

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

Par X. Chavanne Physicien/Ing. Recherche

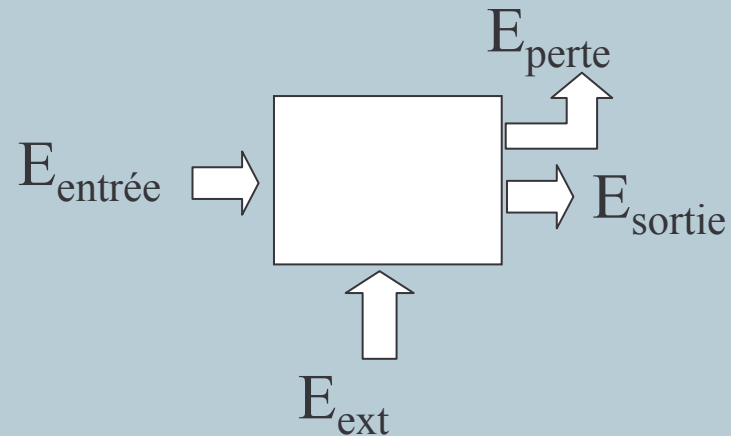
Univ. D. Diderot & Institut de Physique du Globe de Paris

# L'analyse énergétique

- **Aspects généraux**
  - Taux de dépenses
  - Disponibilité des ressources
- **Application à l'éthanol ex maïs**
  - Etat des lieux
  - Taux de dépenses
  - Disponibilités des surfaces
- **Pour aller plus loin**

article : X. Chavanne et J. P. Frangi, comptes rendus géosciences vol. 339 (2007)

# Filières énergétiques

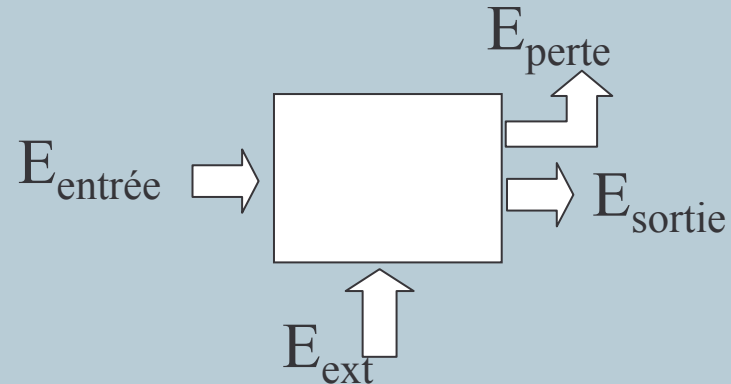


$E_{\text{entrée}}$  et  $E_{\text{ext}}$  : énergie primaire (pétrole...)

$E_{\text{sortie}}$  : énergie finale (électricité, combustibles... )

$E_{\text{perte}}$  : énergie non récupérée (chaleur, énergie des déchets...)

# Taux de dépenses énergétiques



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

(2<sup>e</sup> principe)

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

# Taux de dépenses énergétiques

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

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

Si  $\mathcal{D} > 1 \Rightarrow E_{\text{ext}} > E_{\text{sortie}}$  Est-ce rentable ?

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

$\Rightarrow \mathcal{D} < 1$  (ou sinon  $E_{\text{sortie}} < 0$  !)

# Taux de dépenses énergétiques

$\mathcal{D}$  peut être utilisé comme un indicateur énergétique

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

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

# Taux de dépenses énergétiques

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

D, G : pouvoirs calorifiques des énergies primaires  
dissipées/dépensées ou extraites/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

Les difficultés : collecter et analyser

- > données de base ou mesurées *in situ* (matériaux, électricité, combustibles, ... pouvoirs calorifiques). 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...).



# 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

# Disponibilité des ressources de la filière

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

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

Sociétés, homme intéressés par  $E_{\text{sortie}}$

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

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

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

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

# 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/m<sup>3</sup>) :

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*)

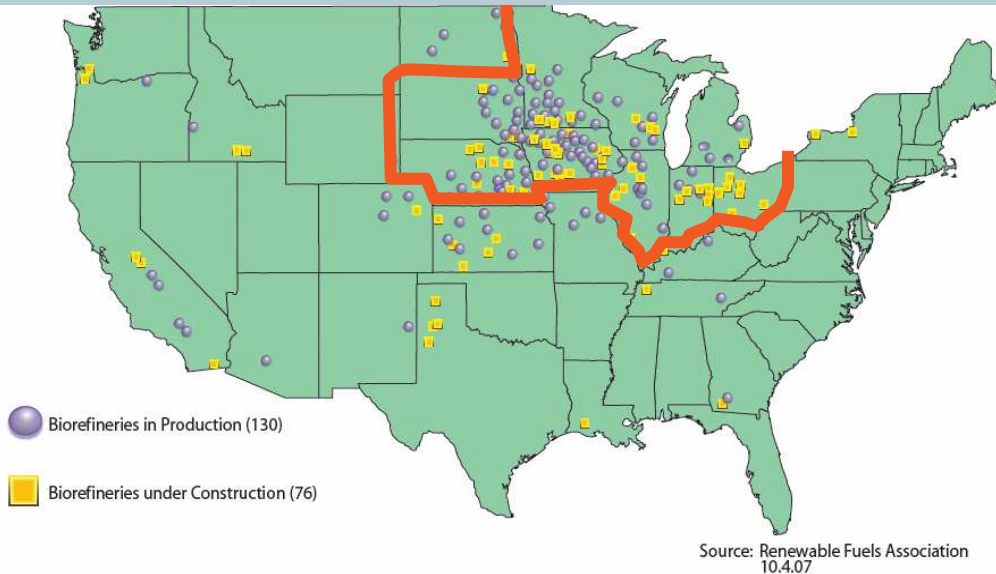
**Agrocarburant : 22 Mtep**

(*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



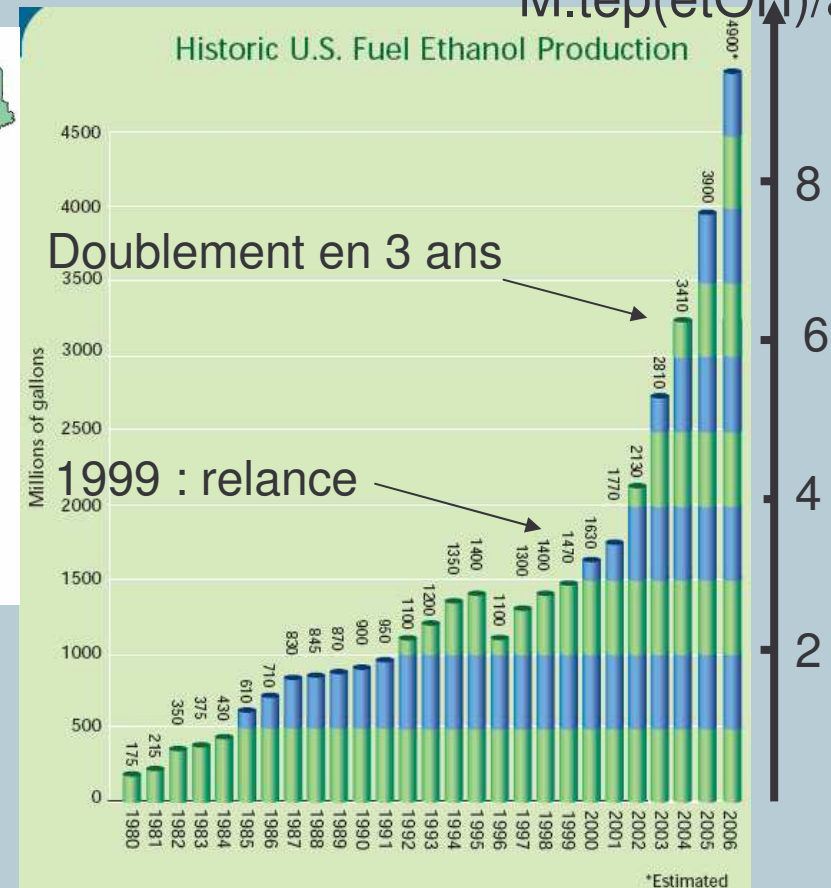
Source : Renewable Fuels Association 2007



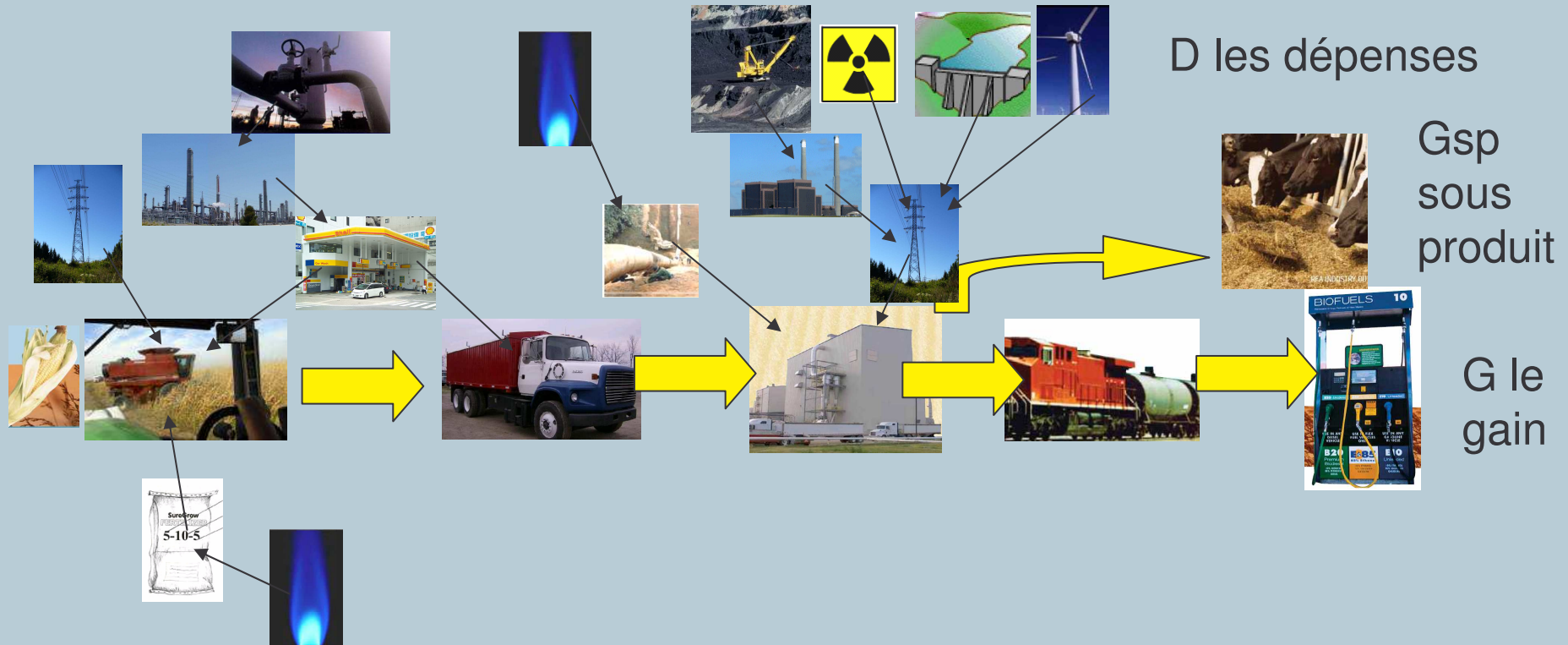
G. W. Bush (2007) : 70 Mtep d'agrocarburants en 2017.

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  $\mathcal{D}$  :

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

PCI : pouvoir calorifique inférieur

Sous produits :  $G \rightarrow G + G_{sp}$

# La controverse

Publications :



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

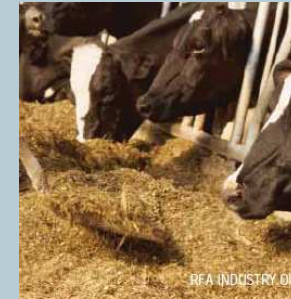
**Procédé** : liquéfaction et hydrolyse de l'amidon par enzymes, fermentation des sucres par levures, distillation de la solution alcoolique, séchage des résidus.

**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

Ⓞ sans les sous-produits

avec les sous-produits

<b>En 2005 (ferme 2001) :</b>	<b>97 +/- 2 %</b>	<b>86 +/- 2 %</b>
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<sub>2</sub>...

# Disponibilités agricoles



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

## 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 -> 21 Mtep**

# Disponibilités agricoles

Production éthanol

récolte

surface (ha)

2001 : 3,4 Mtep

17 Mt<sub>maïs</sub>/244 M.t<sub>maïs</sub>

2 Mha/30 Mha

2006 : 9,4 Mtep

44 Mt<sub>maïs</sub>/268 M.t<sub>maïs</sub>

4,7 Mha/28,6 Mha

2008 : 21 Mtep

100 Mt<sub>maïs</sub>/? M.t<sub>maïs</sub>

10,5 Mha/? Mha

2017 : 70 Mtep

330 Mt<sub>maïs</sub>/? M.t<sub>maïs</sub>

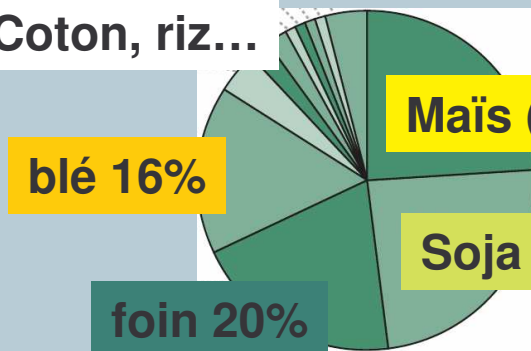
31 Mha/? Mha

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

Surfaces récoltées : 125 Mha

Récolte de maïs : 300 Mt

Coton, riz...



Maïs (grain) 24%

blé 16%

Soja 24%

foin 20%

autres

éthanol 13%

export 18%

élevage 56%

+ réserve tampon

Source : USDA, 2004

# Disponibilités agricoles

Coton, riz...

blé 16%

foin 20%

Maïs (grain) 24%

Soja 24%

Source : USDA, 2004

autres

éthanol 13%

export 18%

élevage 56%

+ réserve tampon

Surfaces récoltées : 125 Mha

Récolte de maïs : 268 Mt

Coton, riz...

blé 16%

foin 20%

Maïs (grain) 24%

Soja 25%

Source : USDA, 2006

autres

éthanol 18%

export 19%

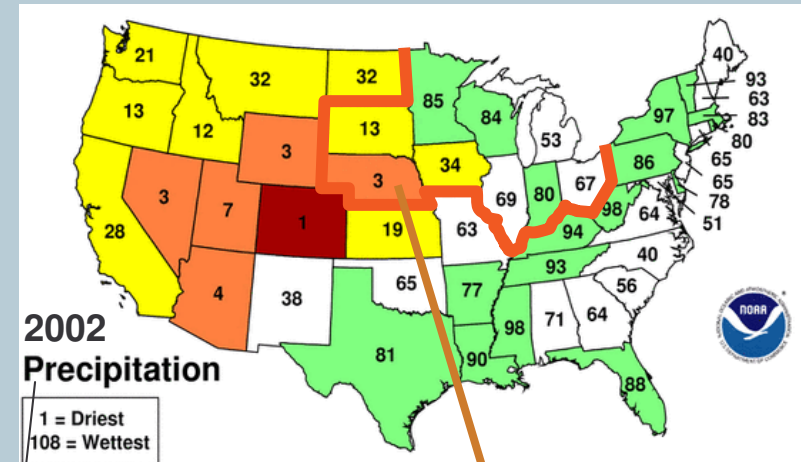
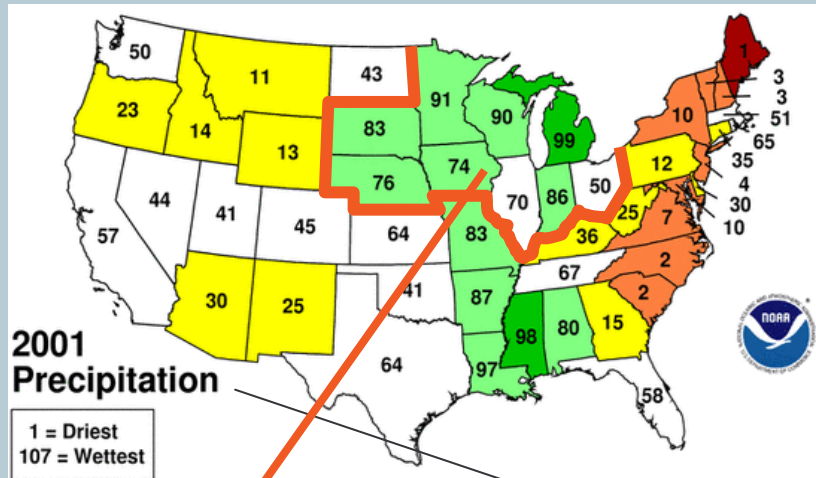
élevage 51%

Fin 2006 : hausse du prix de 60 % et prélèvement sur réserves

2007 : sole maïs au détriment sole soja => hausse des prix du soja

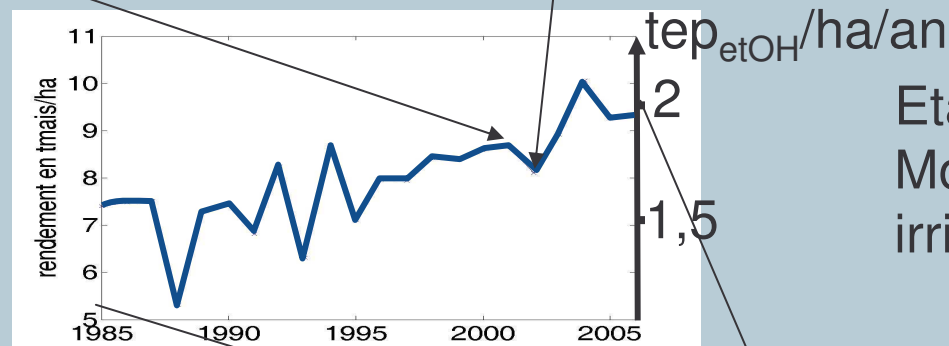


# Disponibilités agricoles

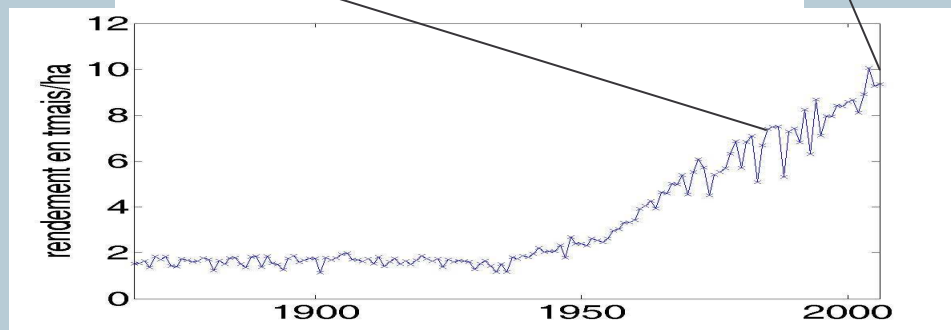


9 principaux Etats producteurs  
(+ 90% de l'éthanol)  
Région propice

Source :  
US department of  
agriculture



Etat du Nébraska :  
Moitié des surfaces  
irriguées



+0,12 t<sub>maïs</sub>/ha par an  
Plus d'engrais  
Sélectivité plante

# 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

