# L’analyse énergétique

Par X. Chavanne  Physicien/Ing. Recherche
Univ. D. Diderot & IPGP

Source : Aspofrance.org > documents > X. Chavanne

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007

# Penser énergie !

M. K. Hubbert (in response to remarks by David Nissen – Exxon 1980): "... [T]here is a different and more fundamental cost that is independent of the monetary price. That is the energy cost of exploration and production. So long as oil is used as a source of energy, **when the energy cost of recovering a barrel of oil becomes greater than the energy content of the oil, production will cease no matter what the monetary price may be.**"

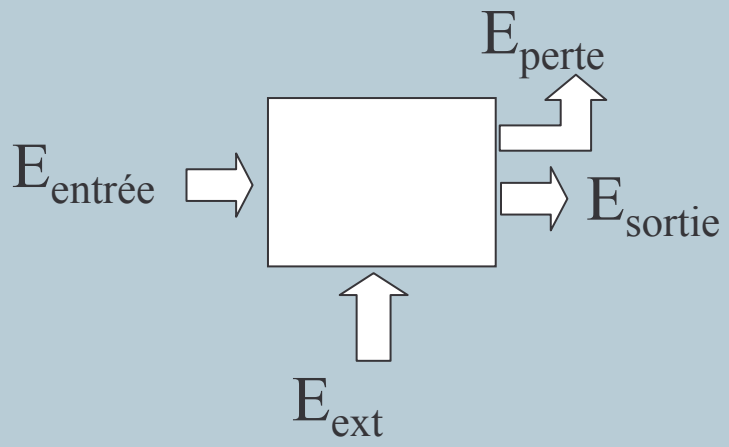
**Il ne sera pas dissipé plus d'énergie qu'il n'en sera extraite !**

Contrainte de la nature exprimée par **les lois de la thermodynamique**

# L'analyse énergétique

- **Aspects généraux**
  - Filières énergétiques
  - Taux de dépenses
  - Limites ; disponibilité des ressources
- **Application à l'éthanol ex maïs**
  - Etat des lieux
  - Taux de dépenses
  - Disponibilités de quelques ressources

# Filières énergétiques




$E_{entrée}$ et $E_{ext}$ : énergie primaire (pétrole, gaz naturel, charbon, biomasse, nucléaire, hydroélectricité…)

$E_{sortie}$ : énergie finale (électricité, combustibles… ou énergie mécanique des roues, chaleur, lumière…)

$E_{perte}$ : énergie non récupérée (chaleur basse température, énergie des déchets…)

# Filières énergétiques

$E_{perte}$

Pétrole

Combustibles, base pétrochimie…

Matériels, carburants, gaz…

$E_{ext}$

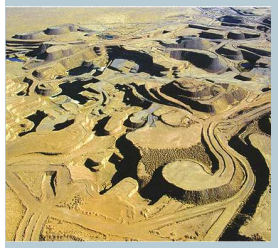
chaleur…

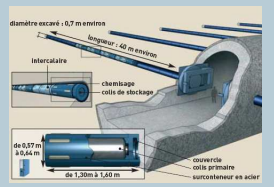
Energie mécanique

# Filières énergétiques

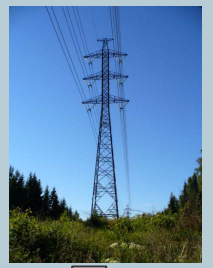
$E_{perte}$

$E_{entrée}$ Chaleur du réacteur






Électricité
Chaleur ?



Matériels, combustibles, électricité…

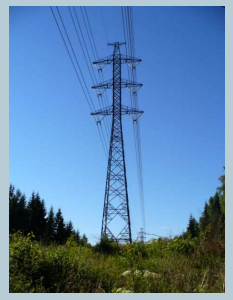
$E_{ext}$

Energie mécanique, lumière, chaleur…

# Filières énergétiques

$E_{perte}$

$E_{entrée}$ électricité



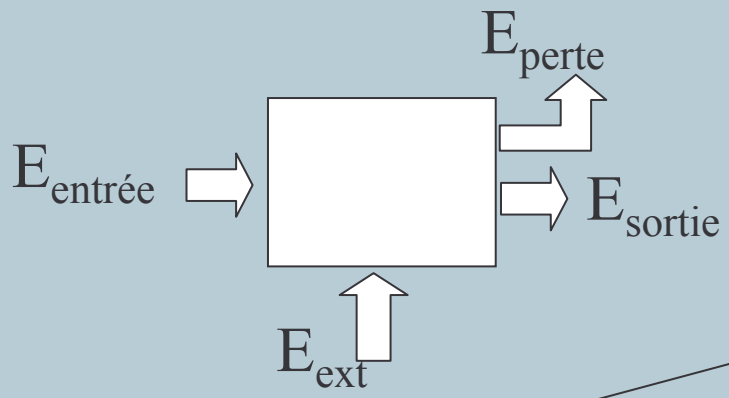
Coût stockage électricité ?

Energie mécanique, lumière, chaleur…

Matériels, combustibles, électricité…

$E_{ext}$

# Taux de dépenses énergétiques




(2e principe)

$$E_{entrée} + E_{ext} = E_{sortie} + \cancel{E_{perte}}$$ (1er principe)

Taux de dépenses $\mathcal{D}$ : $\dfrac{E_{perte}}{E_{entrée}} > 0$

# Taux de dépenses énergétiques

$$E_{perte} = E_{entrée} + E_{ext} - E_{sortie} \text{ (1er principe)}$$

$$\mathfrak{D} = 1 + \frac{E_{ext} - E_{sortie}}{E_{entrée}}$$

Si $\mathfrak{D} > 1$ => $E_{ext} > E_{sortie}$ Est-ce rentable ?

Si $E_{ext} = 0$ (≈ pétrole, gaz ; total des énergies primaires)

=> $\mathfrak{D} < 1$ (ou sinon $E_{sortie} < 0$ !)

$\mathfrak{D} = 1$ un seuil de rentabilité

Facteur de rentabilité : $\mathfrak{R} = 1 - \mathfrak{D} > 0$ pour une filière rentable

# Taux de dépenses énergétiques

$$\mathfrak{D} = \frac{E_{ext} + E_{entrée} - E_{sortie}}{E_{entrée}}$$

$$\mathfrak{D} = \mathfrak{D}_{ext} + \mathfrak{D}_{propre}$$

Matériels, électricité, combustibles nécessaires aux procédés…

Perte chaleur du rendement thermodynamique, perte dans réseau, perte matière…

# Taux de dépenses énergétiques

$$\mathfrak{D} : \quad \frac{D}{G} = \frac{\Sigma D(\text{étapes})}{G} = \Sigma \frac{D(\text{étapes})}{G(\text{étapes})}$$

D, G : pouvoirs calorifiques des énergies primaires dépensées ou gagnées

$$= \Sigma \Sigma \frac{D(\text{dépenses, étapes})}{G(\text{dépenses, étapes})} = \Sigma \Sigma \mathfrak{D}(\text{dépenses, étapes})$$

$\mathfrak{D}$ modulaire : > séparation des difficultés pour estimer $\mathfrak{D}$

> poids relatif des différentes dépenses

> ajouts, retraits, échanges

# Taux de dépenses énergétiques

**Dépenses d'exploitation :**

$$D = \alpha G \Rightarrow \mathfrak{D}$$

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

**Dépenses d'investissement :**

D et G disjoints

Équipements (éoliennes, centrales, panneaux, véhicules… ), maintenance.

D : coût pour fabriquer et installer

G : quantité d'énergie traitée pendant durée de vie

# Taux de dépenses énergétiques

## Les difficultés : collecter et analyser

-> données de base ou mesurées *in situ* (matériaux,électricité, combustibles, … chaleurs spécifiques). Pas d'ambiguïtés !

-> estimer les incertitudes.

-> déterminer les paramètres agissant sur $\mathcal{D}$. Analyse des données + notions de physique.

-> réduire ou expliciter les hypothèses arbitraires (où la filière s'arrête ?, « mix » électricité…).

# Les limites

Contraintes autres que thermodynamiques

-> progrès techniques
-> environnement
-> politiques/société
-> relations internationales
-> besoins humains
...

} Si action sur D ou G

# Les limites

## Temps de développement d'une filière

Niveau d'un prototype industriel (surrégénérateur, pas ITER !)

- Études pour un développement important.
- Appui politique, financier, sociétal…
- Réunir matériel nécessaire. Développement de filières annexes.
- Formation du personnel.
- Temps de construction.

…

# Les limites

## Disponibilité des ressources de la filière

**Taux de dépenses faible**

**mais gisement en voie d'épuisement !**

Ressources matérielles : Fe, Cu, Al… matières minérales et organiques, eau, terres… limitation énergétique

Ressources énergétiques :

énergie en quantité finie : déclin de production à court (pétrole), moyen (gaz), long (charbon, U et Th classique), très long terme (surrégénérateur).

énergie à flux permanent : palier de production

# Les limites

## Disponibilité des ressources de la filière

**La disponibilité d'une ressource va dépendre du taux de dépenses**

$$E_{sortie} = \Re\, E_{entrée} (+\ E_{ext})$$

Sociétés, homme intéressés par $E_{sortie}$

Gisements avec $\mathfrak{D}$ = 10% ($\Re$ = 90%) :

$$E_{sortie} = 0{,}9\, E_{entrée}(10\%)$$

Gisements avec $\mathfrak{D}$ = 70% ($\Re$ = 30%) :

$$E_{sortie} = 0{,}3\, E_{entrée}(70\%) \Rightarrow \mathbf{E_{entrée}(70\%) = 3\, E_{entrée}(10\%)}$$

# La Production d'éthanol ex maïs aux Etats-Unis d'Amérique

k : milliers/kilo  M : million/Mega  G : milliard/Giga

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

# Les agrocarburants en 2005

- **Ethanol** (0,51 tep/$m^3$) :

  P(2005) = **20** M.tep
  Brésil : 8,2 Mtep *(conso. essence : 15 Mtep, 185 Mhab)*
  EUd'A : 7,7 Mtep *(conso. essence : 400 Mtep, 300 Mhab)*

- **Esters d'huile végétale** (0,90 tep/t) :

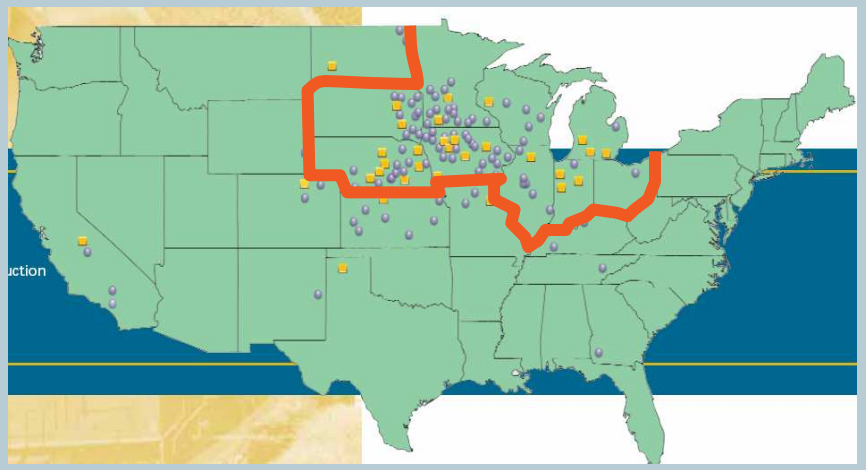
  P(2005) = **3,1** Mtep
  Allemagne : 1,5 Mtep
  France : 0,45 Mtep *(conso. diesel : 31 Mtep)*

**Agrocarburant** : **23** Mtep

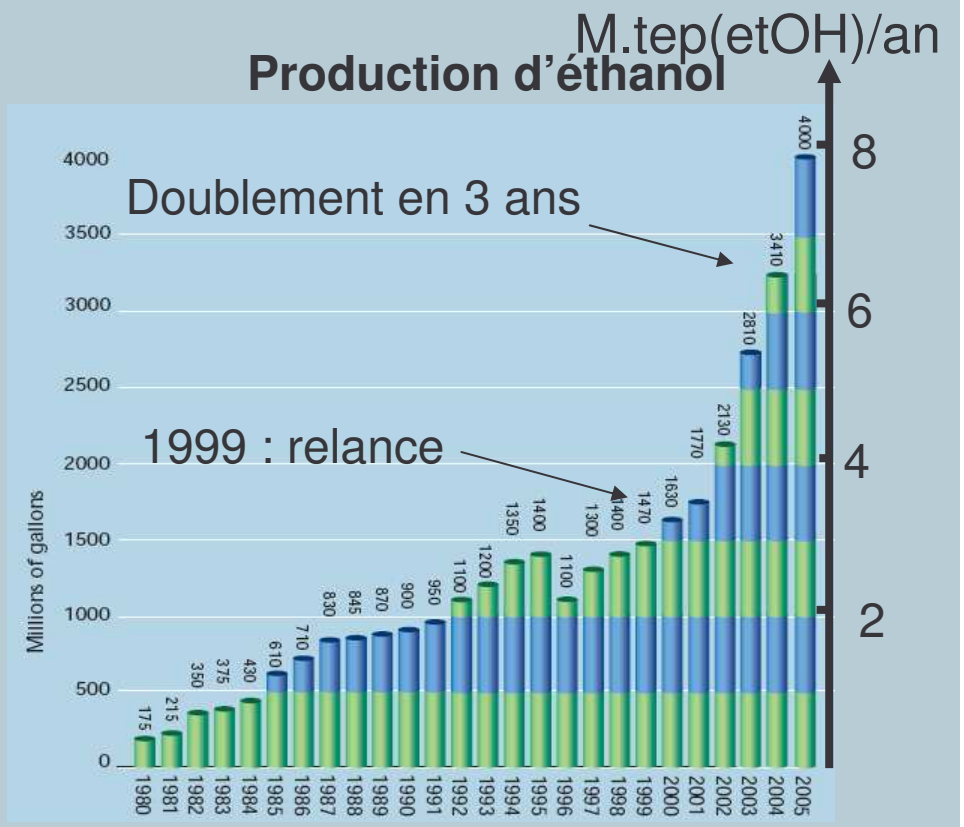
*(conso. pétrole : 3850 Mtep dont 55 % carburants)*

Sources : UNCTAD 2006, European Biodiesel Board et British Petroleum 2006.

# L'industrie de l'éthanol aux EUd'A



Source : Renewable Fuels Association 2006



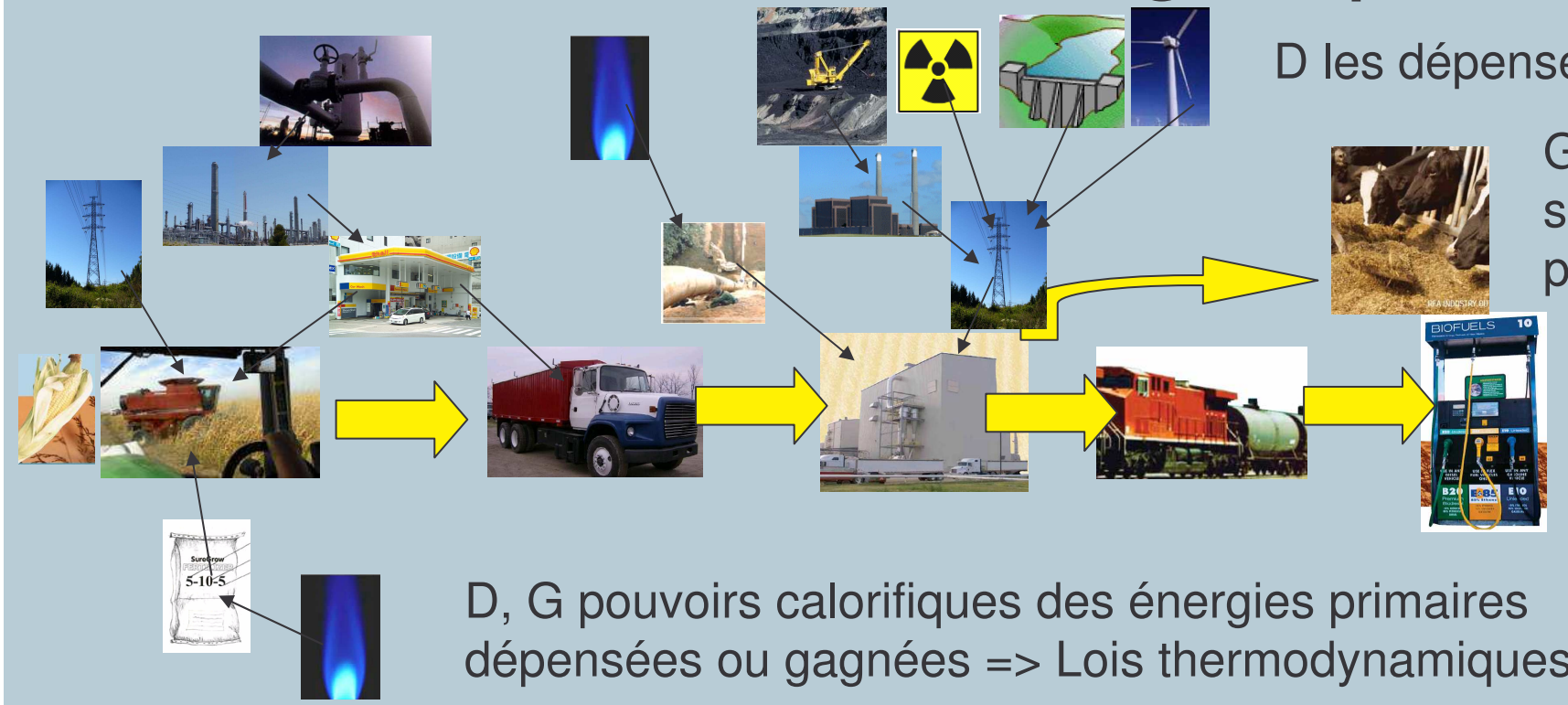

G. W. Bush (2007) : 70 Mtep de biocarburants en 2017.

Bilan financier

**Prime fédérale de + 265 $/tep(etOH)** / coût GN en 1999 : - 90 $/tep(GN)

coût essence en 1999 : 345 $/tep(essence)

# Le rendement énergétique




D les dépenses

Gsp sous produit

G le gain

D, G pouvoirs calorifiques des énergies primaires dépensées ou gagnées => Lois thermodynamiques =>

Taux de dépenses $\mathfrak{D}$ : $\frac{D}{G} = \frac{\Sigma D(\text{étapes})}{G} = \frac{\Sigma\, \Sigma D(\text{énergies, étapes})}{G}$

$\mathfrak{D} < 100\ \%$

Sous produits : G -> G+ Gsp

# La controverse

| Publications : | $\mathcal{D}$ |
|---|---|
| Pimentel (Uni. Cornell) 1991 | 120 % |
| Shapouri et al. (USDA/USDOE) 1995 | 83 % |
| Pimentel (Uni. Cornell) 2001 | 134 % |
| Shapouri et al. (USDA/USDOE) 2002 | 78 % |
| Graboski (USDA/USDOE) 2002 | 81 % |
| Pimentel (Uni. Cornell) 2003 | 129 % |
| Shapouri et al. (USDA/USDOE) 2004 | 69 % |
| Patzek (Uni. Berkeley) 2004 | 120 % |
| Pimentel&Patzek (Uni. Cornell) 2005 | 129 % |
| Farrell et al. (Uni. Berkeley) 2006 | 78 % |

**Mêmes définitions ? Oublis ? Surestimations ? Incertitudes ?**

# Les données de base

**Ferme** : volume de combustibles, masse d'engrais, électricité… (gallon/acre/an…), rendement agricole (boisseau/acre/an).

**Transport** : distance, consommation, charge utile

**Usine**: consommation (kBtu et kWh/gallon d'éthanol..)

**Origine** : les articles, enquêtes du ministère de l'agriculture (USDA), données du ministère de l'énergie (USDOE), sites fabricants agricoles…

**Le moindre détail peut compter** :

taux d'humidité du boisseau de maïs : 15% ou 20 % ?
éthanol anhydre, hydraté ou dénaturé ?
tons : short ? métrique ? long ?

**Incertitude inévitable** (mesures, échantillonnage…) > 2-3 %

# Dépenses à la ferme

**En % du pouvoir calorifique de l'éthanol produit**

**Étude de 2001** : la plus récente, climat et récolte types

**Combustible** : carburants, séchage

**6,5 +/- 0,5 %**

(1996 année humide : 12 +/- 1 %)

avec pompage pour irrigation : 35 +/- 4 %  (Nébraska 2001)

**Engrais, herbicides…** : **16 +/- 1 %**

Etat de l'Ohio : 22 +/- 1 %

Etat du Minnesota : 12,5 +/- 1 %

**Équipement agricole** : 0,35 % +/- 0,3

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007

# Dépenses à l'usine

En % du pouvoir calorifique de l'éthanol produit

**Situation fin 2005 :** plus de 80 % de la capacité -> procédé de production dit à sec alimenté par gaz et électricité sans cogénération

**Procédé** : liquéfaction et hydrolyse de l'amidon par enzymes
fermentation des sucres par levures

**Coût énergétique** : **70 % +/- 2 % !**
distillation, séchage ; inhérent au procédé avec micro-organismes

**Sous-produits** : aliments pour élevage (bétail…)
économie de l'énergie utilisée pour les aliments remplacés : Gsp

$$\text{Facteur d'économie} \quad \frac{G}{G + Gsp} = 0{,}89 \text{ +/- } 0{,}015$$

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007

# Les coûts de transport

En % du pouvoir calorifique de l'éthanol produit

**Grain de maïs de la ferme à l'usine** (100 km) :
**2,3 +/- 0,2 %**

**Ethanol de l'usine à la station** :
(camion + train + camion)
**2,1 +/- 0,2 %**

Distance plus grande (130 + 1000 + 40 km)
Mais plus économique et réduction de masse par 3

# Le bilan total

| | ℘ **sans les sous-produits** | **avec les sous-produits** |
|---|---|---|
| **En 2005 (ferme 2001)** : | **97 +/- 2 %** | **86 +/- 2 %** |
| Etat de l'Ohio : | 103 +/- 2 % | 92 +/- 2 % |
| Etat du Minnesota : | 93,5 +/- 2 % | 83 +/- 2 % |
| irrigation (pompes) : | 126 +/- 5 % | 112 +/- 4,5 % |

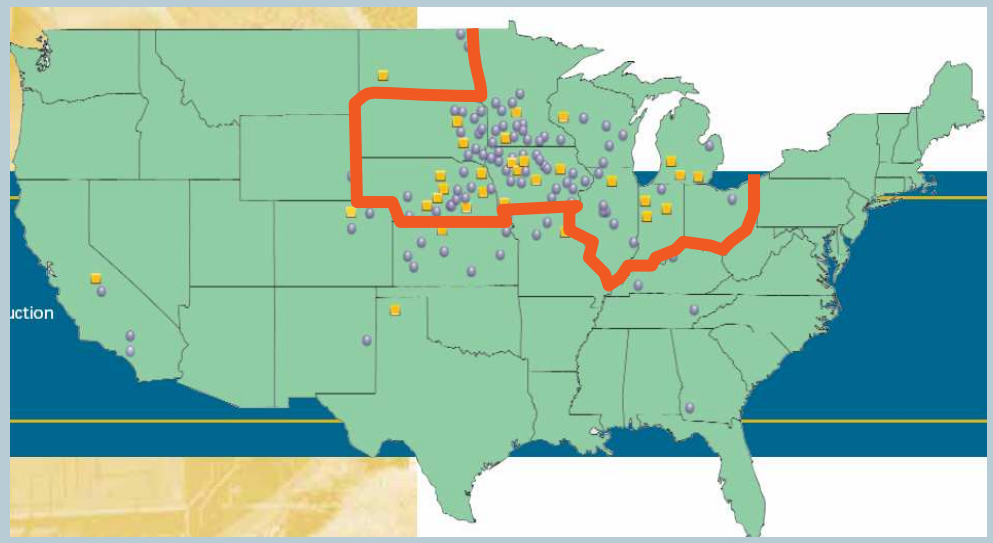
℘ **essence** (d'après USDA) : **22 +/- 2 %**

« **Mix énergétique** » des dépenses (2005) : 11 % (pétrole) + 60 % (gaz) + 24 % (charbon) + 5 % (nucléaire, hydro…)

-> Bilan carbone, taux d'émission $CO_2$…

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007

# Disponibilités agricoles

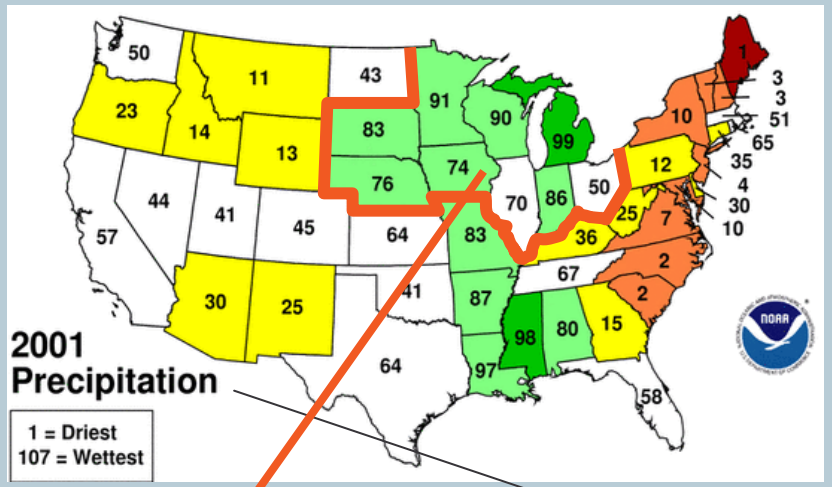


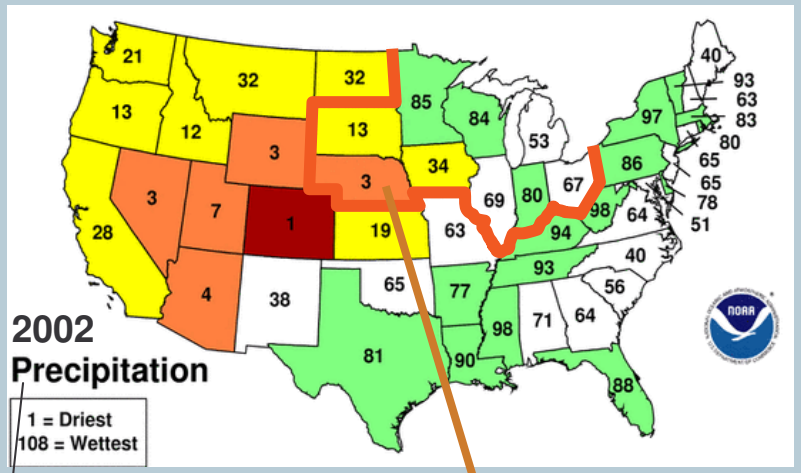
Source : Renewable Fuels Association 2006

**fin 2005** : 95 usines, **8,4 M.tep** de capacité. 29 en construction
**fin 2006** : 116 usines, **10,5 M.tep** de capacité. 79 en construction
Capacité pour **fin 2008** (+2 ans) : **23 M.tep -> 21 M.tep**

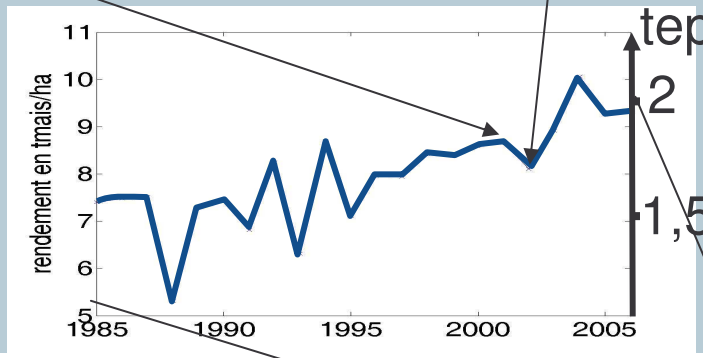
G. W. Bush (2007) : 70 M.tep de biocarburants en 2017.

# Disponibilités agricoles




9 principaux Etats producteurs
(+ 90% de l'éthanol)
Région propice

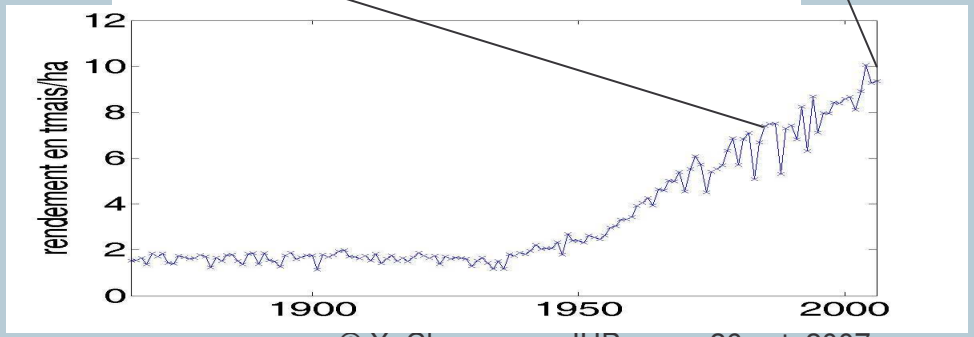



$tep_{etOH}$/ha/an

2

1,5

Etat du Nébraska :
Moitié des surfaces irriguées



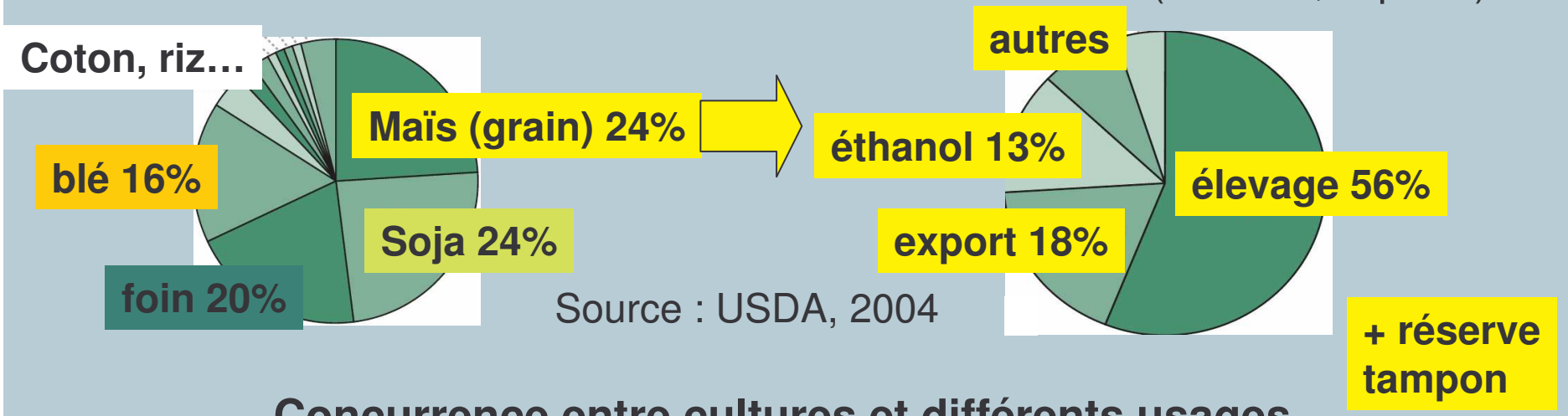

Source :
US department of agriculture

+0,12 $t_{maïs}$/ha par an
Plus d'engrais
Sélectivité plante

# Disponibilités agricoles

| Production éthanol | récolte | surface (ha) |
|---|---|---|
| **2001 : 3,4 M.tep** | **17 M.t$_{maïs}$**/244 M.t$_{maïs}$ | **2 M.ha**/30 M.ha |
| **2005 : 7,7 M.tep** | **36,5 M.t$_{maïs}$**/282 M.t$_{maïs}$ | **3,9 M.ha**/28,5 M.ha |
| **2008 : 21 M.tep** | **100 M.t$_{maïs}$**/? M.t$_{maïs}$ | **10,5 M.ha**/? M.ha |
| **2017 : 70 M.tep** | **330 M.t$_{maïs}$**/? M.t$_{maïs}$ | **31 M.ha**/? M.ha |

Surfaces arables : 185 M.ha dont 60 M.ha non utilisés (rotation, repos..)




Source : USDA, 2004

**Concurrence entre cultures et différents usages**

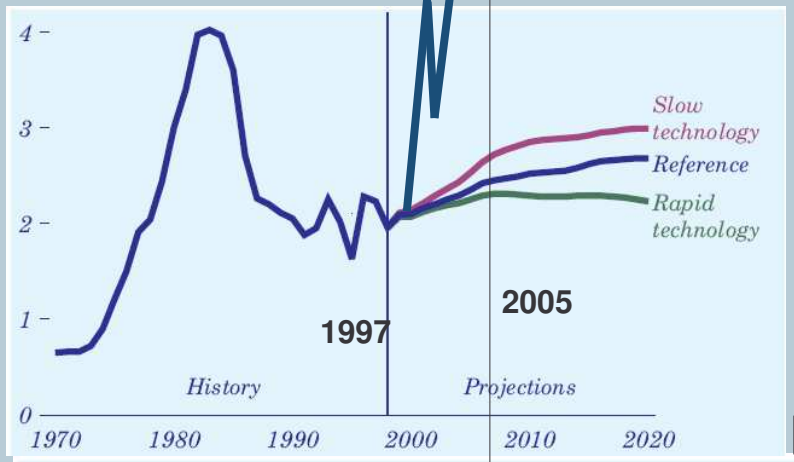
**Fin 2006 : réserve au plus bas et hausse du prix de 60 % en 1 an**

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007

# Approvisionnement en gaz

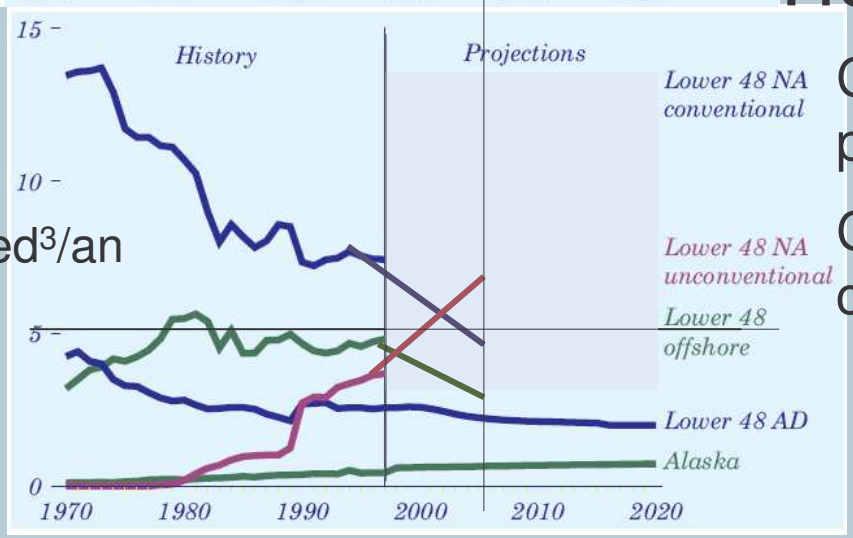
$/GJ(GN)

**Prix du gaz naturel**




Hausse imprévue
de 90 $/tep à 350 $/tep

**Production de gaz naturel aux EUd'A**




T.pied$^3$/an

Chute imprévue (par USDOE) de la production « conventionnelle »

Compensation par la production « non conventionnelle » ; jusqu'à quand ?

**Depuis 2001 production de gaz de l'Amérique du Nord en déclin**

Sources : Annual review outlook 1999 et 2006. USDOE. British Petroleum 2006

# Conclusion sur l'éthanol ex maïs aux EUd'A

- **Taux de dépenses** du champ à la station essence :
  De 83 % à 112 %
  Essence : 22 %
  $\Rightarrow$ Rendement mauvais
- **Disponibilité agricole** : concurrence avec autres cultures et autres usages
- **Approvisionnement en gaz** : non assuré (autre solution)
- Non discutés (complexes et peu de données) :
  - déplétion aquifère (quelques informations)
  - Pertes humus et nutriments des sols ?
  - Pollution ?

# De la source à la roue

**Source** | **Filière(procédés)** | **Roue**

**Biomasse** :
tep de matière sèche
Ex : canne à sucre (13 tep/ha/an)
Maïs (4 tep/ha/an)

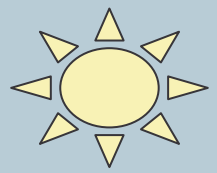
**Procédés** :
Méthaniseur
~~Thermolyse~~
Gazéïfication
Fermentation
…

**Intermédiaire** :
Gaz
Electricité
Carburant

**véhicule** :
Électrique
Thermique

**Disponibilité**

**Taux de dépenses énergétiques**



Niveau sol
1500 tep/ha/an

Tour solaire

**Intermédiaire** :
Electricité

**véhicule** :
Électrique

© X. Chavanne – IUP env. - 26 oct. 2007