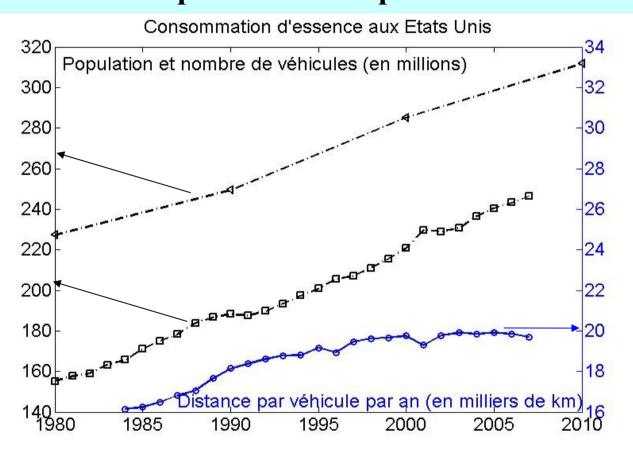
Sources: EIA, Department of Energy. USA 2010. The Transportation Energy Data Book, ed. 28, Department of Energy. USA 2010.

Oct. 2010

X. Chavanne Eff. Energie

# Usage d'une énergie utile efficacité d'obtention

#### Cas des déplacement des particuliers aux EUd'A :



Croissance de la population depuis 1980 => croissance du parc automobile concomitante, voire plus rapide!

Croissance de la distance annuelle par véhicule jusqu'en 2000

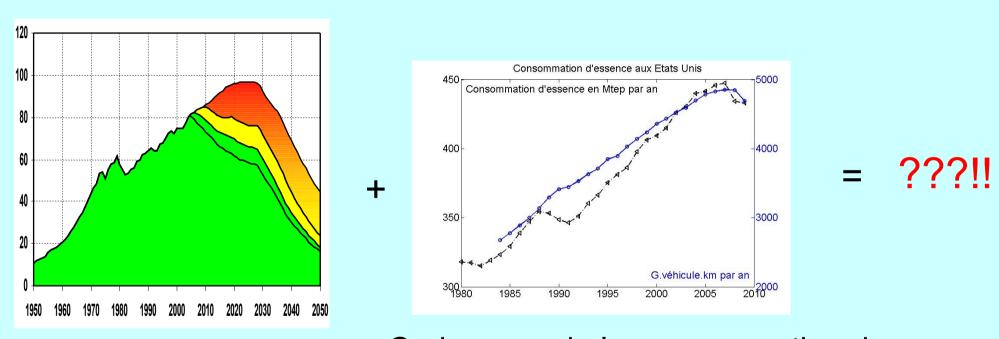
Le pays dont les habitants consomment le plus de pétrole n'est pas rassasié!!

Sources: census bureau, USA 2010. The Transportation Energy Data Book, ed. 28, Department of Energy. USA 2010.

Oct. 2010

X. Chavanne Eff. Energie

## Pic de pétrole + consommation accrue = le choc



Maximum de production

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

## Bilan CO₂ fossile ≠ bilan énergie

Objectif : estimer l'émission équivalente de CO<sub>2</sub> fossile d'une filière

Données de base communes avec bilan énergie MAIS pas le même objectif et donc pas les mêmes résultats

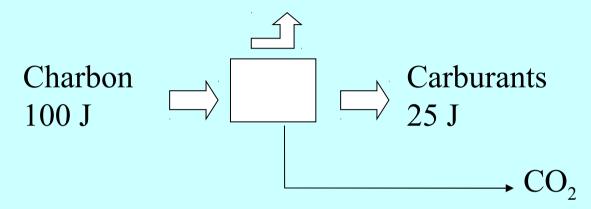
$$g_{CO2}/MJ_{entr\'ee}: \ e_{CO2} = \sum R_j . \ coeff_jCO_2 + \delta . \ coeff_{en}CO_2$$
 Combustibles fossiles 
$$= 1$$
 Autres énergies 
$$= 0$$

**coeff**<sub>e</sub>**CO**<sub>2</sub>**(charbon)**: CH + 3/2 O<sub>2</sub>---> 1/2 H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> + 
$$\Delta$$
H   
13 g ---> + 44 g + 480 kJ<sub>PCS</sub>

D'où env. pour le charbon 90 g<sub>CO2</sub>/MJ<sub>PCS</sub>

## Bilan CO₂ fossile ≠ bilan énergie

Projet de production de carburants à partir de charbon avec capture et séquestration de CO<sub>2</sub>



Procédé d'absorption du CO<sub>2</sub> par des amines (procédé établi dans le traitement du gaz naturel)

$$R = 75 \% !!!$$

Source: Oil&gas Journal 2007

## Bilan financier≠ bilan énergie

Ex. : développement pétrolier dans le bassin de Doba au Tchad, Estimation en 1999 des coûts sur durée de vie

#### Ventes:

883 Mb  $\times$  **15,6** \$/b > 13,7 G\$

#### Coûts pour les champs :

invest. 1,75 G\$ (300 puits + installations) **13%/ventes** exploit. 2,15 G\$ (salaires, maintenance) **16%/ventes** 

#### **Coûts pour le transport (oléoduc)**

invest. 1,65 G\$; opérat. 2,55 G\$

**Autres** > 1,1 G\$

#### E<sub>entrée</sub>:

883 Mb  $_{\times}$  6,1 GJ<sub>pcs</sub>/b > 5 400 PJ<sub>pcs</sub>

#### Coûts pour les champs :

invest. forage: 0,15  $PJ_{pcs}$  tubages d'acier : 0,5  $PJ_{pcs}$  **0%/E\_{entrée}** exploit. (élec. du gaz ou brut **gratuit**) 0,02  $J_{e}/J_{pcs}$  ou **2** %

#### Coûts pour le transport (oléoduc)

invest. 3  $PJ_{pcs}$  **0,06 %**; opérat. 0,9 %

Bilan financier revu fin 2006 : prix de vente 33 \$/b et coûts sur champ 2 à 3 fois plus.

Source: Oil&Gas Journal 28 July 2008; plan de développement d'Esso Tchad 1999

Oct. 2010 X. Chavanne Eff. Energie 26

## Bilan financier ≠ bilan énergie

Dans un bilan financier contraintes autres qu'énergétiques :

- •Salaires (N.B. 95 000 salariés de Total consomment 0,3% de E<sub>entrée</sub>)
- •Coûts des produits et services d'autres secteurs à plus forte valeur ajoutée (en particulier poids de l'investissement de départ),
- Retour sur investissement rapide (taux d'actualisation),
- Prix du marché (effet de la spéculation),
- Taxes, impôts,
- Amendes pour retard.

Certains facteurs sont fluctuants à court terme (prix de ventes, taxes) ne permettant pas de faire de prévisions. Le coût de l'énergie a souvent un poids négligeable (sauf industries lourdes)!

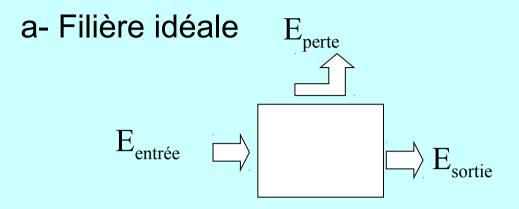
## Résumé 1ère partie

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

- Diffère de l'abondance d'une ressource ; mais dépend de ses caractéristiques.
- Diffère de la consommation finale par la société et les hommes. Sobriété/gaspillage.
- Diffère du bilan de CO<sub>2</sub> équi. émis par l'homme. Données de base communes.
- Diffère du bilan financier qui agrège beaucoup d'autres facteurs de plus court terme mais importants pour nos économies. Analogies de termes.

## L'efficacité énergétique

- Importance ; ce que c'est ; ce que ce n'est pas
  - Energies brute et utile, ressources, utilisation
  - Bilans économique, CO<sub>2</sub>...
- Des données brutes à des indicateurs d'efficacité
  - Flux et taux d'une filière réelle
  - Résolution pratique : décomposition d'une filière
- Application à quelques systèmes
  - Filière pétrolière
  - Filière de la production d'acier



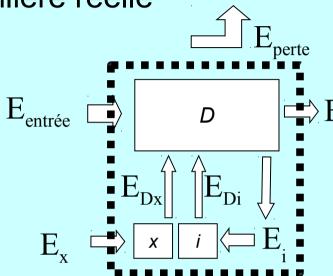
Taux de dissipation R = 
$$\frac{E_{perte}}{E_{entrée}}$$
 = 1 -  $\frac{E_{sortie}}{E_{entrée}}$ 

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

b- Filière réelle



D: chaine directe des procédés pour passer de  $E_{\rm entrée}$  à  $E_{\rm sortie}$ .

 $E_D = E_{Dx} + E_{Di}$ : énergies directes pour *D* (électricité, chaleur haut T, produits chimiques, matériel).

x: chaîne de procédés (centrales électriques, aciéries...) pour produire  $E_{\rm Dx}$  à partir de  $E_{\rm x}$ .

E<sub>x</sub>: autres énergies primaires (hydrocarbures...).

*i* : chaîne de procédés pour produire en interne E<sub>Di</sub>.

E<sub>i</sub> : énergies prélevées dans la chaîne directe (issues de E<sub>entrée</sub>).

b- Filière réelle

Quel(s) R?

Taux de dissipation théorique 
$$R^{en+x} = \frac{E_{perte}}{E_x + E_{entrée}} = 1 - \frac{E_{sortie}}{E_x + E_{entrée}}$$

Ou 
$$R^{en} = \frac{E_{perte}}{E_{entrée}} = 1 - \frac{E_{sortie} - E_x}{E_{entrée}} > 1!$$
 (pas de conservation)

Ou 
$$R_x^{en} = \frac{E_x}{E_{entrée}}$$
,  $R_D^{en} = \frac{E_D}{E_{entrée}}$ ,  $R_x^{sor} = \frac{E_x}{E_{sortie}}$ ,  $R_D^{sor} = \frac{E_D}{E_{sortie}}$ 

> Bien définir les variables de travail (utiliser indices). Relations entre indicateurs connues si données complètes.

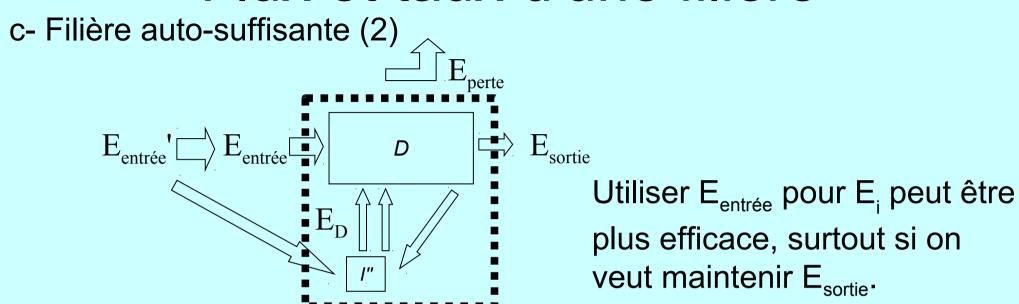
L'efficacité dépend de procédés extérieurs ! Production électrique : Norvège > 98% chute d'eau ( $Y_x = 100 \%$ ), Pologne > 98% charbon ( $Y_x = 33 \%$ ). Indiquer  $R_D$ !

c- Filière auto-suffisante (1)  $E_{perte}$   $E_{entrée}$  D  $E_{sortie}$   $E_{sortie}$ 

A partir d'une filière réelle et de procédés existants

Filière pétrole : utilisation de produits de la raffinerie (carburants pour forages, groupes électrogènes, transport). Combustibles pour les aciéries et autres usines.

Problème : E<sub>sortie</sub>' plus faible, voire nulle et E<sub>D</sub> insuffisant



- -Filière pétrole : utilisation du gaz associé voire du brut sur le champ ou dans les conduites de transport,
- -Filière éthanol par fermentation cellulosique : bois à la fois matière première et combustibles (CSIRO 1999).

#### Problèmes : procédés ? Ressource suffisante ?

#### d - Contraintes imposées à la filière et à son efficacité

- Procédés au moins en pilote industriel (non en laboratoire ; extrapolable). Durée de vie estimée. Fiabilité.
- Minimum de rentabilité économique : qualité des produits, productivité, amortissement des équipements...
- Flux contraint à la demande (compenser les intermittences).
- Contrôle des pollutions (neutralisation de CO et NH<sub>3</sub> par oxydation, désulfuration par H<sub>2</sub>, piégeage par absorbeur...). N.B.: polluants en faible concentration > consommations faibles.
- Sécurité et sûreté (enceintes supplémentaires...).
   N.B.: éruption de pétrole dans le Golfe du Mexique: non suivi des procédures par économie financière!

## Résolution pratique

Principe : séparer un problème complexe en sous problèmes plus simples

But : arriver à un, ou plusieurs, indicateurs énergétiques R choisis pour la filière.

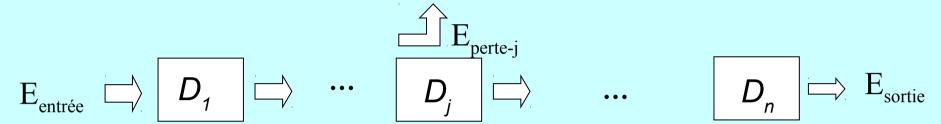
Systématisation de procédures utilisées dans des cas particuliers, avec des outils formels (taux de consommation ou consommations spécifiques). > réduire erreurs/oublis, déterminer les paramètres clés.

Méthode d'analyse suffisamment flexible pour l'étude de toutes les filières énergétiques et permettre des comparaisons.

Idem pour l'étude d'un sous ensemble de la filière.

Méthode valable aussi pour des filières non énergétiques, i.e. pour produire une unité de bien ou de service : coût de fabrication d'une puce électronique en J/cm², d'un panneau photovoltaïque de Si en J/Wc, d'une téléconférence en J/heure (contrats avec France Télécom, Hélios-Energie)

 1 – Décomposition en opérations/sous-opérations de flux identifiables



Décomposition pouvant aller jusqu'au niveau du procédé.

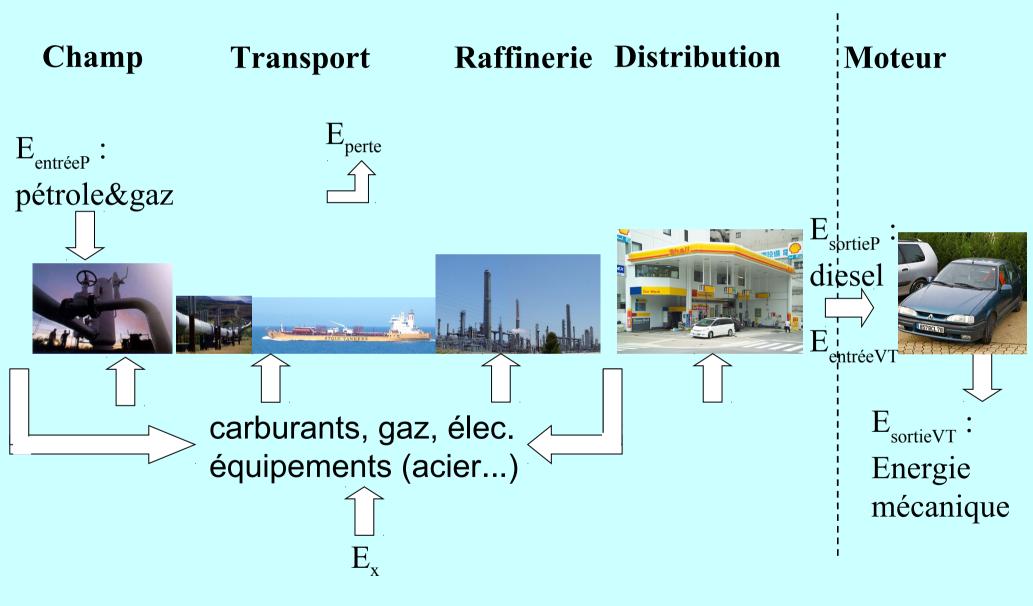
Bien définir  $E_{\text{entrée}}$  et  $E_{\text{sortie}}$ . Traitement par sous-filières p où  $E_{\text{sortie-p}} = E_{\text{entrée-p+1}}$ . Par ex. carburant =  $E_{\text{sortie}}$ (raffinerie) =  $E_{\text{entrée}}$ (voiture).

But: R = 
$$\frac{E_{\text{perte}}}{E_{\text{entrée}}}$$
 = 1 -  $\frac{E_{\text{sortie}} - E_{x}}{E_{\text{entrée}}}$  (autres choix possibles)

n étapes en série : 
$$R = \Sigma R_j$$
  $R_j = \frac{E_{perte-j}}{E_{entrée}}$ 

Oct. 2010

## Filière pétrolière

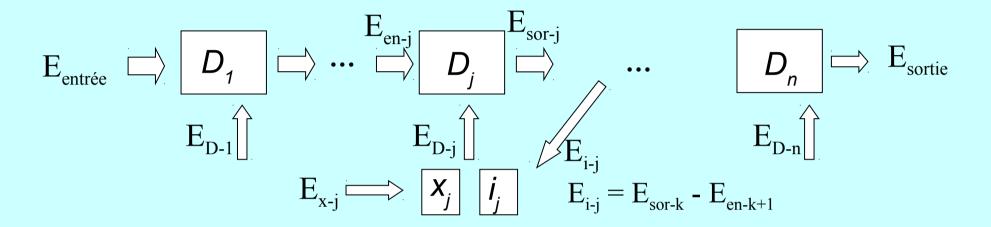


Oct. 2010

X. Chavanne Eff. Energie

38

2 – Collecte des données de flux à chaque opération



+ Information sur les procédés de chaque opération : identifier les **paramètres physiques et techniques** pouvant modifier leur bilan d'énergie.

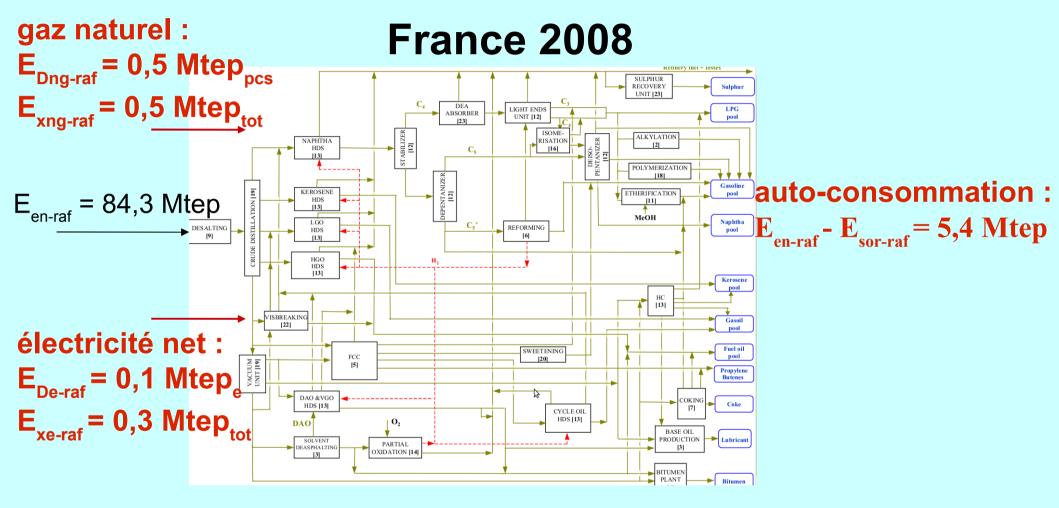
#### **Sources d'information:**

<u>Flux</u>: rapports de compagnies, de bureaux d'étude directement ou via articles scientifiques ou rapports d'agences nationales ou internationales (AIE...) <u>Informations techniques</u>: encyclopédies, aides-mémoires (thermique, génie chimique...), livres de 2 ou 3e cycle d'étude...

Beaucoup via l'Internet, mais pas seulement!

Oct. 2010



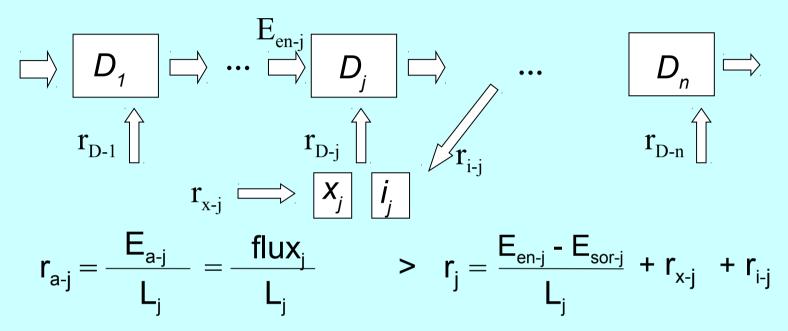


A elle seule, filière avec opérations en série (et aussi en parallèle).

Source : Industrie pétrolière et gazière en 2008. DGEC-DGE.

Oct. 2010

3 – Taux locaux de chaque opération



 $L_j$ : flux  $E_{en-j}$  ou  $E_{sor-j}$  ou une de leurs caractéristiques (masse, surface ou unité...) suivant le plus naturel ou usité pour  $D_j$ .

Procédé/groupe de procédés  $D_j$  &  $r_{D-j} \rightarrow modules \rightarrow base de données$ 

N.B.:  $E_{D-j}$  et  $r_{D-j}$  peuvent être sous forme matériel (ex. masse d'acier  $t_{acier}$ ). L'énergie sera consommée dans la filière externe  $x_j$ :

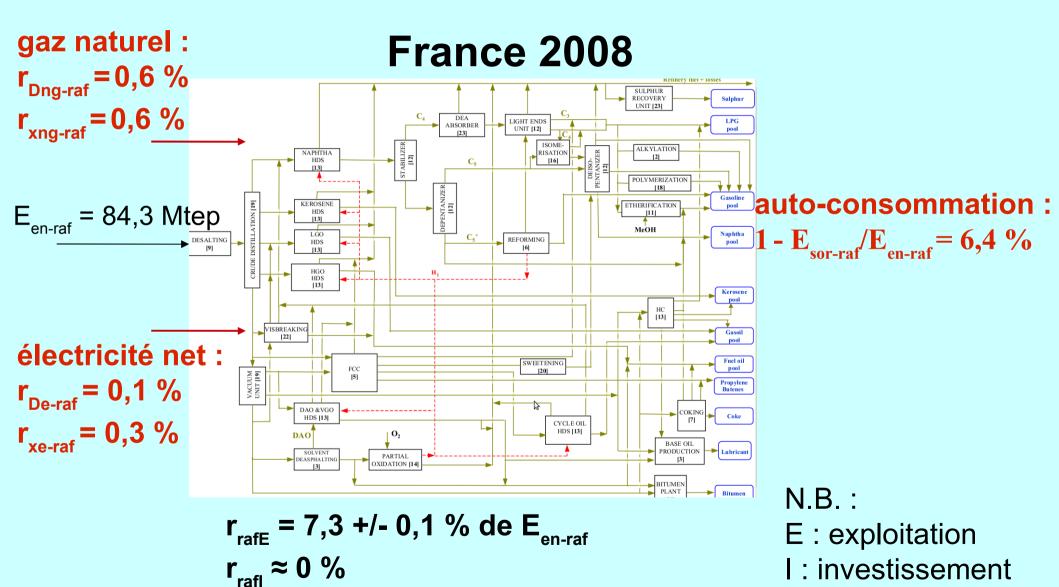
$$\rightarrow \beta_{x-j}$$
 (ex.  $GJ_{tot}/t_{acier}) \rightarrow r_{x-j} = \beta_{x-j} r_{d-j}$ .

Oct. 2010

X. Chavanne Eff. Energie

41





Oct. 2010

X. Chavanne Eff. Energie

42

4 – Consommations d'exploitation et d'investissement

#### Consommations d'exploitation :

$$\mathsf{E}_{\mathsf{D}\text{-}\mathsf{j}} = \alpha \; \mathsf{L}_{\mathsf{j}} \; \Longrightarrow \; \mathsf{r}_{\mathsf{D}\text{-}\mathsf{j}}$$

Pertes propres, matériels et énergies consommés pour le fonctionnement des équipements et procédés...

#### Consommations d'investissement :

E<sub>D-j</sub> non relié directement à L<sub>j</sub>

Fabrication, maintenance et démantèlement des équipements (bâtiments, usines, véhicules... éoliennes, centrales, panneaux photovoltaïques, ... ).  $r_{D-j}$ ': consommation de ressources par unité d'équipement.

1/w<sub>j</sub>' : quantité de L<sub>j</sub> traitée pendant la durée de vie de l'équipement.

$$\mathsf{r}_{\mathsf{D}\mathsf{-}\mathsf{j}} = \mathsf{r}_{\mathsf{D}\mathsf{-}\mathsf{j}}' \mathsf{*} \mathsf{w}_{\mathsf{j}}'$$

Oct. 2010

5 – Taux globaux de chaque opération

$$R_{a-j} = r_{a-j} w_j$$
 avec  $w_j = \frac{L_j}{E_{entrée}} = un paramètre physico-technique$ 

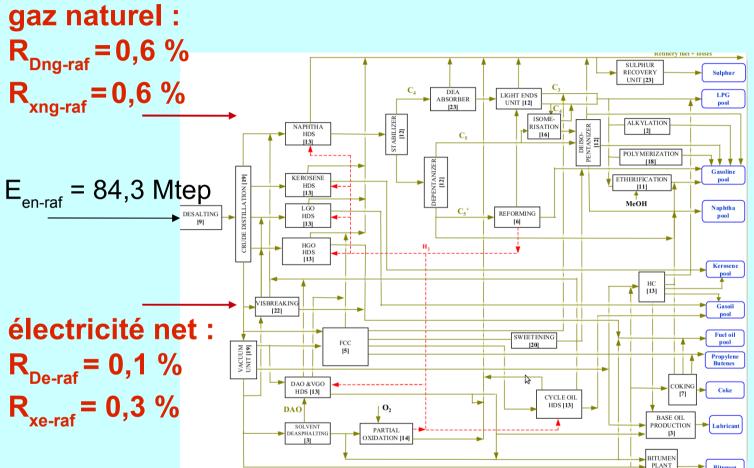
ex :  $w_j$  = masse de grain de blé correspondant à 1  $J_{pcs}$  de matière sèche (ferme) ; ou quantité de  $J_{pci}$  d'éthanol à partir du même  $J_{pcs}$  (usine).  $w_j$  inclut pertes et conversions.

 $R_j = r_{j^*} w_j$ 

Oct. 2010



$$si E_{en-raf} = E_{entrée}, w_{raf} = 1$$



# auto-consommation:

$$(E_{\text{en-raf}} - E_{\text{sor-raf}})/E_{\text{entrée}}$$
  
= 6,4 %

 $R_{rafE} = 7.3 +/- 0.1 \% de E_{en-raf}$  $R_{rafl} \approx 0 \%$ 

X. Chavanne Eff. Energie

N.B.: si autoconsommation amont, w<sub>raf</sub> ≈ 0,97 et R<sub>rafE</sub> = 7,1 +/- 0,1 %.

45

Oct. 2010

### Transport U depuis le Niger



U des mines d'Areva (Niger) acheminé depuis Arlit jusqu'en France (2 à 3 000 t<sub>...</sub>/an)

1,4  $t_{YC} \rightarrow 1 t_{U} \rightarrow 3600 \text{ tep}_{e} \text{ ou } 155 \text{ TJ}_{e} \text{ (REP en France)}$ 

$$r_{x-camion} \sim 1,50 \text{ MJ}_{tot}.(km.t_{charge})^{-1} \rightarrow R_{x-camion} \sim 1,7 \text{ GJ}_{tot}.t_{U}^{-1}$$
 $v_{camion} \sim 1,4 \times 800 \text{ (}t_{charge}.km.t_{U}^{-1})/155 \text{ (}t_{U}.TJ_{e}^{-1}\text{)}$ 

$$r_{x ext{-train}} \sim 0.20 \; ext{MJ}_{ ext{tot}}.( ext{km.t}_{ ext{charge}})^{-1} \longrightarrow R_{x ext{-train}} \sim 0.3 \; ext{GJ}_{ ext{tot}}.t_{ ext{U}}^{-1} \ ext{W}_{ ext{train}}^{ ext{U}} \sim 1.4 \times 1000/155 \; t_{ ext{charge}}. ext{km.TJ}_{ ext{e}}^{-1} \ ext{(pas de pertes)} \ R_{x ext{-transU}} \sim 2.8 \; ext{GJ}_{ ext{tot}}.t_{ ext{U}}^{-1}/\ 0.002\% \; ext{de J}_{ ext{e}}$$

$$r_{x ext{-bateau}} \sim 0.10 \text{ MJ}_{tot}.(km.t_{charge})^{-1}$$
 $v_{bateau}^{U} \sim 1.4 \times 6000/155 t_{charge}.km.TJ_{e}^{-1} \rightarrow R_{x ext{-bateau}} \sim 0.8 \text{ GJ}_{tot}.t_{U}^{-1}$ 

Source: Chavanne X, Frangi JP. Comparison of the energy efficiency to produce agroethanol between various industries and processes: the transport. Submitted to Biomass&Bioenergy 2010.

### Ligne THT depuis le Niger

Ligne de très haute tension de 400 kV jusqu'en France (3 000 km) pour une puissance P de 1 GW (res linéique moins de 0,01  $\Omega$ /km)



$$r_{\rm THT} \sim 0.01 \ \Omega.({\rm km})^{-1}$$

$$w^{e}_{THT} = 1G/(0,4.M)^{2}_{x}3000 \text{ W.V}^{-2}.km$$

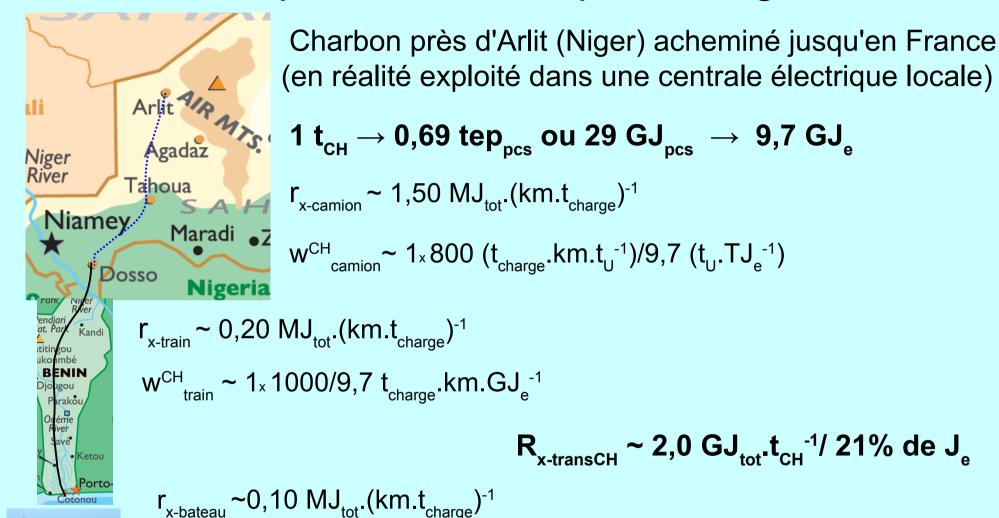
$$(P_{perte} = Rs i^2 = Rs P^2/V^2 => R_j = P_{perte}/P = Rs i^2 = Rs P/V^2)$$

$$R_{transe} \sim 20\% \text{ de } J_{e}$$

$$R_{transU} \sim 0.002\% \text{ de } J_{e}$$

Moralité : pour le nucléaire construire les centrales électriques le plus près des consommateurs (s'ils le veulent bien !).

### Transport charbon depuis le Niger



Moralité pour le charbon, cela va dépendre de son pouvoir calorifique et du type de transport (ligne de train au lieu de camions).

 $w^{CH}_{hateau} \sim 1_{x}6000/9,7 t_{charge}.km.GJ_{e}^{-1}$ 

### 6 – Analyse avec R<sub>i</sub>

Pourquoi  $R_j$ : opérations j en série, même dénominateur et numérateur =énergies équivalentes ( $E_{interne}$  +  $E_x$  ou  $E_{De}$  ou  $ED_{th}$ )

- -Comparaison entre opérations avec R<sub>i</sub>; identification des plus énergivores.
- -Analyse plus poussée sur ces opérations (travail itératif).
- -Sommation des  $R_i \Rightarrow R$ .
- -Etude influence des paramètres sur R ; tester nouveaux procédés  $(r_j)$ . Prévisions d'améliorations pour R avec plus (ex. usines éthanol au Brésil), ou moins de facilité (ITER).
- -Comparaison avec d'autres filières. Calculs d'autres R plus détaillés ( $R_D$  pour chaque forme d'énergie directe, ou  $R_{sf}$  par sous-filières), et/ou ajout à R amont ou aval pour R d'une filière plus large (« de la source à la roue »).

7- Eviter les erreurs systématiques sur R

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

- -erreur sur les données utilisées. Dans la source primaire (ex. fondations des éoliennes de Vestas), 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 ? m³ (n) ou (s) ? caractéristiques des flux (flux solaire par m² normal, horizontal ou incliné à angle fixe et total ou direct ? humidité du produit entrant ?),
- -vos propres erreurs/imprécision lors des conversions. Hypothèses incorrectes,
- -niveau d'agrégation: trop (même rendement électrique quelque soit le charbon, même consommation spécifique par km quelque soit le camion et sa marchandise ou quelque soit l'oléoduc), ou pas assez (données d'une usine non représentative).

- 7- Eviter les erreurs systématiques sur R<sub>i</sub> Rigueur et patience
  - -<u>Utiliser indices</u>  $(J_e, J_{tot}, J_{pci}, m_h^2, m_\perp^2, m_{in}^2)$ , unités complètes + <u>précision si</u> <u>ambigüité</u> ([[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.
  - -<u>Utilisation de relations établies</u> en science (lois de conservation, lois de frottement) 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.

8- Traitement des incertitudes sur R<sub>i</sub>

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.

$$R = \Sigma_{j} R_{j} = \Sigma_{j} r_{j} w_{j} > \text{écart type } \delta R (\delta r_{j}, \delta w_{j}) >$$

$$\delta R^{2} = \Sigma_{j} \delta R_{j}^{2} \text{ et } (\delta R_{j}/R_{j})^{2} = (\delta r_{j}/r_{j})^{2} + (\delta w_{j}/w_{j})^{2}$$

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

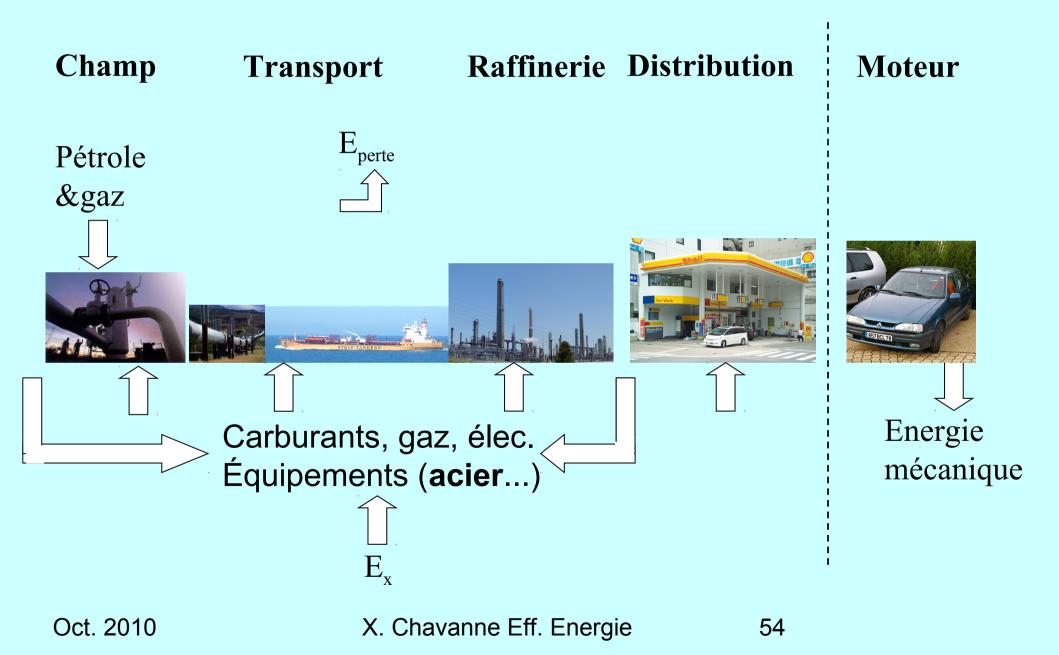
R = R<sub>1</sub> + R<sub>2</sub> avec R<sub>1</sub> = 0,1 R<sub>2</sub>, 
$$\delta R_2$$
 = 0,1 R<sub>2</sub> et  $\delta R_1$  = R<sub>1</sub>  
 $\delta R^2 = \delta R_1^2 + \delta R_2^2 = R_1^2 + 0,01 R_2^2 = (0,01 + 0,01) R_2^2$ 

 $\delta R = 1.4 \, \delta R_2 = 0.13 \, R \Rightarrow R_2 \text{ impose son incertitude}$ 

# L'efficacité énergétique

- Importance ; ce que c'est ; ce que ce n'est pas
  - Energies brute et utile, ressources, utilisation
  - Bilans économique, CO<sub>2</sub>...
- Des données brutes à des indicateurs d'efficacité
  - Flux et taux d'une filière réelle
  - Résolution pratique : décomposition d'une filière
- Application à quelques systèmes
  - Filière pétrolier
  - Filière de la production d'acier

## Filière pétrolière



$$E_x \Longrightarrow \boxed{x} \Longrightarrow$$
 Acier (tubes, coques)

### Aspects fondamentaux et techniques :

Minerai de Fe : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (70% Fe) ou Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Minerai métallique le plus abondant.

```
Thermochimie et cinétique : solide + gaz réducteur chaud > MO_{xs} \rightarrow M_{l} + x/2 O_{2g} et x CO_{g} + x/2 O_{2g} \rightarrow x/2 CO_{2g} Ou > MO_{xs} \rightarrow M_{l} + x/2 O_{2g} et x H_{2g} + x/2 O_{2g} \rightarrow x H_{2}O_{g}
```

- >Production par charbon/coke (CH<sub>0.5</sub>) ou gaz naturel (CH<sub>4</sub>)
- >réduction en Fe à partir de 950°C, la fonte fond vers 1200°C, le laitier vers 1600°C (séparation ; ajout chaux).

Sources: Chimie descriptive, P. Grécias, Lavoisier 1988. Wikipédia.fr.

# $E_x \Rightarrow \boxed{x} \Rightarrow Acier (tubes, coques)$

Thermochimie (approx. d'Ellingham):

>1/2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3 s</sub> + 3/2 (
$$C_s$$
 + ½  $O_{2g}$ )  $\rightarrow$  Fe<sub>1</sub> + 3/2 CO<sub>2 g</sub>  $\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ}$  - T  $\Delta S^{\circ} = -2,94$  - T/10<sup>3</sup> 2,54 GJ/t<sub>Fe</sub> PC( $C_s$ ) = **10,5 GJ/t<sub>Fe</sub>** trop exothermique

>1/2 
$$Fe_2O_{3s} + 3/4$$
 ( $C_s + CO_{2g}$ )  $\rightarrow$   $Fe_1 + 3/2 CO_{2g}$   
 $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ = + 2,34 - T/10^3 2,50 GJ/t_{Fe}$   
 $PC(C_s) =$ **5,3 GJ/t**<sub>Fe</sub> mais T > 940 K et endothermique

>1/2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3 s</sub> + 3/2 
$$H_{2g} \rightarrow$$
 Fe<sub>1</sub> + 3/2  $H_2$ O<sub>g</sub> ( $H_2$  par reformage de  $CH_4$ )  $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ$  - T  $\Delta S^\circ =$  + 1,14 - T/10<sup>3</sup> 1,27 GJ/ $t_{Fe}$  PCS( $H_2$ ) = **7,7 GJ**<sub>pcs</sub>/ $t_{Fe}$  mais T > 900 K et endothermique

>1/2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3 s</sub> + 3/4 
$$CH_{4g} \rightarrow Fe_1$$
 + 3/4  $CO_{2g}$  + 3/2  $H_2O_g$   
 $\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ}$  - T  $\Delta S^{\circ} =$  - 3,14 - T/10<sup>3</sup> 4,36 GJ/t<sub>Fe</sub>  
PCS(CH<sub>4</sub>) = **11,8 GJ**<sub>pcs</sub>/t<sub>Fe</sub> trop exothermique

$$E_x \Longrightarrow \boxed{x} \Longrightarrow$$
 Acier (tubes, coques)

#### Filières alternatives aux hauts fourneaux au coke :

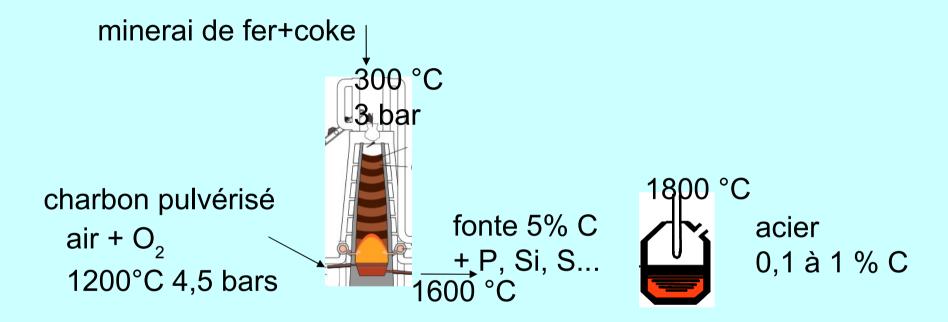
- -Gaz naturel avec des températures plus faibles > un peu plus efficace mais acier avec gangue !
- -Fours à foyer tournant (plutôt recyclage poussières)

### Recyclage ferrailles (30% des aciers):

- Énergie pour chauffer ( $C_p\Delta T$ , Dulong et Petit) + énergie de fusion. Total env. 1 MJ/kg<sub>Fe</sub>
- Utilisation des fours à arc électriques (ferraille = appoint avec autres fours).

## $E_x \Longrightarrow \boxed{x} \Longrightarrow Acier (tubes, coques)$

### Haut Fourneau au coke

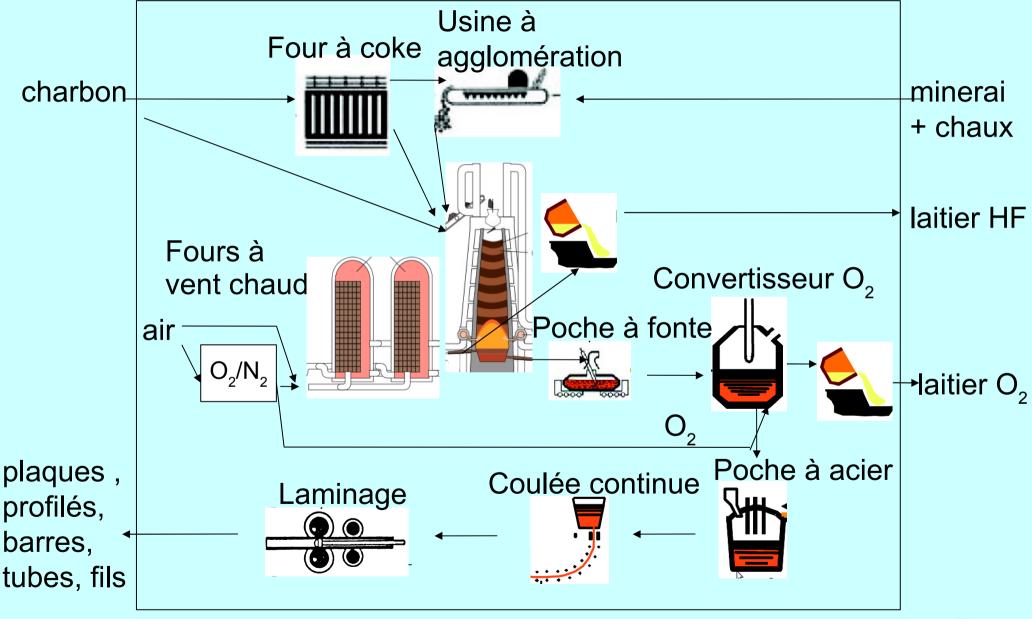


Haut fourneau au coke par coulée (300 à 500 t<sub>fonte</sub>/h)

Convertisseur à oxygène

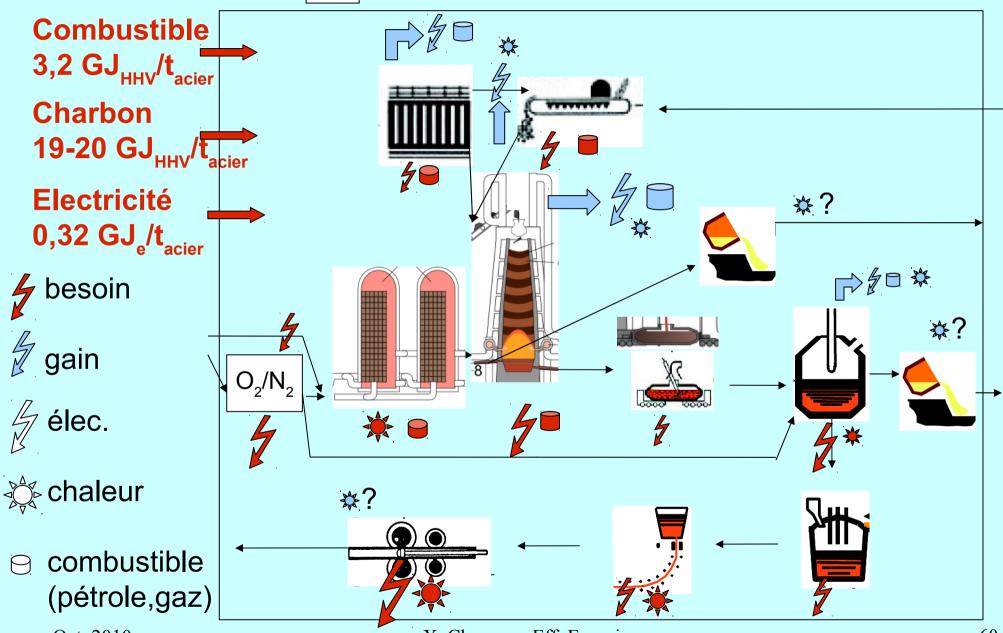
Sources: Wikipédia/Encyclopédia Universalis. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> emission* OECD/IEA, 2007. *Production of iron and steel*, European Commission, draft report Jly09.

# $E_x \Longrightarrow \boxed{x} \Longrightarrow Acier (tubes, coques)$



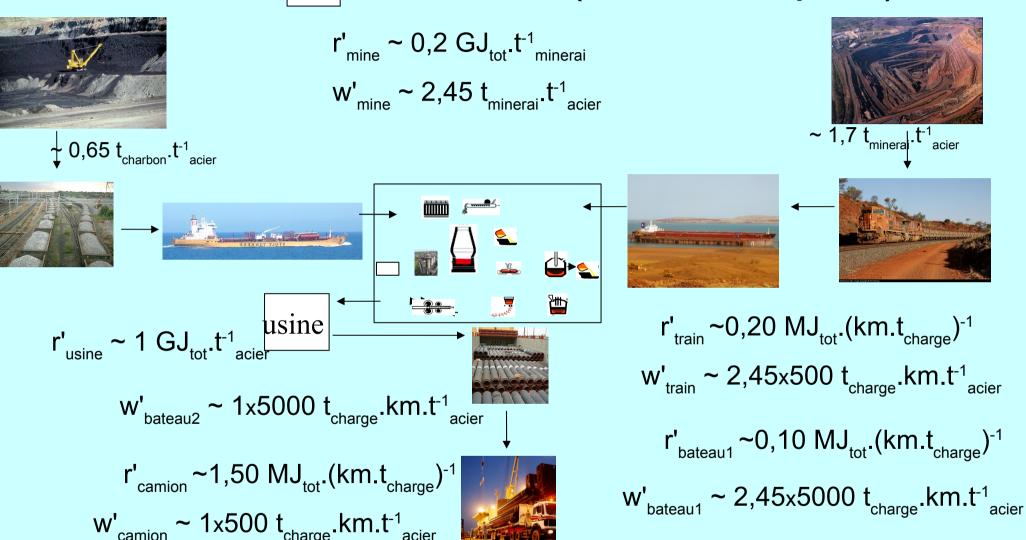
Oct. 2010

## $E_x \Longrightarrow x \Longrightarrow Acier (tubes, coques)$



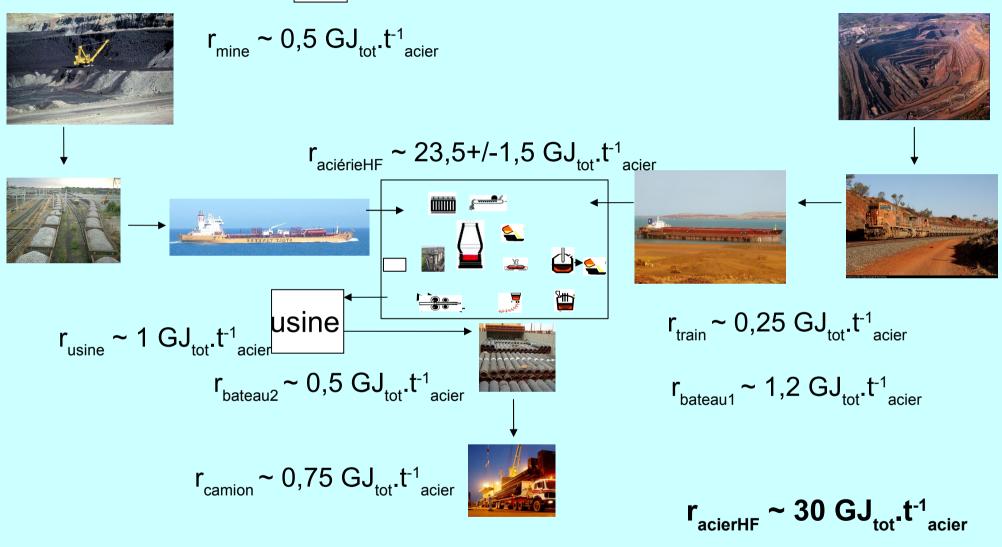
Oct. 2010

# $E_x \Longrightarrow \boxed{x} \Longrightarrow$ Acier (tubes, coques)



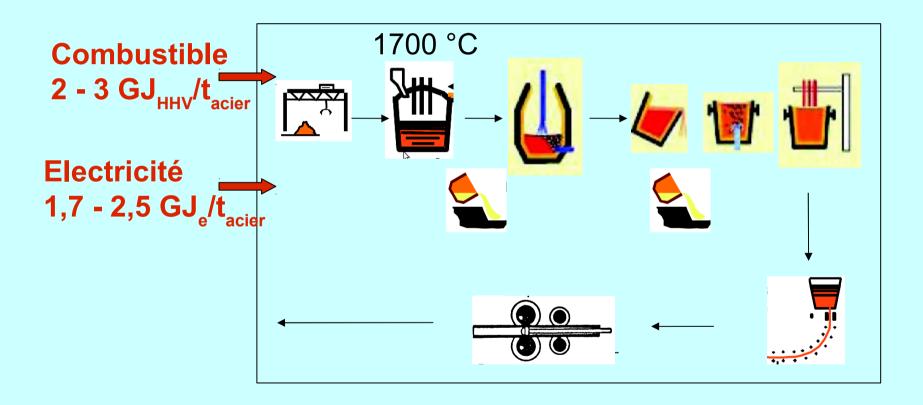
Source: Chavanne X, Frangi JP. Comparison of the energy efficiency to produce agroethanol between various industries and processes: the transport. Submitted to Biomass&Bioenergy 2010.

# $E_x \Rightarrow x \Rightarrow Acier$ (tubes, coques)



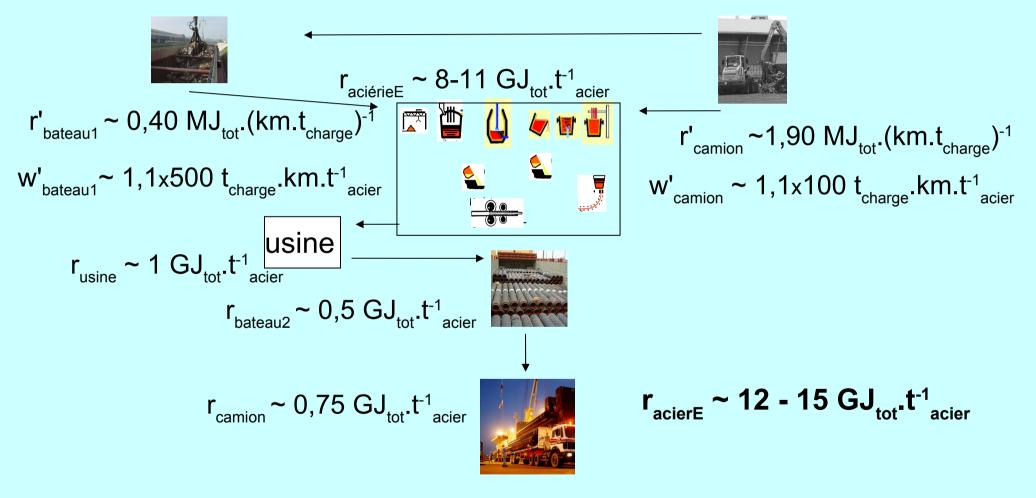
# $E_x \Rightarrow x \Rightarrow Acier$ (tubes, coques)

### Four électrique (recyclage de ferrailles)



# $E_x \Rightarrow x \Rightarrow$ Acier (tubes, coques)

## Four électriques (ferrailles)



Source: ADEME &VNF transport fluvial jan. 2006.

## Filière pétrolière : champ



Bassin de Doba au Tchad d'après plan de 1999 : 300 puits + installations pour 28 ans (Esso Tchad 1999)

#### En Investissement:

**-Forage (r<sub>j</sub>)**: 1500 m env. en 6 jours/puits avec derrick 300 kW<sub>e</sub> (O&GJ 2006) d'où 155 (GJ<sub>e</sub>/puits) $_{\times}3(J_{pcs}/J_{e})_{\times}300$ (puits)= **0,15 PJ<sub>pcs</sub>/champ** 

-Tubage (r<sub>j</sub>) :50 t d'acier par puits  $\times$  30 GJ<sub>pcs</sub>/t $\times$  300(puits) = 0,45 PJ<sub>pcs</sub>/champ

**-Production**  $(\mathbf{w}_{j})$  : sur 28 ans : **5400**  $\mathbf{PJ}_{pcs}$ /champ (883  $\mathbf{Mb}_{\times}6,12$   $\mathbf{GJ}_{pcs}$ /b)

Même si erreur d'un facteur 10, investissement négligeable.

En exploitation : capacité 105 MW<sub>e</sub> ↔ 225 kb/jour

Flux :  $105 \text{ MJ}_{e^{\times}} 3(J_{pcs}/J_{e}) \leftrightarrow 16 \text{ GJ}_{pcs}$ 

Taux : R<sub>champ</sub> 2,0 +/- 0,2 % du PCS(brut) d'après plan 1999

## Filière pétrolière : champ



#### Bilans des flux de la compagnie Total en 2005

Déclaration environnementale : consommation en E&P 130 PJ<sub>pcs</sub> (gaz)

Rapport d'activité : production en E&P 5590 PJ<sub>pcs</sub>(brut+gaz ; 2,50 Mbep/j)

Taux d'exploitation R<sub>champ</sub> 2,3 % du PCS(brut+gaz)

N.B.: Consommation pour gaz plus élevée (compression). Mais gaz 30% de la production de Total en 2005.

Autre compagnie BHP Billiton : taux semblable.

## Filière pétrolière : champ



#### Epilogue à Doba en 2009

Plus de 600 puits forés, intervention sur puits anciens pour débouchage, production en déclin à 120 kb/d, réserve initiale moins de 750 Mb, venue d'eau à 84%! Sauvé par le prix du pétrole!

#### Pompage de fluides :

```
\begin{split} r_{\text{e-extr}} &= (2 \text{ à } 5)_{\times} m_{\text{tot}} \times g_{\times} h \quad \text{(O\&GJ 12 déc. 2005 )} \\ r_{\text{x-extr}} &= 0,02 \text{ à } 0,05 \text{ MJ}_{\text{e}} / (kg_{\text{tot}}.km_{\text{h}})_{\times} 3 (J_{\text{pcs}} / J_{\text{e}}), \\ w_{\text{extr}} (84\%,1500\text{m}) &= 0,21 \text{ kg}_{\text{tot}}.km_{\text{h}} / \text{MJ}_{\text{pcs}} => R_{\text{extr}} \sim 2,2 \text{ % du PCS(brut)} \end{split}
```

N.B. En Californie :  $R_{e-extr}$  (92%, 2000 m) ~ 3,8 % en élec. du PCS(brut)  $R_{extr}$  plus de 10 % si brut -> élec.

## Filière pétrolière : transport



Transport par oléoduc de capacité 225 (kb/j)<sub>cap</sub> sur 1 100 km (Bassin de Doba - port du Cameroun). 3 stations de re-compression.

Investissement : R<sub>olducl</sub>= 0,07 +/- 0,02 % du PCS(brut)

Structure : D = 76 cm ép. 11 mm > env. 225 kt<sub>a</sub> d'acier<sub>x</sub> 13 GJ<sub>pcs</sub>/t<sub>a</sub>  $r_{olducl}$ ~ 3 PJ<sub>pcs</sub>/oléoduc (acier de recyclage)

Transport du brut du bassin 750  $Mb_{brut} > w_{olducl}^{-1} = 4600 PJ_{pcs}/oléoduc$ 

Exploitation: R<sub>olducE</sub> de 0,25 à 0,90 % du PCS(brut)

Dissipation  $r_{\text{olducE}} = \lambda v^2/(2D) \text{ MJ}_{\text{meca}}/(t_{\text{brut}}.\text{km})_{\times} 4(J_{\text{pcs}}/J_{\text{meca}})$  v vitesse du brut de 0,51 (120 kb/j) à 0,95 (225 kb/j) m.s<sup>-1</sup>,  $\lambda(\text{Re}) = \text{env. } 0,15. \ r_{\text{olducE}} \text{ de } 0,11 \text{ à } 0,40 \ \text{GJ}_{\text{pcs}}/(t_{\text{brut}}.\text{km})$  $v_{\text{olducE}} = 1/45_{\times} 1100 \ t_{\text{brut}}.\text{km/GJ}_{\text{pcs}}$ 

Source : Chavanne X, Frangi JP. Supra.

## Filière pétrolière : transport



Transport par bateau citerne de capacité 100 kt<sub>cap</sub> (750 kb<sub>cap</sub>) sur 5000 km (Cameroun-France)

Investissement : R<sub>tankerl</sub> = 0,035 +/- 0,015 % du PCS(brut)

Structure env. 15 kt<sub>a</sub> d'acier (pour 100 kt de capa,) x 13 GJ<sub>pcs</sub>/t<sub>a</sub>

 $r_{tankerl} \sim 2 GJ_{pcs}/t_{cap}$ 

Durée de vie : env. 25 ans. En 2005 : 1,86 Gt<sub>brut</sub> de brut transporté

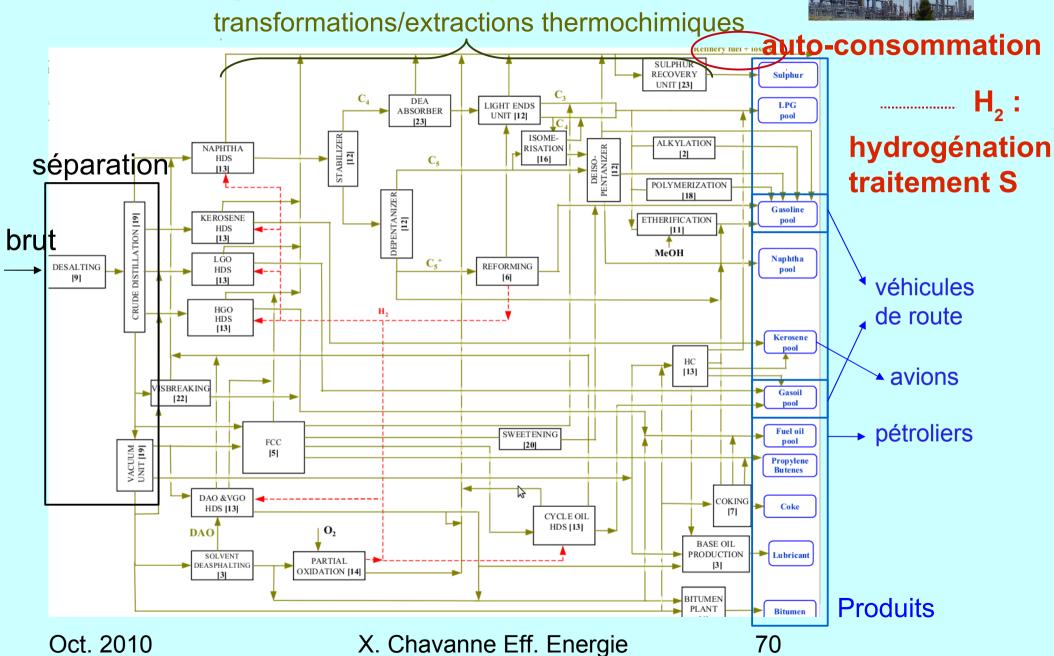
par bateau ; 350 Mt<sub>cap</sub> de tankers (UN Conf. On Trade & Develop. 2006 ) =>

 $W_{tankerl}^{-1} \sim 25 \times 5.3 \times 45 (GJ_{pcs}/t_{brut}) GJ_{pcs}/t_{cap}$ 

Exploitation : R<sub>tankerE</sub> = 1,1 +/- 0,1 % du PCS(brut)

Pour 100 kt<sub>cap</sub>  $r_{tankerE}$  = 100 kJ<sub>pcs</sub>/( $t_{brut}$ .km) (fioul lourd; trajet retour avec ballast inclus).  $w_{tankerE}$  = 1/45×5000  $t_{brut}$ .km/GJ<sub>pcs</sub>

Source: Chavanne X, Frangi JP. Supra.







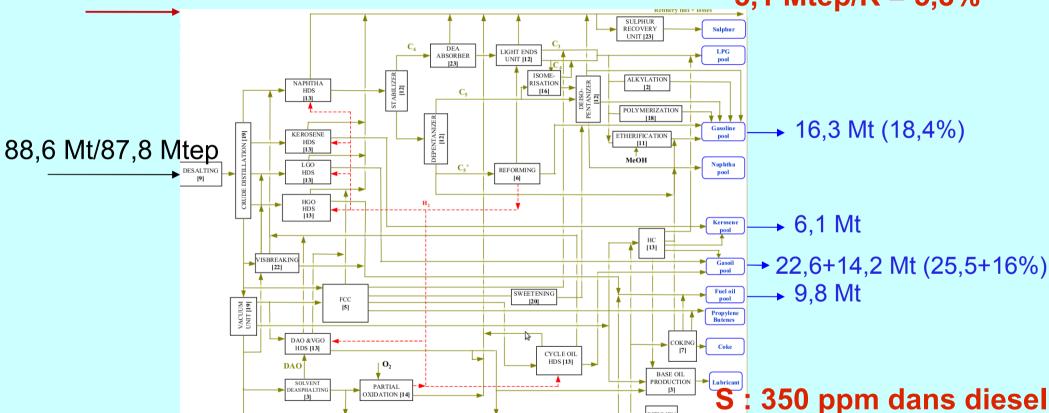
 $0.1 \text{ Mtep/R}_{\circ} = 0.1\%$ 

France 2001

auto-consommation: 5,1 Mtep/R = 5,8%

Pas assez de diesel

Trop de fioul lourd



 $R_{raffinerieE} = 6.0 + - 0.1 \% du PCS(brut)$ 

Source : Industrie pétrolière et gazière en 2002. DGEC-DGE.

Oct. 2010

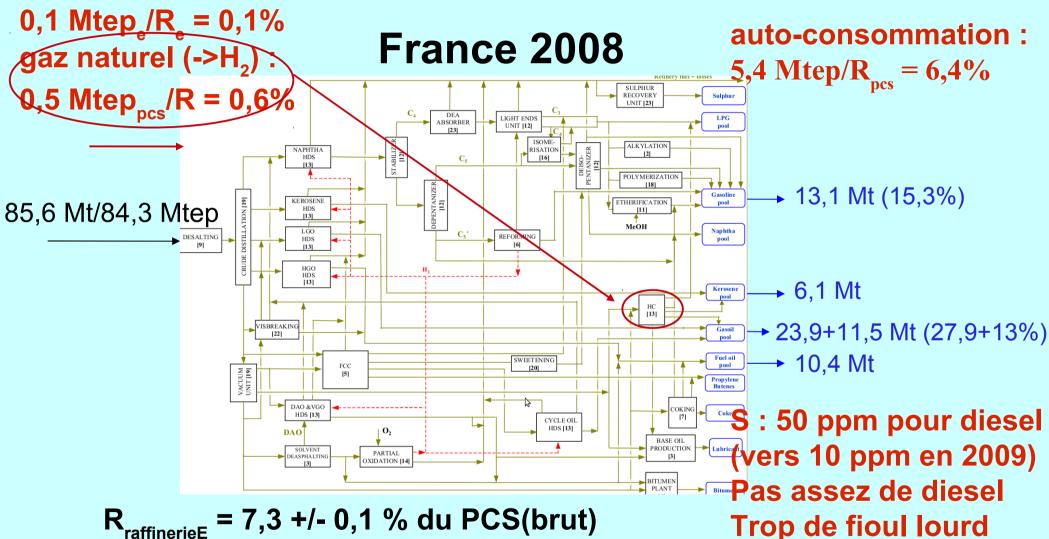
X. Chavanne Eff. Energie

71

BITUMEN



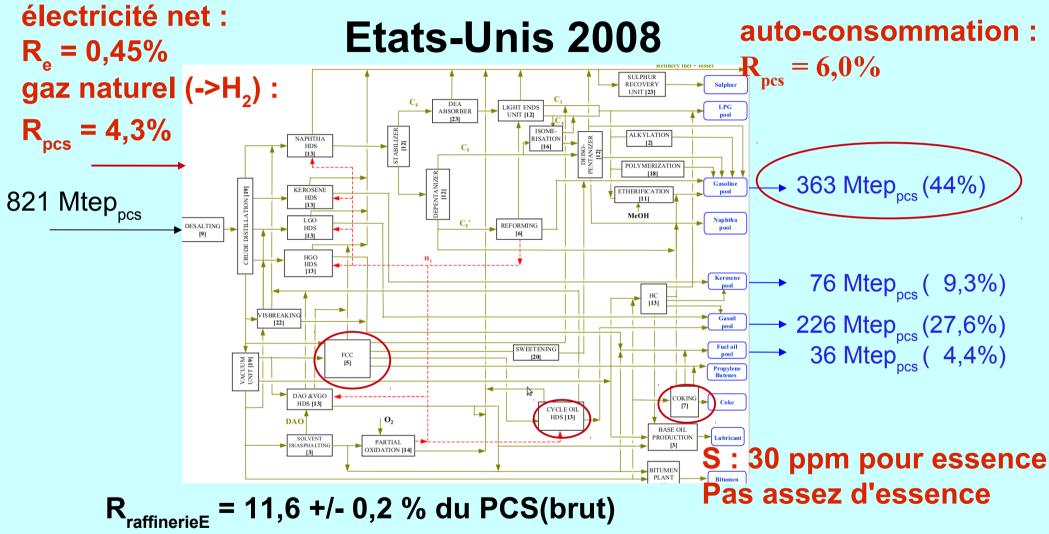




Source : Industrie pétrolière et gazière en 2008. DGEC-DGE.

Oct. 2010





Source : EIA-US Department Of Energy. 2009.

Oct. 2010 X. Chavanne Eff. Energie

## Filière pétrolière

Raffinerie Distribution Champ Moteur **Transport** Pétrole &gaz R R<sub>transport</sub> moteur  $\mathsf{R}_{\mathsf{champ}}$ 75 - 80% 0,75+/- 0,1% 7,1+/-0,1% 0,5 + 1,1% 2,3+/-0,2% (Fr. 2008) 1000+5000km (Total)

## Filière pétrolière

Raffinerie Distribution Champ **Transport** Moteur Pétrole &gaz R R<sub>transport</sub> r moteur 75 - 80% 0,75+/- 0,1% 12% 0,5% 10% (EUd'A 2008) 1000 km (Californie)