

Sortir du pétrole ? Des solutions qui posent problème

Bilans énergétiques Cas de l'éthanol de maïs aux Etats Unis d'Amérique

Par X. Chavanne Physicien/Ing. Recherche

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

L'analyse énergétique

- **Aspects généraux**

- Taux de dépenses énergétiques
- Disponibilité des ressources

article : X. Chavanne et J. P. Frangi, comptes rendus Ac. des Sciences, Paris, vol. 339 (2007)

- **Application à l'éthanol ex maïs**

- Etat des lieux
- Taux de dépenses énergétiques
- Disponibilités des surfaces

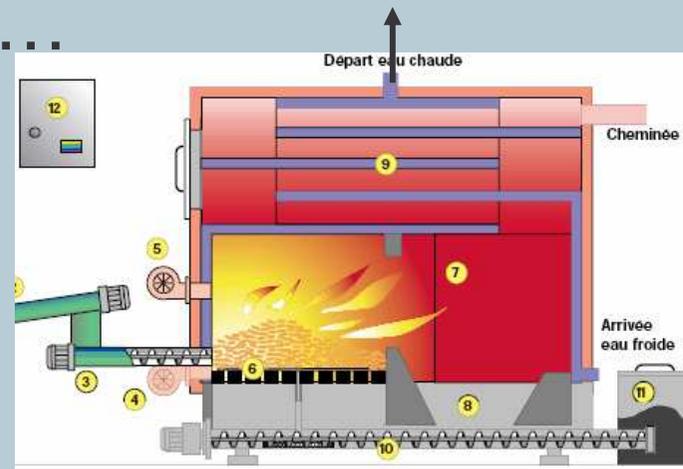
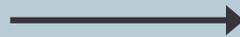
article : X. Chavanne et J. P. Frangi, comptes rendus Ac. des Sciences, Paris (à paraître 2008)

- **Pour aller plus loin**

Une filière énergétique : bois énergie



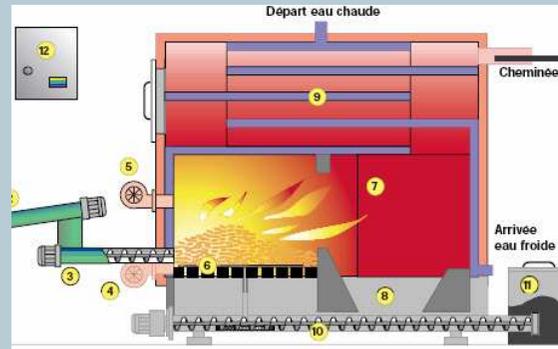
E_{sortie} : énergie finale ; chaleur de l'eau ; électricité, chaleur air...



$E_{\text{entrée}}$: énergie primaire ;
chaleur complète de tout
le bois (PCS)

Les pertes énergétiques propres

E_{perte} : énergie non récupérée



$E_{\text{perte p2}}$:
chaleur des
fumées et
vapeur d'eau

$E_{\text{perte p1}}$: énergie des déchets bois

$$E_{\text{perte p}} = E_{\text{perte p1}} + E_{\text{perte p2}} + \dots$$

Les pertes énergétiques extérieures



$E_{\text{perte ext}}$: carburant, amortissement matériel...

$$E_{\text{perte ext}} = E_{\text{perte e1}} + E_{\text{perte e2}} + \dots$$

($E_{\text{perte ext}}$: y compris énergie pour fournir énergie finale)

Les pertes énergétiques

Taux de dépenses/dissipation

$$E_{\text{perte}} = E_{\text{perte p1}} + E_{\text{perte p2}} + E_{\text{perte e1}} + E_{\text{perte e2}} + \dots$$

Attention : implicitement comparaison à un même potentiel (masse de bois récupérée ou chaleur produite...).

=> Prendre ce potentiel comme une unité d'énergie

+ choix de $E_{\text{entrée}}$ (PCS de tout le bois) comme potentiel

$$\Rightarrow \text{Taux de dépenses } \mathbf{T} : \frac{E_{\text{perte}}}{E_{\text{entrée}}}$$

Taux de dépenses énergétiques

T un indicateur énergétique

Théorie : $\mathbf{T} = 1$ un seuil de rentabilité

Pratique : \mathbf{T} est décomposable

(Facteur de rentabilité : $\mathfrak{R} = 1 - \mathbf{T} > 0$ pour une filière rentable)

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

bois : 1 à 10 t(m.s.)/ha/an.

Disponibilité des ressources de la filière

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

Sociétés, homme intéressés par E_{sortie}

$$E_{\text{sortie}} = \mathcal{R} E_{\text{entrée}} (+ E_{\text{ext}})$$

> Gisements avec $T = 10\%$ ($\mathcal{R} = 90\%$) :

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

> Gisements avec $T = 70\%$ ($\mathcal{R} = 30\%$) :

$$E_{\text{sortie}} = 0,3 E_{\text{entrée}}(70\%)$$

$$\Rightarrow E_{\text{entrée}}(70\%) = 3 E_{\text{entrée}}(10\%)$$

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/m³) :

P(2005) = **18** M.tep

Brésil : 7,7 Mtep (*conso. essence : 15 Mtep, 185 Mhab*)

EUd'A : 7,5 Mtep (*conso. essence : 400 Mtep, 300 Mhab*)

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

P(2005) = **3,6** Mtep

Allemagne : 1,5 Mtep

France : 0,45 Mtep (*conso. diesel : 31 Mtep*)

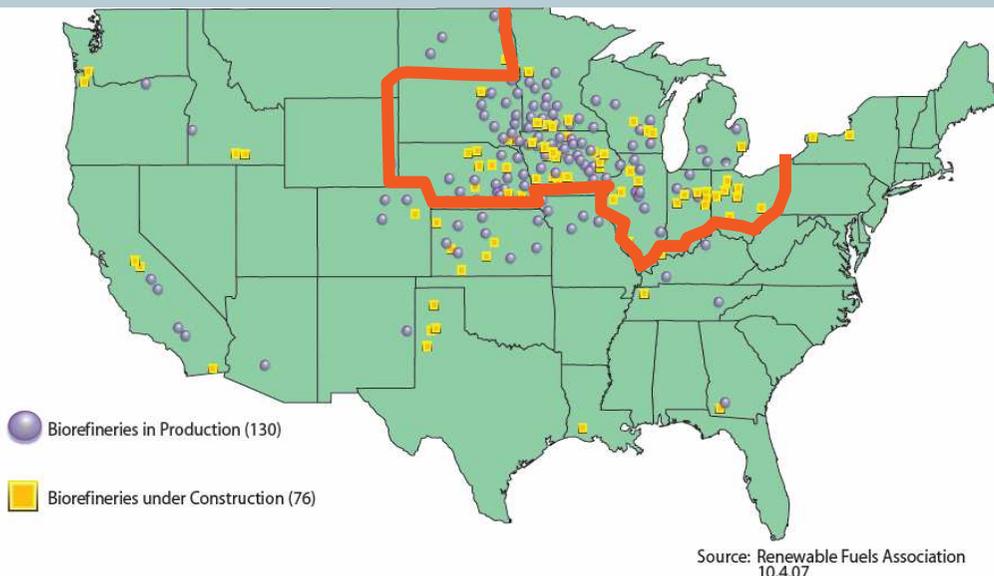
Agrocarburant : 22 Mtep

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

Sources : Ministerio da agricultura, USDA, European Biodiesel Board, IFP et British Petroleum 2006.

L'industrie de l'éthanol aux EUd'A

M.tep(etOH)/an



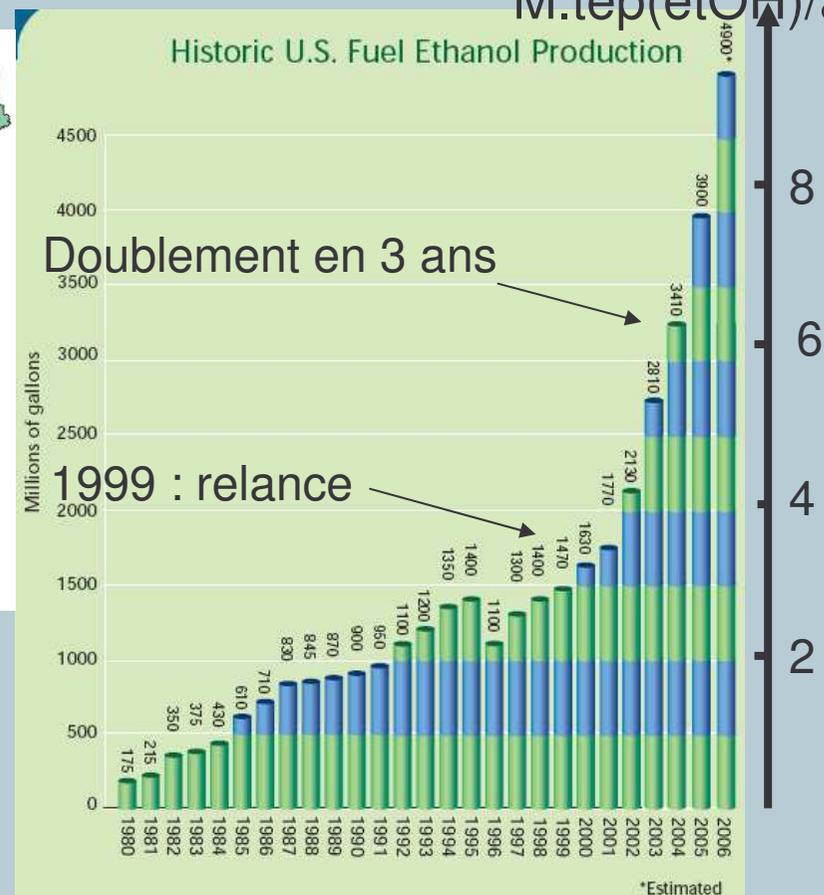
Source : Renewable Fuels Association 2007



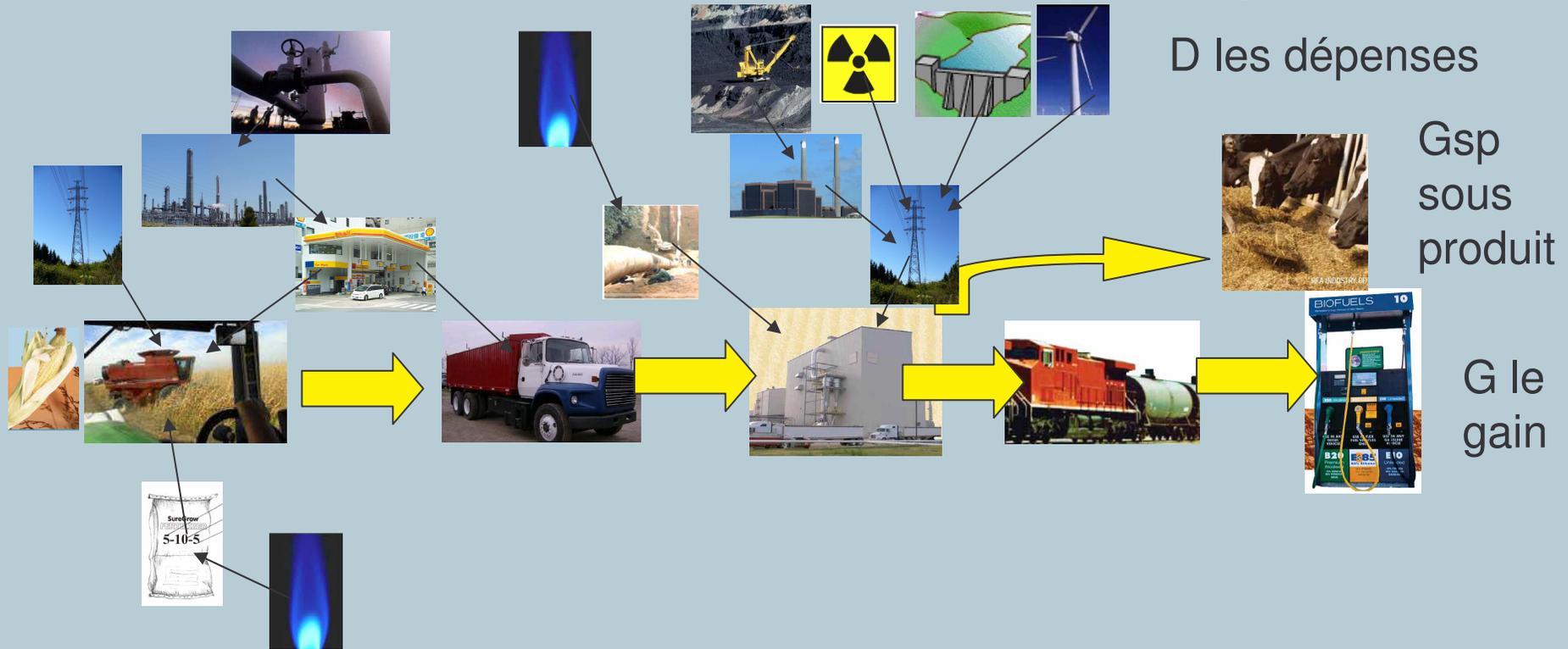
G. W. Bush (2007) : 70 Mtep d'agrocarburants en 2017.

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



Taux de dépenses **T** :

$$\frac{D}{G} = \frac{\sum D(\text{étapes})}{\text{PCI éthanol}} = \frac{\sum \sum D(\text{énergies, étapes})}{\text{PCI éthanol}}$$

PCI : pouvoir calorifique inférieur

Sous produits : G -> G+ Gsp

La controverse

Publications :	T
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%**)

En incluant le pompage d'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

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

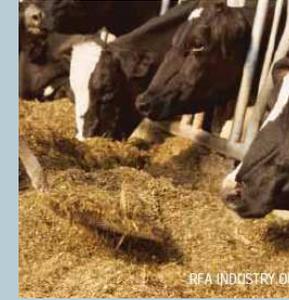
Procédé : liquéfaction et hydrolyse de l'amidon par enzymes, fermentation des sucres par levures, distillation de la solution alcoolique, séchage des résidus.

Coût énergétique : 70 % +/- 2 % !

distillation, séchage ; inhérent au procédé avec micro-organismes

Les sous - produits

En % du pouvoir calorifique de l'éthanol produit



Toutes les usines en 2005 : aliments pour élevage (bétail...)
économie de l'énergie utilisée pour les aliments remplacés : Gsp

$$\frac{G_{sp}}{G} = 12 \pm 2\%$$

$$\text{Facteur d'économie} \quad \frac{G}{G + G_{sp}} = 0,89 \pm 0,02$$

Usine pilote depuis 8 mois : fermentation méthanique d'une grande partie des résidus + déjection de bétail en engraissement. Economie de séchage.

$$\frac{D_{\text{usine}}}{G} = 12,5 \pm 0,5\%$$

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

	T 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 %

T essence (d'après USDOE) : **22 +/- 2 %**

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

-> Bilan carbone, taux d'émission CO₂...

Disponibilités agricoles



G. W. Bush (2007) : 70 Mtep d'agrocarburants en 2017.

Actuellement : presque la totalité à partir de maïs

Pour l'éthanol ex-maïs :

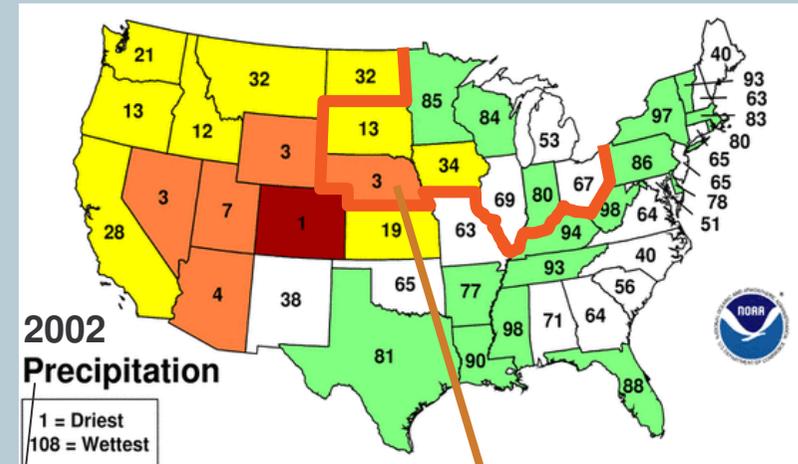
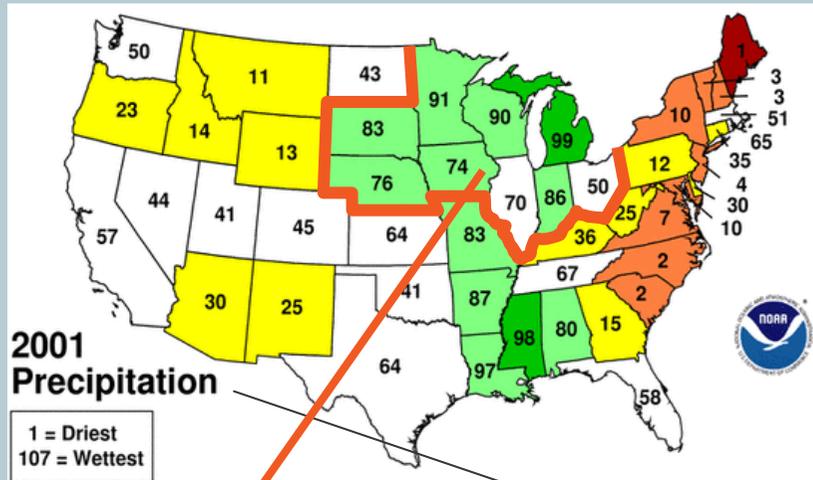
fin 2005 : 95 usines de capacité **8,4 Mtep**. 29 en construction

fin 2006 : 116 usines, **10,5 Mtep**. 79 en construction (12 Mtep).

oct. 2007 : 135 usines, **14 Mtep**. 76 en construction (12 Mtep)

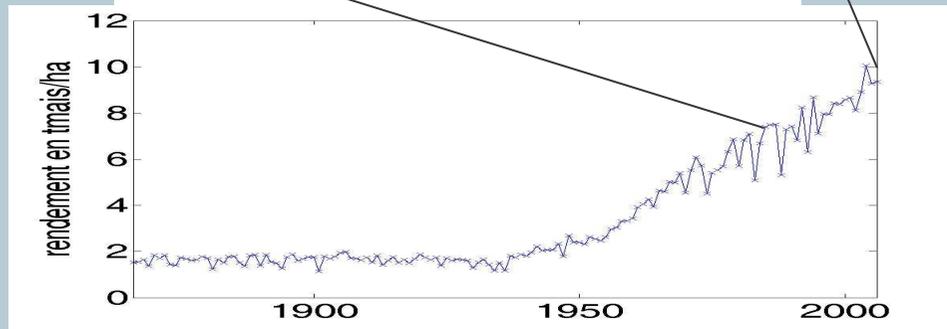
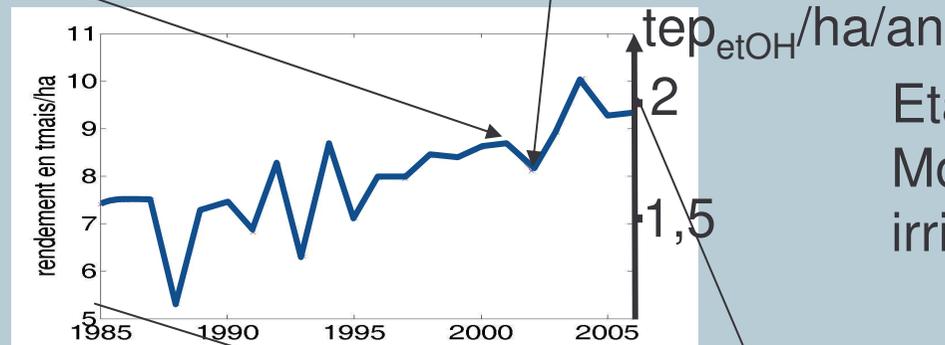
Capacité pour **fin 2008** (+2 ans) : **23 Mtep -> 20 Mtep**

Disponibilités agricoles



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

Source :
US department of
agriculture



Etat du Nébraska :
Moitié des surfaces
irriguées

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

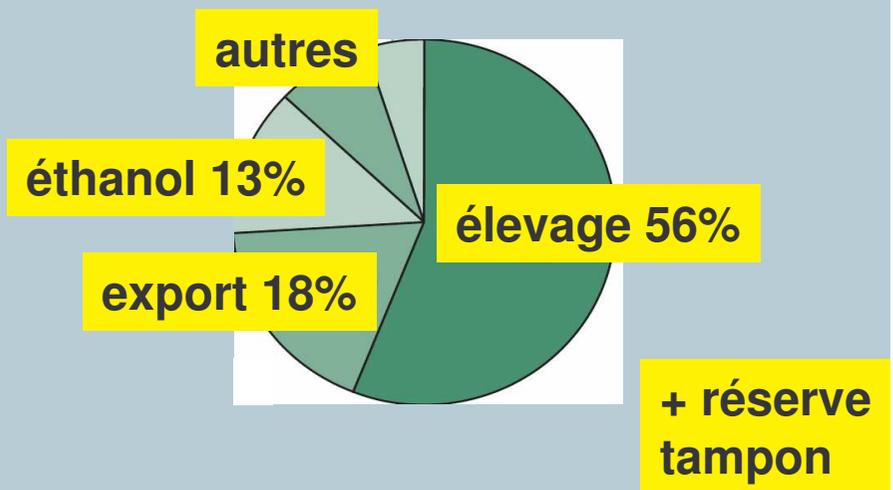
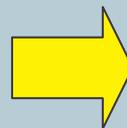
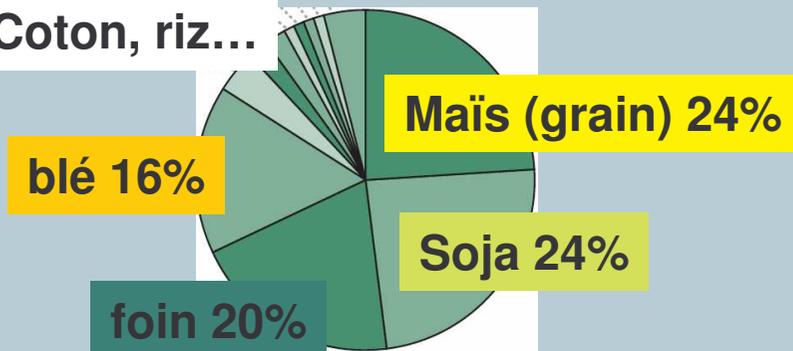
Disponibilités agricoles

Surfaces arables : 185 Mha dont 60 Mha non utilisés (jachère, repos..)

Surfaces récoltées : 125 Mha

Récolte de maïs : 300 Mt

Coton, riz...



Source : USDA, 2004

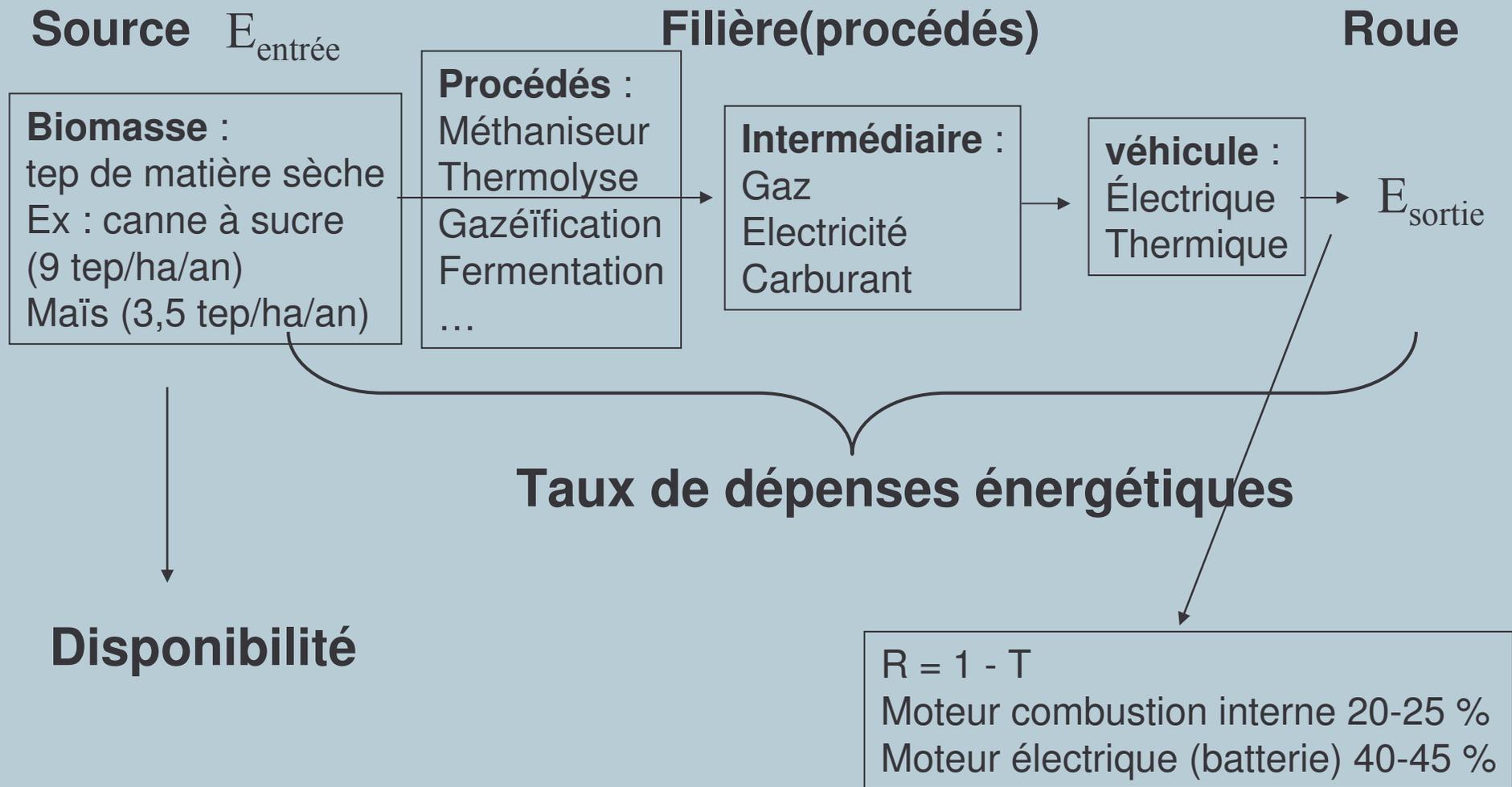
Disponibilités agricoles

Production éthanol	récolte	surface (ha)
2001 : 3,4 Mtep	17 Mt _{maïs} /244 M.t _{maïs}	2 Mha/30 Mha
2005 : 7,5 Mtep	36 Mt _{maïs} /282 M.t _{maïs}	3,9 Mha/28,5 Mha
2006 : 9,4 Mtep	44 Mt _{maïs} /268 M.t _{maïs}	4,7 Mha/28,6 Mha
Fin 2006 : hausse du prix du maïs de 60 %. Prélèvement sur réserves , colère des éleveurs et des industriels de l'agroalimentaire		
2007 : 12,4 Mtep(est.)	59 Mt _{maïs} /333 M.t _{maïs}	6,3 Mha/35,0 Mha
2007 : la sole de soja diminue de 16 %. hausse du prix du soja.		
2008 : 20 Mtep	100 Mt _{maïs} / ? M.t _{maïs}	10,5 Mha/ ? Mha
2017 : 70 Mtep	330 Mt _{maïs} / ? M.t _{maïs}	31 Mha/ ? Mha

Conclusion sur l'éthanol ex maïs aux EUd'A

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

De la source à la roue



Merci de votre attention.