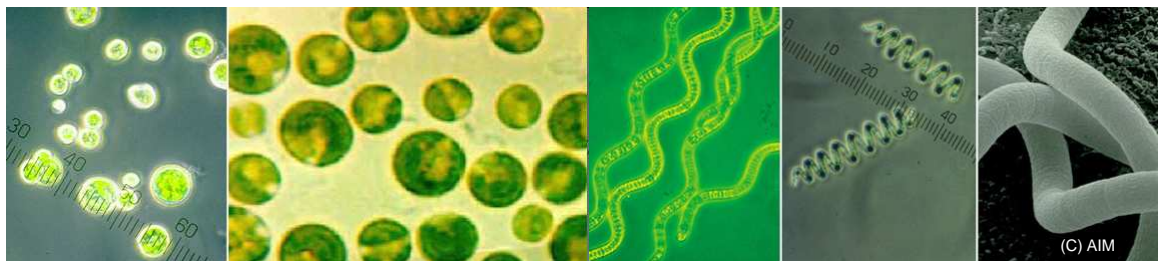


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# MICRO-ALGUES ET BIOCARBURANTS DE 3<sup>IÈME</sup> GÉNÉRATION POTENTIEL ET ENJEUX ACTUELS



Florian Delrue  
[florian.delrue@cea.fr](mailto:florian.delrue@cea.fr)

SÉMINAIRE BIOMASSE ASPROM  
19 MARS 2013



(C) Ouest France



(C) AP Photo

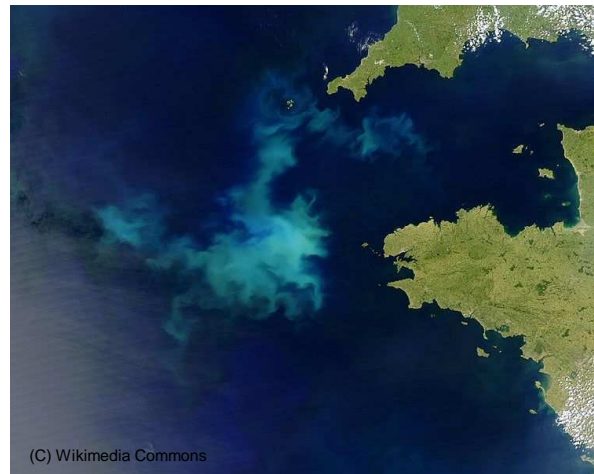


(C) AFP

**BONNES VACANCES**  
L'élevage industriel des porcs et les engrais génèrent des algues vertes.  
Leur décomposition dégage un gaz mortel pour l'homme.



Agissez avec nous : [www.fne.asso.fr](http://www.fne.asso.fr)



(C) Wikimedia Commons

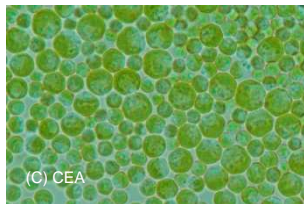
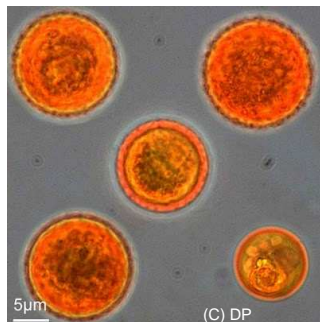


(C) His Noodly Appendage

## Macro-algues

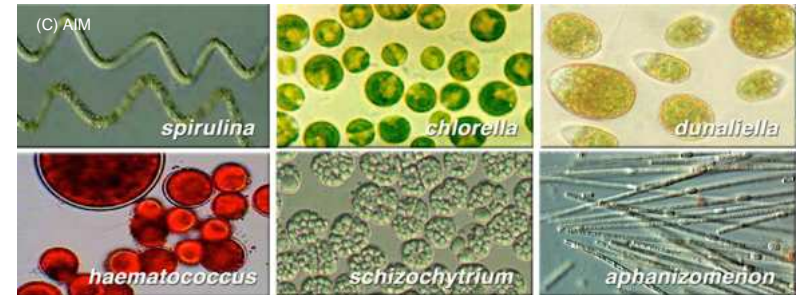


## Micro-algues



Taille microscopique (1-10  $\mu\text{m}$ )  
Organisme unicellulaire

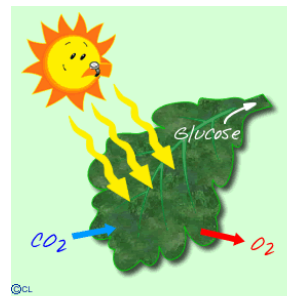
Habitat principalement aquatique  
(eau de mer, eau douce)



Croissance rapide par division cellulaire : plusieurs divisions par jour en conditions favorables

50% de fixation du  $\text{CO}_2$   
A l'origine de notre atmosphère  
Un des premiers maillons de la chaîne alimentaire

200 000 à 800 000 espèces dont environ 35 000 décrites



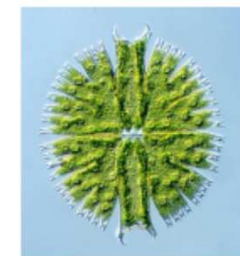
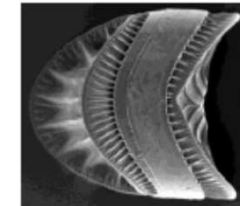
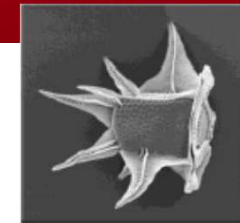
Efficacité photosynthétique allant jusqu'à 9% (6% pour la canne à sucre)

- Peuvent contenir jusqu'à 80% de lipides (plus généralement entre 20 et 50%)
- Production possible sur des terres non arables
- Production tout au long de l'année

Culture	Production d'huile (L/ha)
Mais	172
Soja	446
Jatropha	1892
Huile de palme	5950
Micro-algues	20,000 – 60,000

Adapté de Chisti et al., 2007

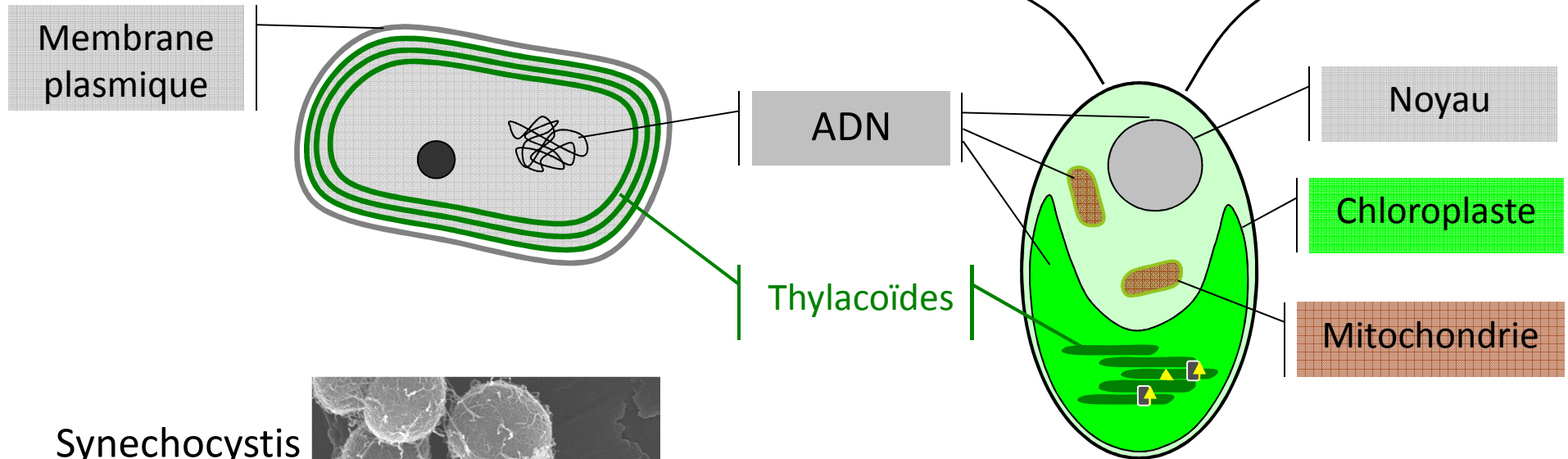
- Pas besoin d'herbicides ni de pesticides
- Séquestrent le CO<sub>2</sub>
- Possibilité de produire des co-produits à haute valeur ajoutée



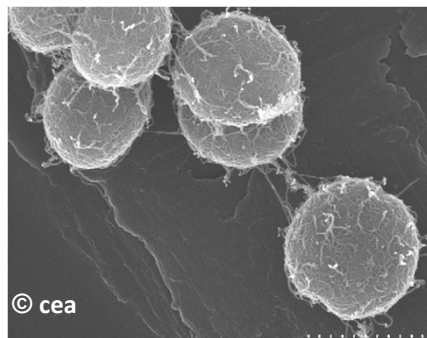
# LES DIFFÉRENTS TYPES DE MICRO-ALGUES

Les cyanobactéries  
cellules procaryotes

Les micro-algues: cellules  
eucaryotes

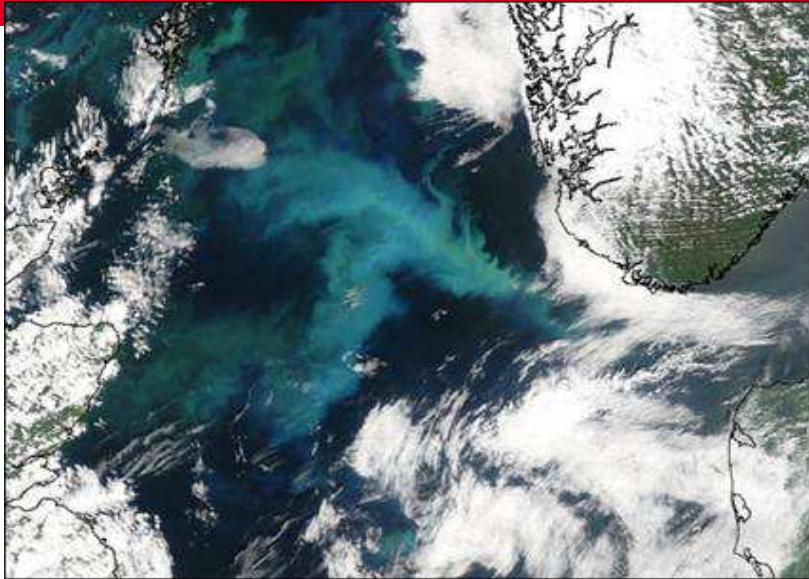


Synechocystis



Chlamydomonas  
reinhardtii

# DANS TOUS TYPES D'ENVIRONNEMENTS



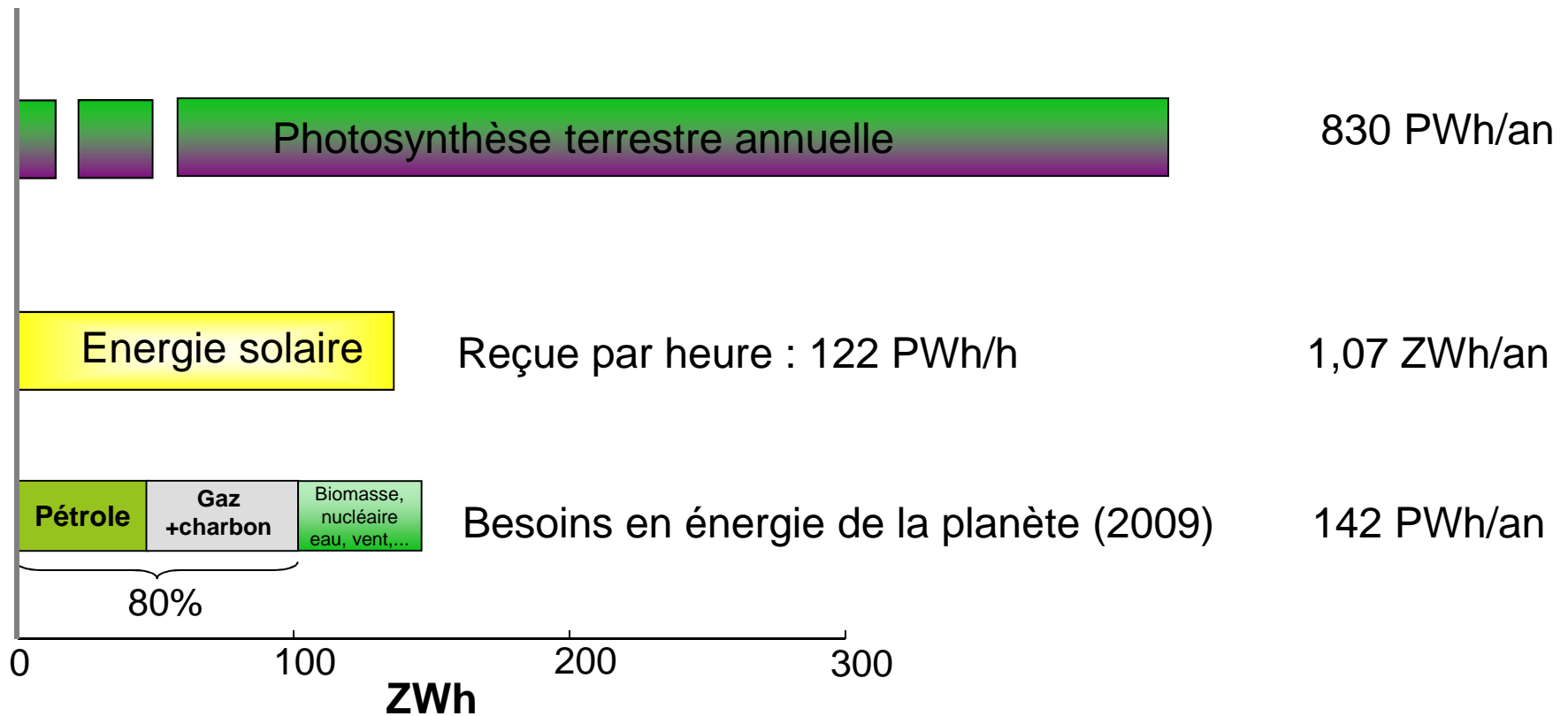


**RÉCOLTE DE SPIRULINE (“DIHÉ”) SUR  
LES RIVES DU LAC TCHAD**





# L'ÉNERGIE SOLAIRE : UN GISEMENT CONSIDÉRABLE





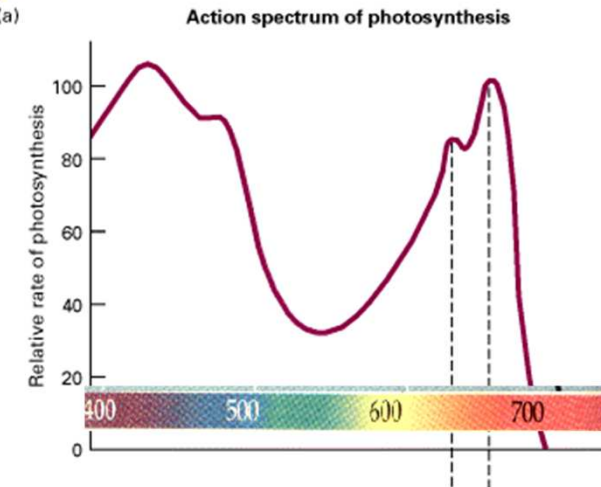
**1 mole de CO<sub>2</sub> fixée** est équivalent à 475 kJ (1/6 mole glucose)

**Photons PAR** 217 kJ. mole<sup>-1</sup> en moyenne

**PAR (Photosynthetic Active Radiation)** : ~45% de l'énergie solaire

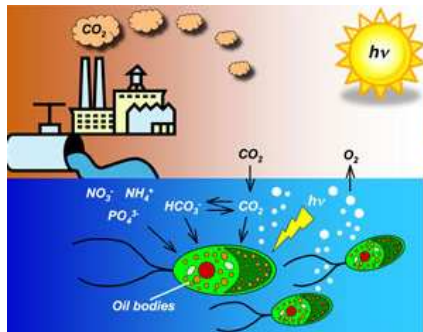
**Conversion théorique maximale du PAR en énergie chimique (biomasse)** :  $475 \text{ kJ} / (217 \text{ kJ} \times 8 \text{ photons}) = 27\%$

**Conversion photosynthétique maximale** :  
 $27\% \times 45\% = 12\%$



**Si rendement = 12% : 68 000 km<sup>2</sup> de culture de micro-algues suffirait aux besoins énergétiques mondiaux = 1/10 de la France**

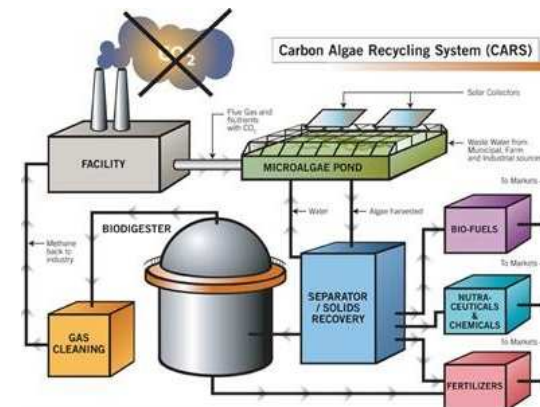
**Milieu très humide : accès difficile à la biomasse**  
 (~1g/L, soit 99.9% d'eau !)



**Forte demande en eau, en nutriments (N, P, K) et en CO<sub>2</sub> (2g de CO<sub>2</sub> par g d'algues)**

**Nombreuses incertitudes inhérentes à la maturité de la filière :**

- Coût énergétique
- Coût économique
- Passage à l'échelle industrielle



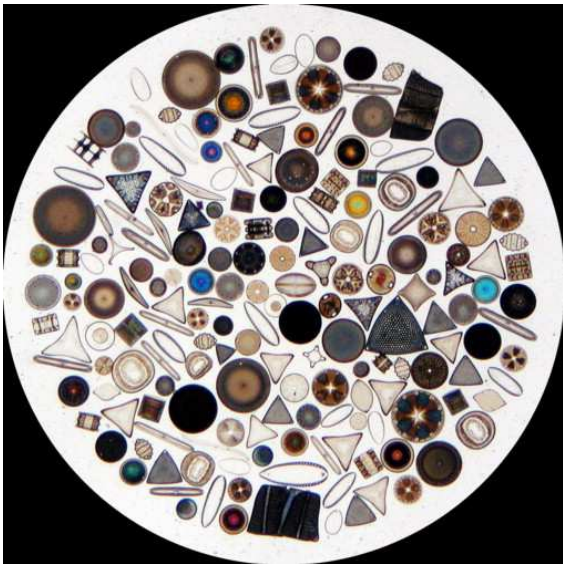
## Un fort engouement depuis environ 5 ans :

Des centaines de start-ups principalement aux USA (>200)

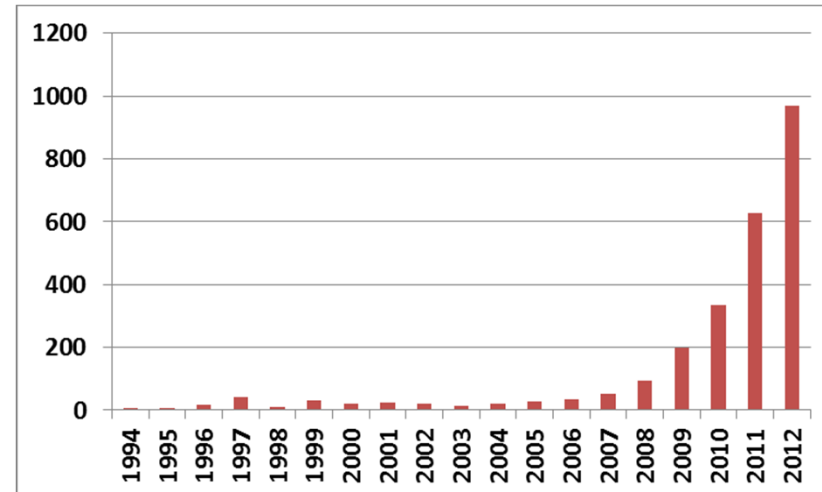
Un nombre de publications en croissance exponentielle (idem brevets)

Beaucoup d'effets d'annonce

Des associations d'entreprises (Exxon – Craig Venter, Total – Cellectis, Shell – Cellana, Solazyme – Roquette, Sofiprotéol – Fermentalg, EADS – ENN, ...)



(C) Wikimedia Commons

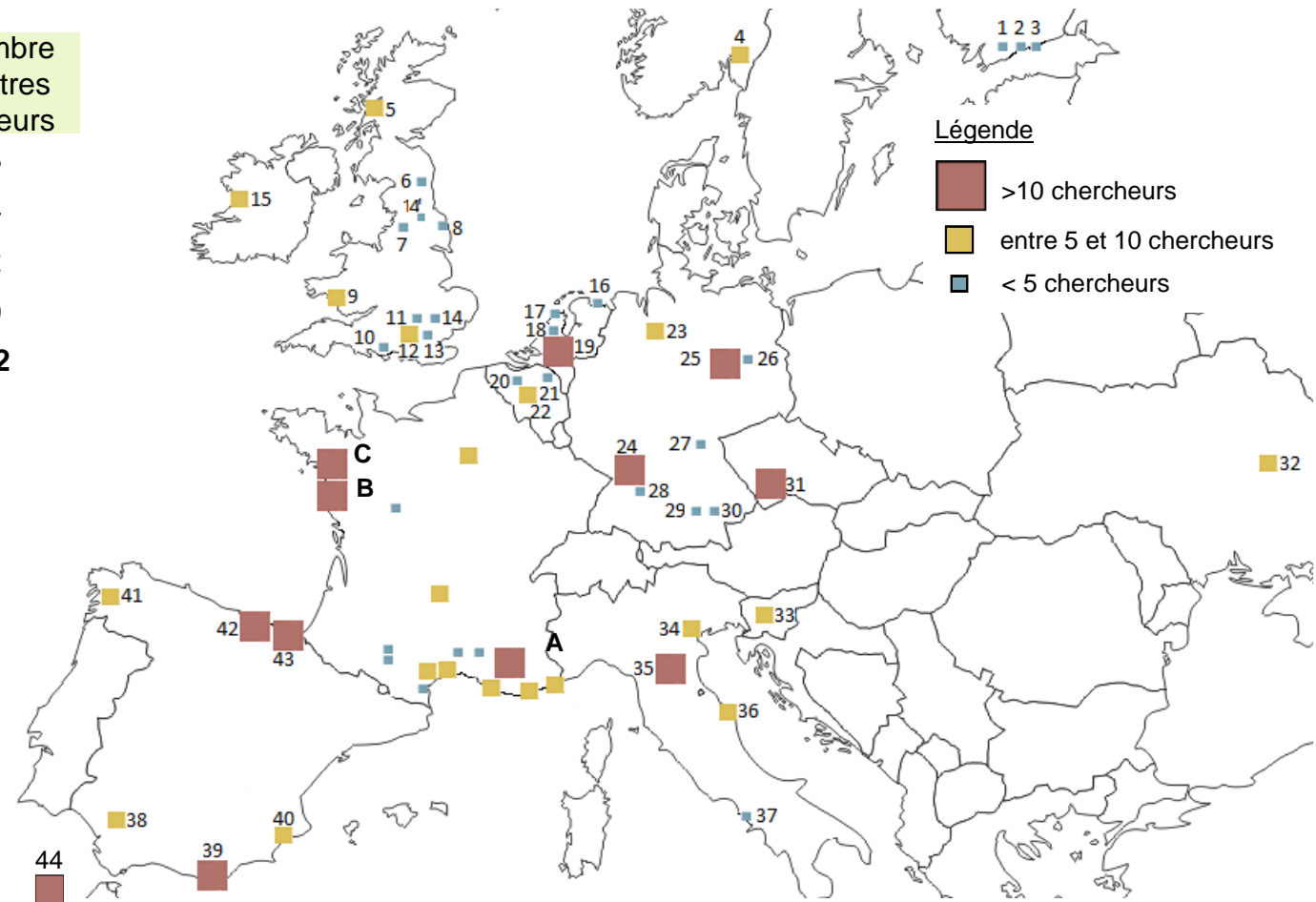


Nombre de publications par an

Source Science Direct

□ 12 centres leaders (>10 chercheurs) et au total 350 chercheurs travaillent en R&D dans le domaine de la biomasse 3G. La France, bien placée, possède le plus grand nombre de centres de grande taille.

Pays leaders	Effectifs estimés	Nombre centres majeurs
France	150	3
Espagne	90	4
Allemagne	65	2
Angleterre	45	0
<b>Total Europe</b>	<b>350</b>	<b>12</b>



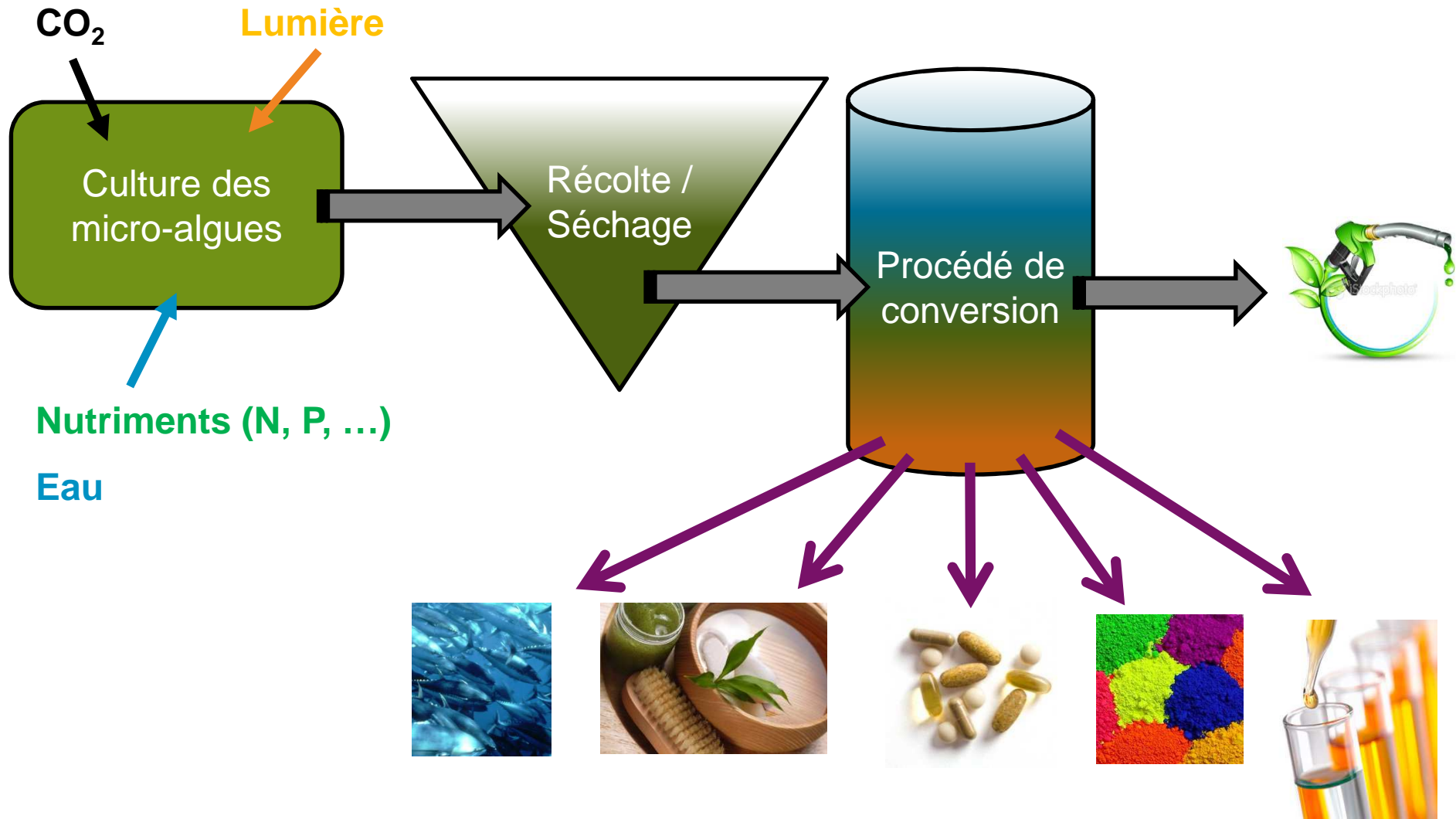
On entend par chercheurs les personnels de recherche permanents et non permanent dont post-doc et thésard

## UTILISATION ET PRODUCTION ACTUELLE

Algue	Production annuelle (tonnes)	Pays producteur	Applications et Produits
<i>Spirulina</i>	3000	Chine, Inde, Etats-Unis, Myanmar, Japon	Nutrition animale et humaine, phycobiliprotéines, Cosmétiques
<i>Chlorella</i>	2000	Taiwan, Allemagne, Japon	Nutrition humaine, aquaculture, cosmétiques
<i>Dunaliella</i>	1200	Australie, Israël, Etats-Unis, Chine	Nutrition humaine, cosmétiques, $\beta$ -carotène
<i>Aphanizomenon</i>	500	Etats-Unis	Nutrition humaine
<i>Haematococcus</i>	300	Etats-Unis, Inde, Israël	Aquaculture, Astaxanthine
<i>Cryptocodinium</i>	240	Etats-Unis	Oméga 3 (DHA)
<i>Schizochytrium</i>	10	Etats-Unis	Oméga 3 (DHA)

Adapté de Spolaore, 2011

# cea SCHÉMA DE LA FILIÈRE



## Deux types de cultures :

1. Systèmes ouverts (extensifs) : lagunes classiques et à « haut rendement » (ou **raceway**)





# CULTURE DE MICRO-ALGUES



Earthrise Algae Farm, Calipatria, California, USA, Culture en bassins ouverts sur 22 ha



## 2. Systèmes fermés (intensifs) : photobioréacteur

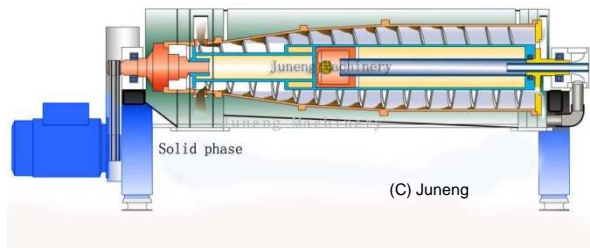


## La récolte et le séchage

### Coagulation-Floculation / Sédimentation



(C) AIM



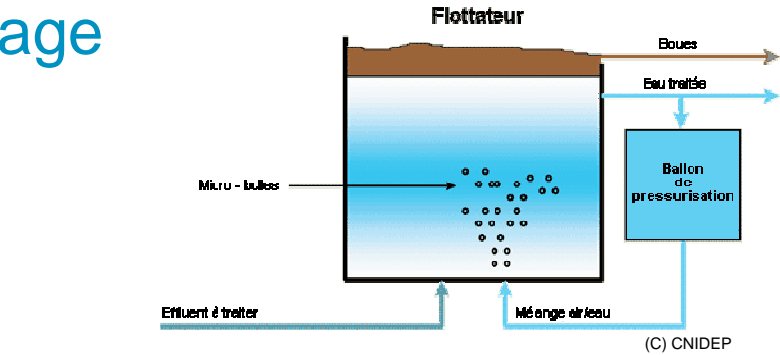
(C) Juneng

### Centrifugation



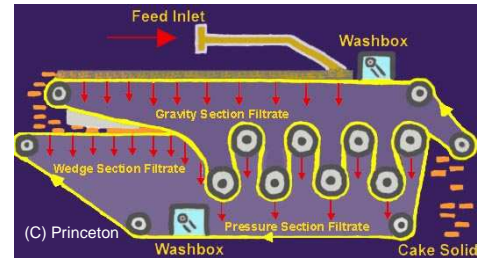
(C) Tradeln Fr

### Séchage thermique



(C) CNIDEP

### Coagulation-Floculation / Flottation



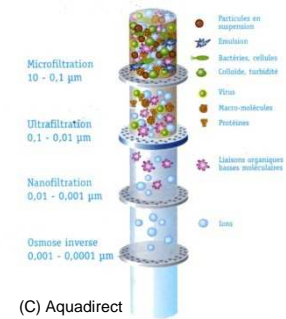
(C) Princeton

### Filtration



(C) CG72

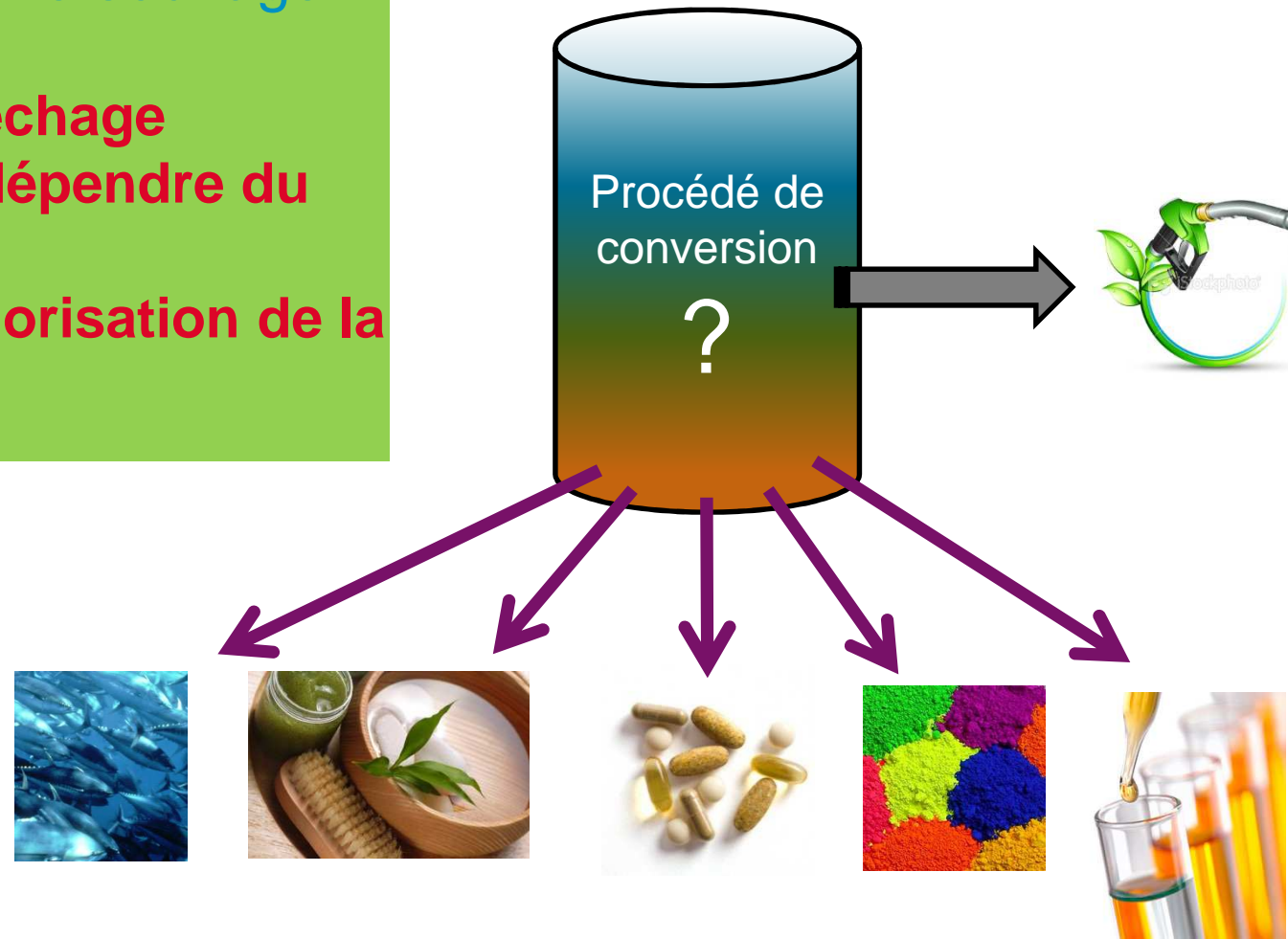
### Séchage solaire



(C) Aquadirect

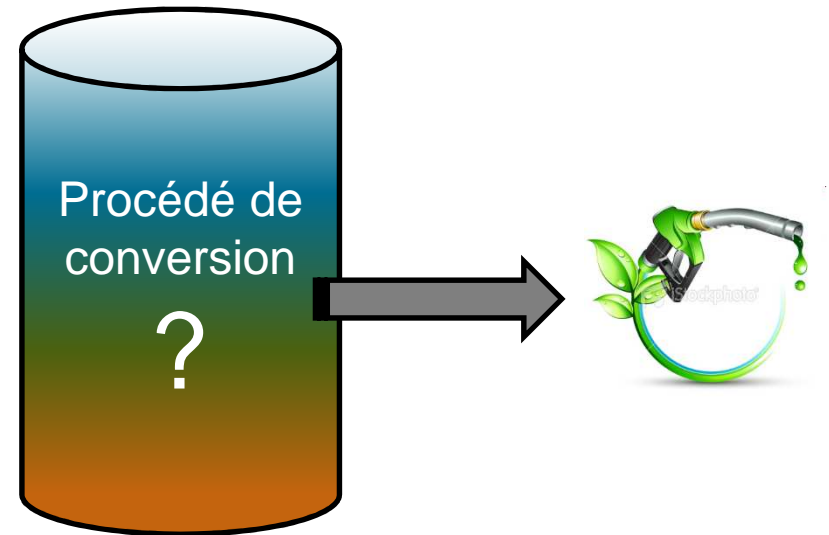
## La récolte et le séchage

Le degré de séchage recherché va dépendre du procédé de conversion/valorisation de la biomasse



## La récolte et le séchage

**Le degré de séchage recherché va dépendre du procédé de conversion/valorisation de la biomasse**



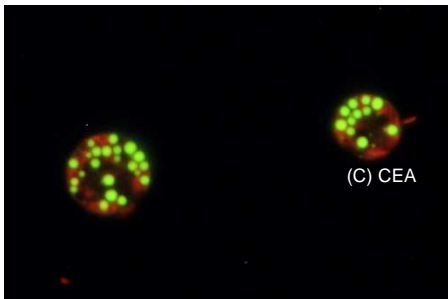
**Pour l'application Energie : on va limiter l'étape de séchage au maximum car fortes dépenses énergétiques (chaleur latente de vaporisation de l'eau)**

⇒ **Techniques de conversion par voie humide**

# LA FILIÈRE DE RÉFÉRENCE POUR LES BIOCARBURANTS 3G

- Production de biocarburant à partir des lipides contenus dans les micro-algues
- Filière la plus étudiée à l'heure actuelle

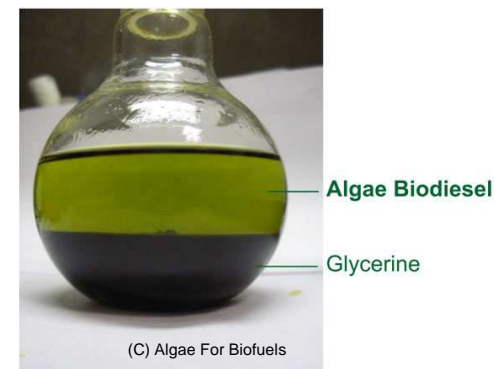
## Deux étapes indispensables :



- L'extraction des lipides contenus dans les micro-algues

- La conversion de ces lipides en biocarburant

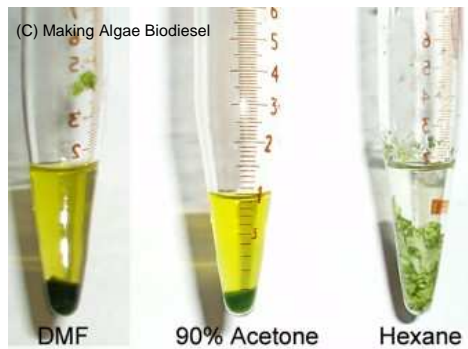
- \* Bio-diesel
- \* Bio-kérosène



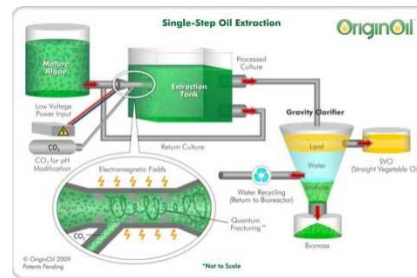
## Extraction des lipides

**Objectif :** Extraction des lipides contenus dans la biomasse  
Séchage = énergivore → Procédés par voies humides privilégiés

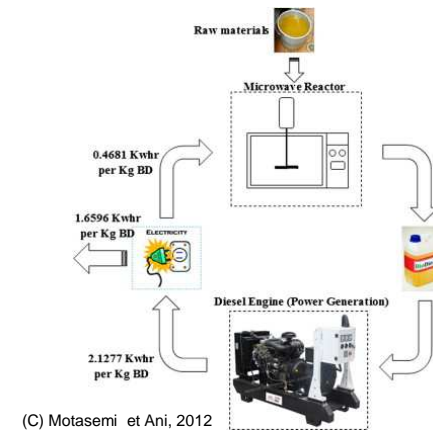
### Extraction au solvant



### Champs électromagnétiques



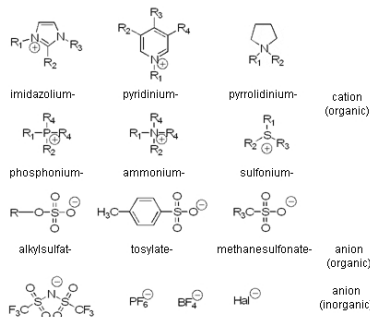
### Micro-ondes



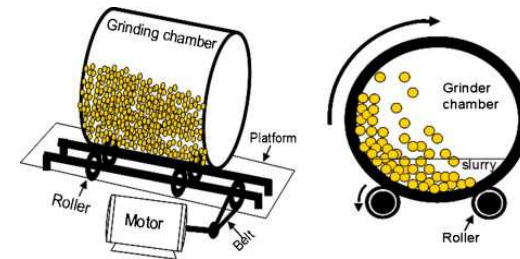
### Ultrasons



### Liquides ioniques



### Actions mécaniques

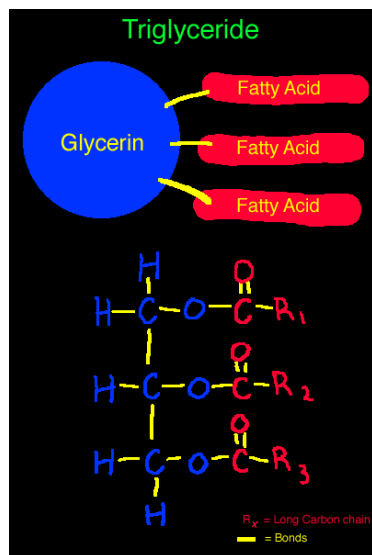


(C) Balasundaram, et al. 2012

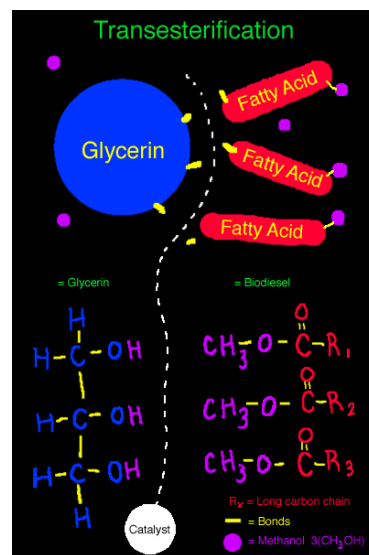
## L'étape de conversion des lipides en biocarburant

**Objectif :** Obtenir des chaînes du type  $C_{10}$ - $C_{14}$  (kérosène) ou  $C_{14}$ - $C_{20}$  (Diesel) avec une faible teneur en Oxygène

### Transestérification



(C) www.answers-to-your-biodiesel-questions.com



### Hydro-traitement

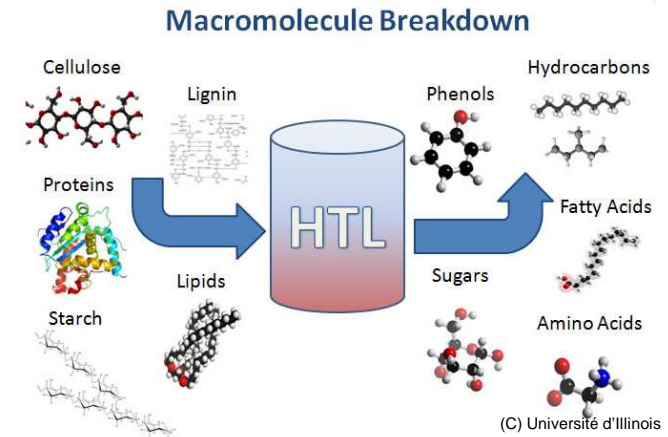


(C) Sundyne



## Liquéfaction hydrothermale

Transformation directe de la biomasse humide en bio-huile (« bio-crude » ou bio-brut)  
T = 250 – 350°C, P = 100-200 bars



- Meilleur **rendement** que par extraction des lipides
- Procédé utilisable sur de la **biomasse délipidée**
- Meilleure **qualité** d'huile que par pyrolyse (moins d'oxygène)
- Bilan énergétique incertain : recirculation de la chaleur**
- Nécessite d'une **étape de raffinage**

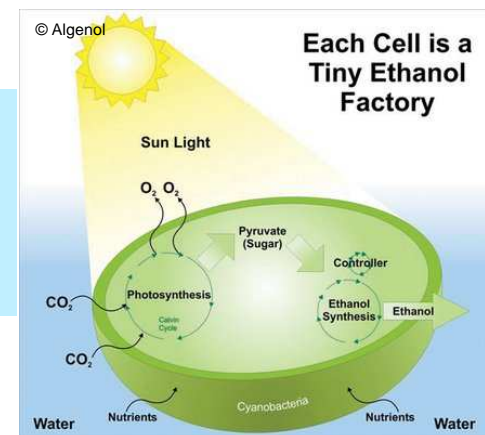
**Fermentation alcoolique** : transformation de la matière organique (généralement des sucres) en alcool par des micro-organismes

## 2 voies possibles :

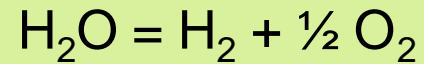
- Utilisation des micro-algues comme organismes fermenteurs
- Compétition avec les levures (plutôt meilleures pour le moment)
- Utilisation des micro-algues comme ressource (forte teneur en amidon)
- Difficulté pour accéder à l'amidon : étape d'hydrolyse acide ou enzymatique nécessaire
- Co-valorisation

### Troisième voie : *Algenol, Joule Unlimited, Synthetic Genomics (USA)*

Micro-algues (cyanobactéries) génétiquement modifiée qui fabriquent du sucre en excès qu'elles transforment elles-mêmes en alcool qui est ensuite sécrété

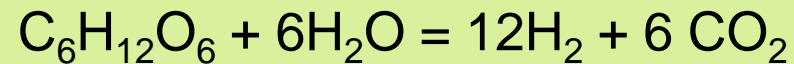


*Voie directe* : bio-photolyse de l'eau

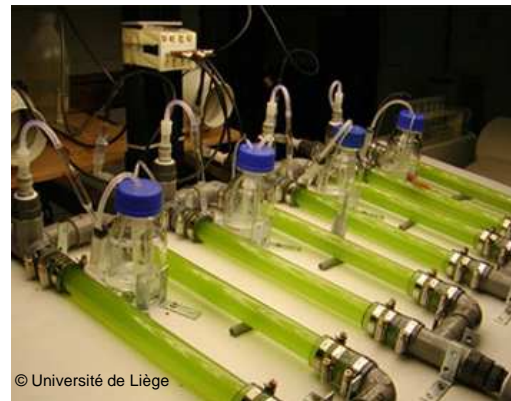


Découvert en 1939, phase anaérobie, en présence de lumière et par Fe-hydrogénase (inhibée par O<sub>2</sub>)

*Voie indirecte* : bio-photolyse d'amidon

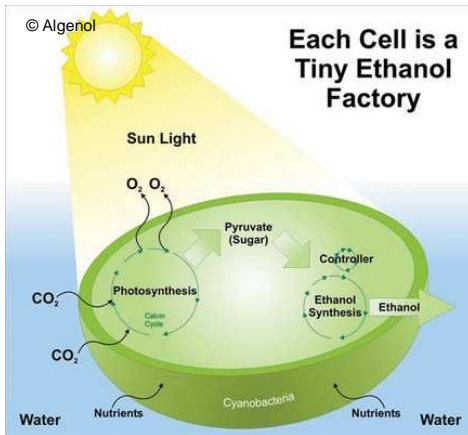


2 étapes : accumulation d'amidon puis photo-décomposition de l'amidon



# SÉCRÉTION DES MOLÉCULES D'INTÉRÊT

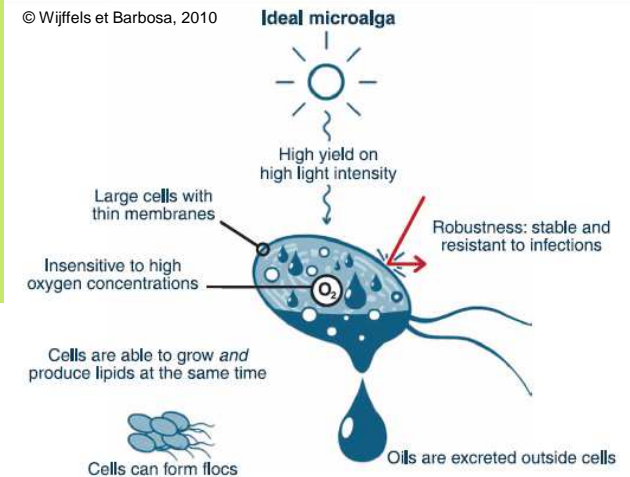
**Objectif :** Supprimer l'étape de concentration/séchage de la biomasse, car extrêmement énergivore



**Alcools :** cf AlgénoI, Joule Unlimited, Synthetic Genomics

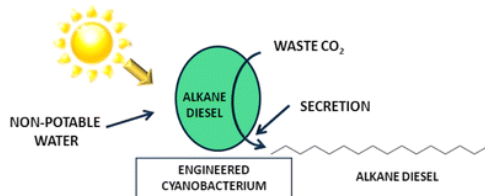
**Lipides :** Nécessite une transformation chimique en biocarburant (transestérification, HDO)

© Wiffels et Barbosa, 2010

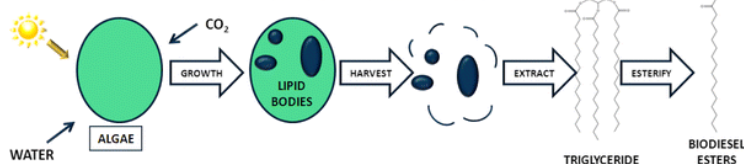


© Joule Unlimited

DIRECT, CONTINUOUS PROCESS FOR RENEWABLE DIESEL PRODUCTION



ALGAL BIOMASS DIESEL PRODUCTION



**Alcanes/alcènes :** Carburant directement utilisable

**Bilan énergétique :**  
meilleur potentiel que les biocarburants 2G



### Résultats environnementaux :

Faibles émissions de gaz à effet de serre (/2 par rapport aux biocarburants 2G, /4 par rapport au diesel de pétrole)  
Moins d'utilisation d'eau que pour les cultures terrestres

### Couts de production élevés :

x2 par rapport au diesel de pétrole avec un baril à 100\$

**MAIS** si baril à 150\$ (horizon 2030) + amélioration technologiques :  
biodiesel 3G compétitif

⇒ **Importance des co-produits**



### Moyens d'action

**Principal paramètre** : Productivité en lipides



**Réduire les coûts de l'étape de culture**

> 50% du cout de production si photobioréacteur  
> 30% si système ouvert

**Diminuer la consommation énergétique**

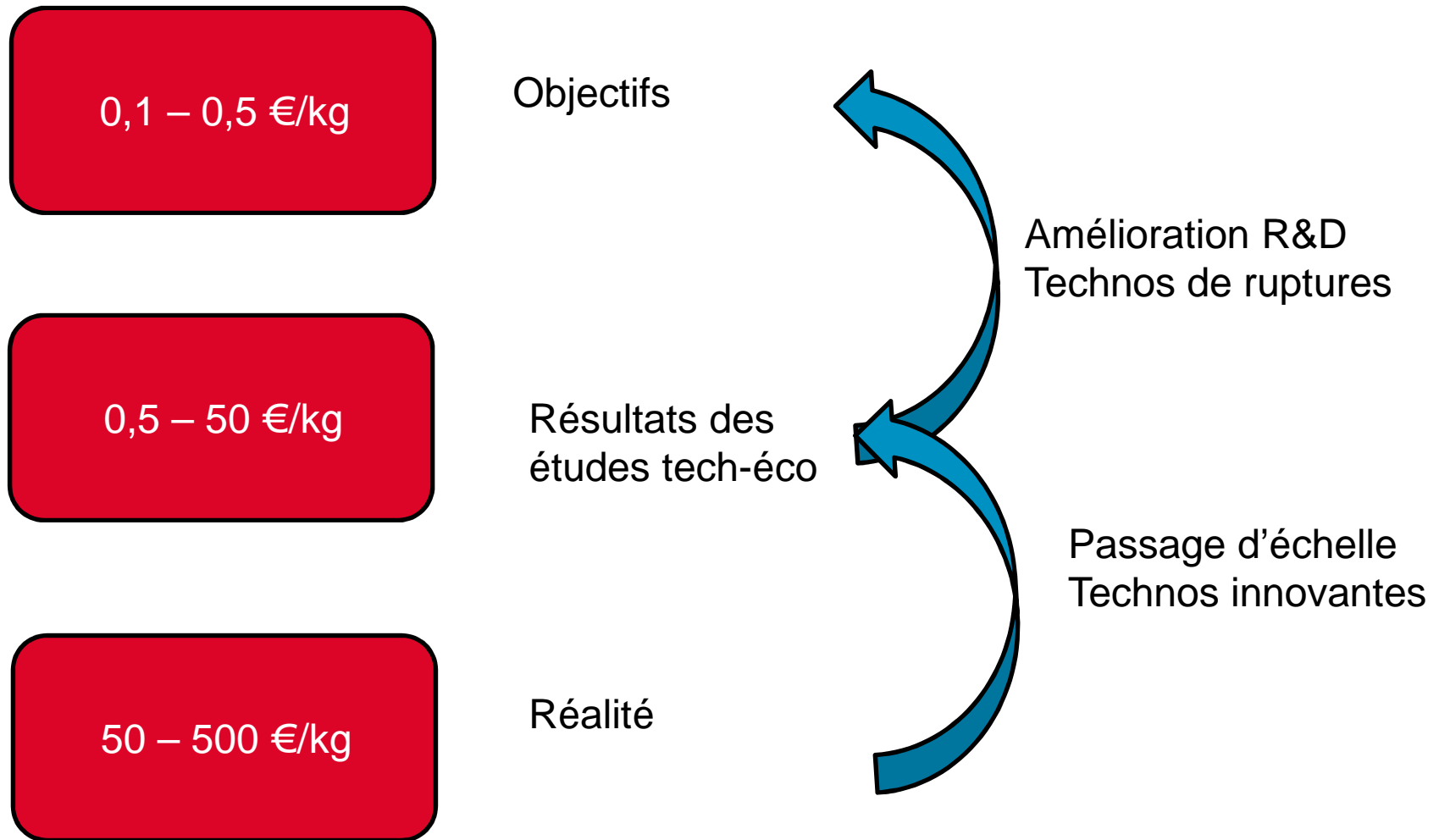
Récolte et séchage de la biomasse = 50% de la dépense énergétique



Utiliser des **déchets organiques** comme source de nutriments et des **sources industrielles de CO<sub>2</sub>**

**Importance de la localisation** pour les émissions de GES (+70% si aux Etats-Unis, +40% si mix énergétique européen par rapport à la France)





## QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

Consommation annuelle d'énergie fossile en France = 130 millions de TEP/an

Il faudrait environ 50 000 km<sup>2</sup> de culture de micro-algues pour remplacer la totalité de la consommation d'énergie fossile soit 7% de la superficie totale de la France

*Soit 700 m<sup>2</sup> par habitant ou 1/10 d'un terrain de football*



Nécessité d'une solution à multiple facettes, le fameux « mix énergétique »



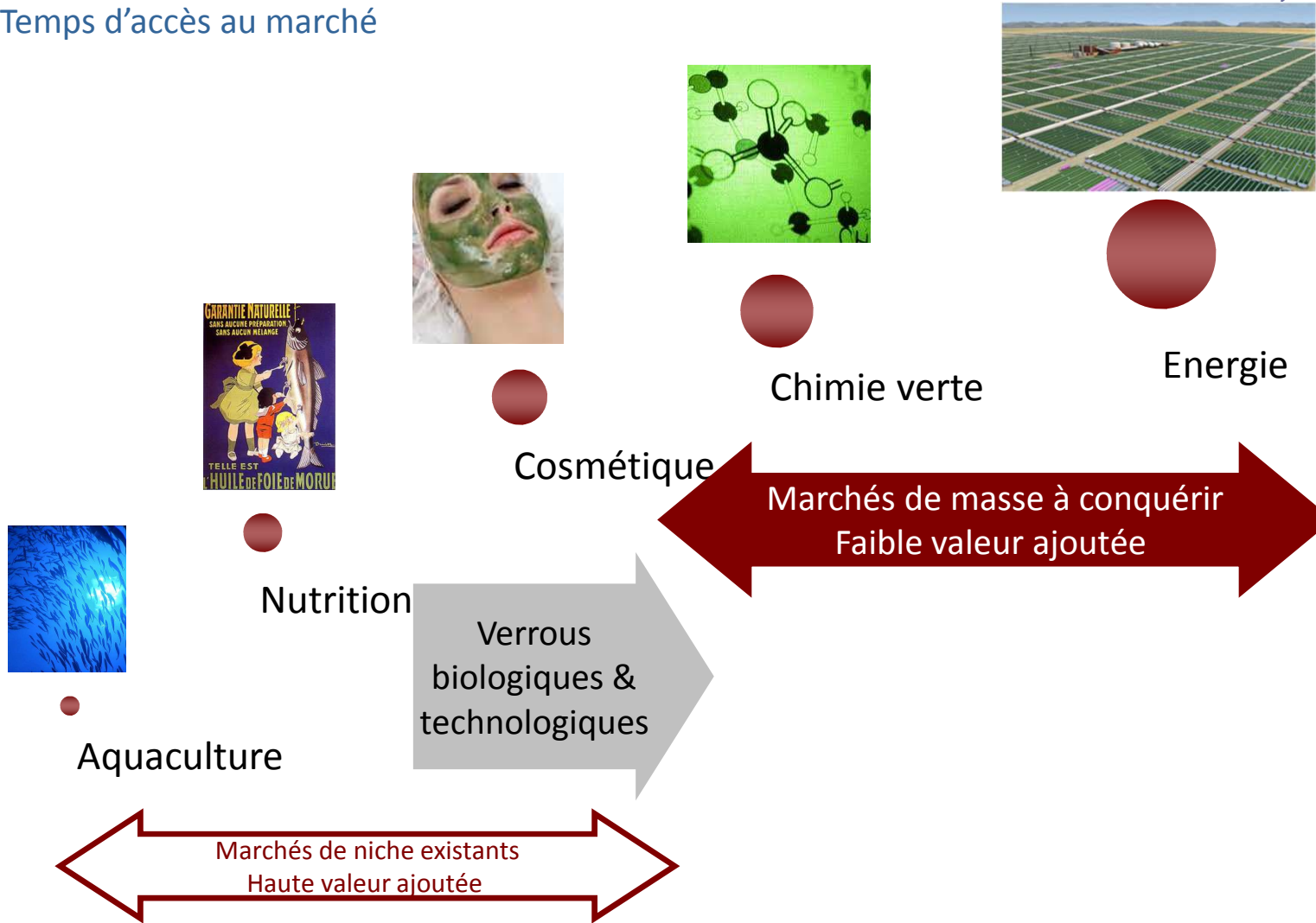


# FEUILLE DE ROUTE

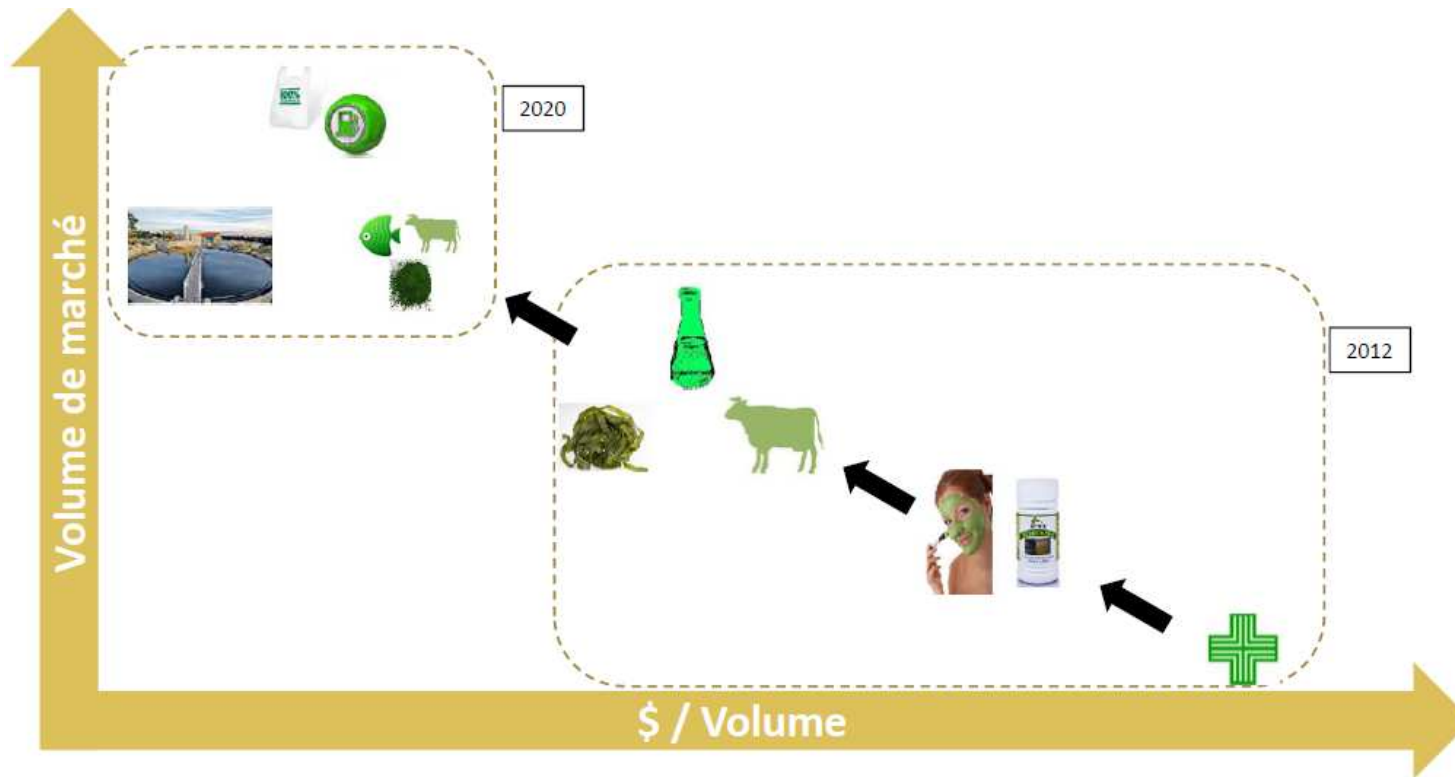
10 ans

20 ans ?

Temps d'accès au marché



Les marchés de petits volumes et à haute valeur ajoutée sont des étapes.  
Le marché des biocarburants constitue un « cap » long terme.



# DOMESTICATION DES ESPÈCES SAUVAGES



Téosinte



7,000 à 10,000 ans



Maïs



## 3 constats :

Difficulté à avoir des bilans d'énergie positifs

Prix faible de l'énergie (1€/L, /kg) dû à l'abondance de pétrole

Emergence d'une certaine conscience écologique : comment produire avec le moins d'impact possible sur l'environnement ?

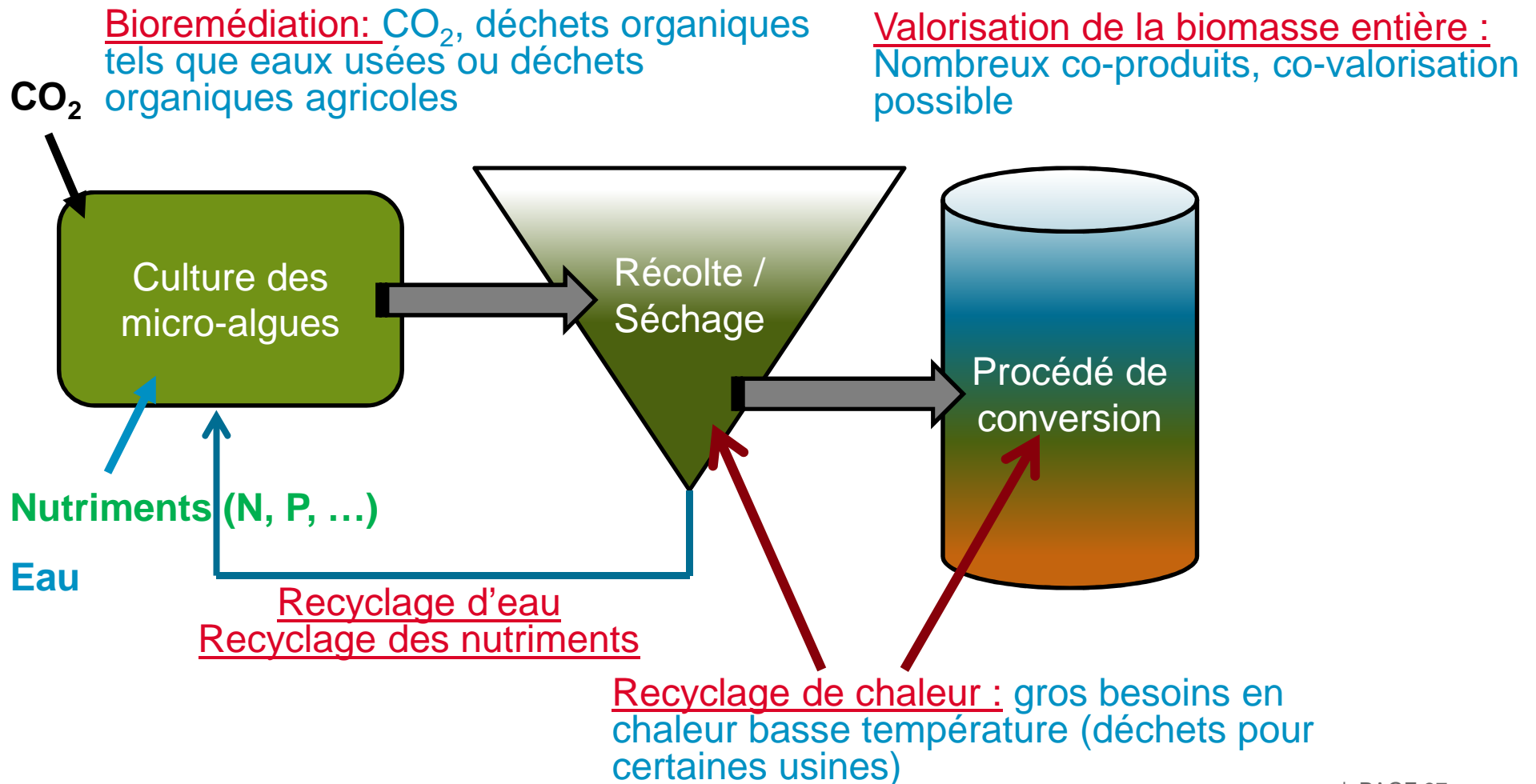
## Concept de bioraffinerie :

Optimisation de la biomasse : multiplier les co-produits

Optimiser les recyclages (eau, nutriments, chaleur)

Limiter les transports : tout sur le même site

## Application à la production industrielle de micro-algues



# cea Des micro-algues pour la production de biocarburants ?

- Les micro-algues ont un bon potentiel pour la production de biocarburants (productivité, non compétition avec l'alimentation...) avec des avantages intéressants : bioremédiation, co-produits, ...
- Rentabilité économique validée pour des productions à HVA
- Des progrès importants doivent être réalisés pour une production de biocarburants économiquement et énergétiquement viable
- Leur avenir dépendra de l'évolution de la demande sociétale, des progrès de la recherche et de l'évolution du prix du pétrole !
- Ne remplaceront jamais seules le pétrole