



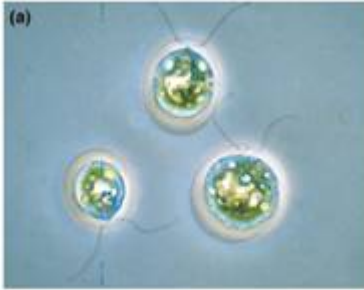
Paris, 9 novembre 2007

**Séminaire « La biomasse végétale
pour la production d'énergie »**

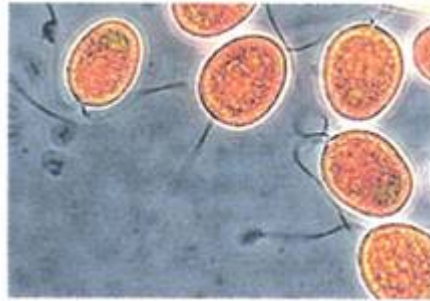
**Capture biologique du CO₂. Utilisation de
micro-organismes photosynthétiques**

Jack LEGRAND

Micro-organismes photosynthétiques



Haematococcus pluvialis
20 μm \times 15 μm



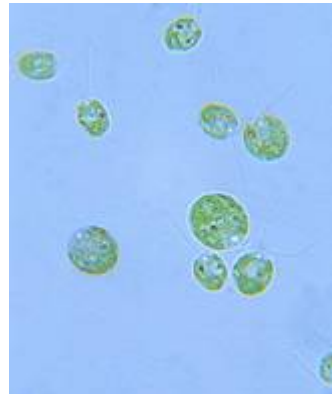
Dunaliella salina
10 μm \times 8 μm



Skeletonema costatum
10 μm



Arthrospira platensis (spiruline)
• D : 6-11 μm ; L : 200-500 μm



Chlamydomonas reinhardtii
7-10 μm



Haslea ostrearia
35-120 μm

Photobioréacteurs

Lumière forcément extérieure à la culture

+
Pigmentation des
microorganismes
photoautotrophes



Milieu hautement absorbant

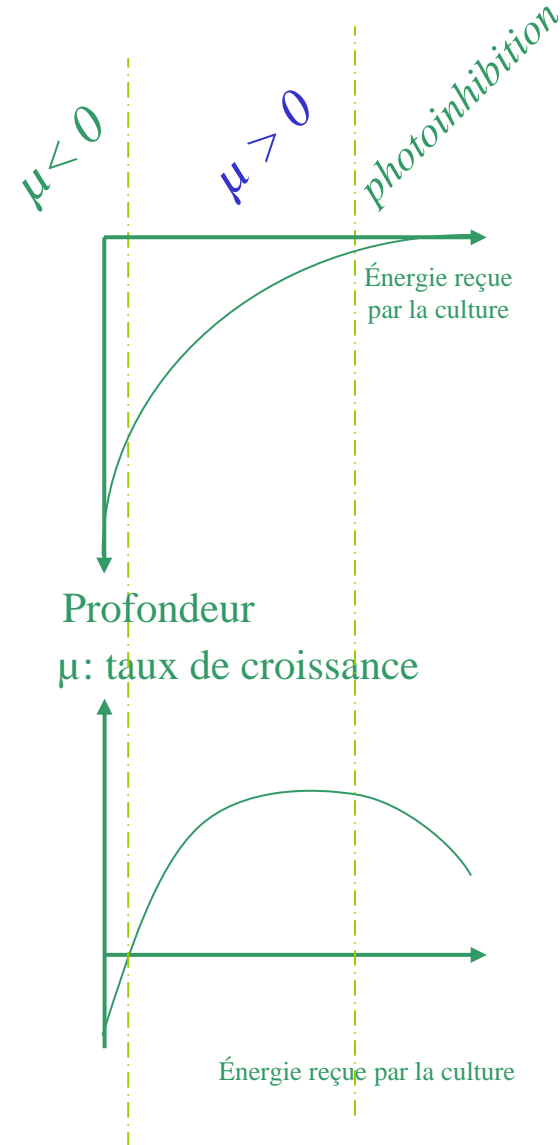
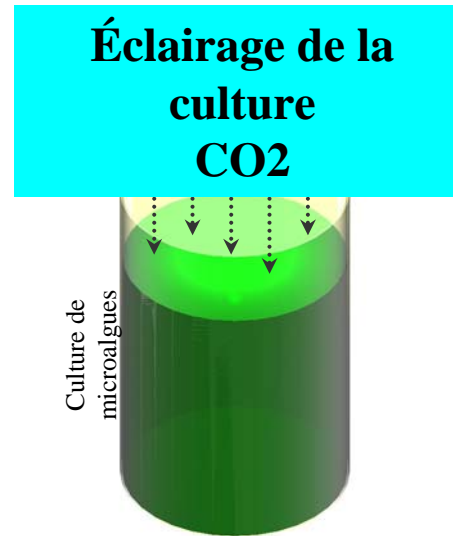


Lumière atténuée au passage de la culture
→ distribution hétérogène dans le procédé



Réponse biologique à la lumière complexe (très forte dépendance)
Besoins biologiques élevés en énergie lumineuse

La lumière apparaît comme le facteur limitant principal des photobioréacteurs



Photobioréacteurs solaires



Culture de Porphyridium purpureum (Espagne)



Culture en bassins ouverts d'Arthrospira platensis en Californie totalisant une superficie de 22 hectares : projet Earthrise Farms (Fox)



Culture en bassin ouvert de Odontella aurita à Bouin : société Innovalg (phot. Ifremer de O.Barbaroux)



Photobioréacteur solaire pour la culture d'Haematococcus p. à Hawaï

Bassins de production de β -carotène en Australie (société Betatene)



Comparaison des différentes technologies de photobioréacteurs

Actuel Solution Bioénergie ?

Paramètres	Systèmes		
	Systèmes ouverts	Systèmes solaires fermés	Systèmes artificiels fermés
Risque de contamination	très élevé	élevé sauf pour les espèces extrémophiles	très faible
Volume	de 0.1 à 10 ⁶ m ³	de 0.1 à 700 m ³	limité à 0.1 – 0.4 m ³ actuellement
Rapport S/V	de 1 à 8 mais nécessité de grands espaces	de 20 à 100	de 5 à 600
Evaporation	très élevée	nulle	nulle
Perte en CO ₂	élevée	faible	contrôlable à 0
Variabilité des espèces cultivées	restreinte à quelques espèces extrémophiles	la plupart des espèces extrémophiles	toutes les espèces
Flexibilité de la production	presque impossible	sans problème	totale
Reproductibilité des paramètres de production	fonction des conditions extérieures	possible avec certaines tolérances	parfaite
Contrôle du procédé	aucun : problèmes d'agitation, de température, de pH...	basique	rigoureusement contrôlé
Etalonnage	impossible	possible	possible
Stérilisation	impossible	impossible	éventuellement stérilisable
Eclairage	dépendance totale aux conditions climatiques	dépendance totale aux conditions climatiques	possibilité d'éclairage en continu mais la source lumineuse est gourmande en énergie
Transfert gaz-liquide	limité	très limité	bon
Concentration en biomasse	0.1 à 0.2 g L ⁻¹	2 à 8 g L ⁻¹	jusqu'à 10 g L ⁻¹

Impossible d'utiliser des souches dédiées

Conditions non optimisées

Faible productivité, coût de récolte

Photobioréacteurs solaires fermés

Systèmes tubulaires, cylindriques, systèmes plans (agitation par « airlift »)



• Technologie encore peu développée : peu d'exemples, peu de recul en comparaison des systèmes ouverts

• Besoin de franchir encore un palier en performances pour être rentable : maîtrise de la production (contrôle des conditions de culture à grande échelle, stabilité des cultures), exploitation du flux solaire, consommation énergétique, gestion des intrants-sortants

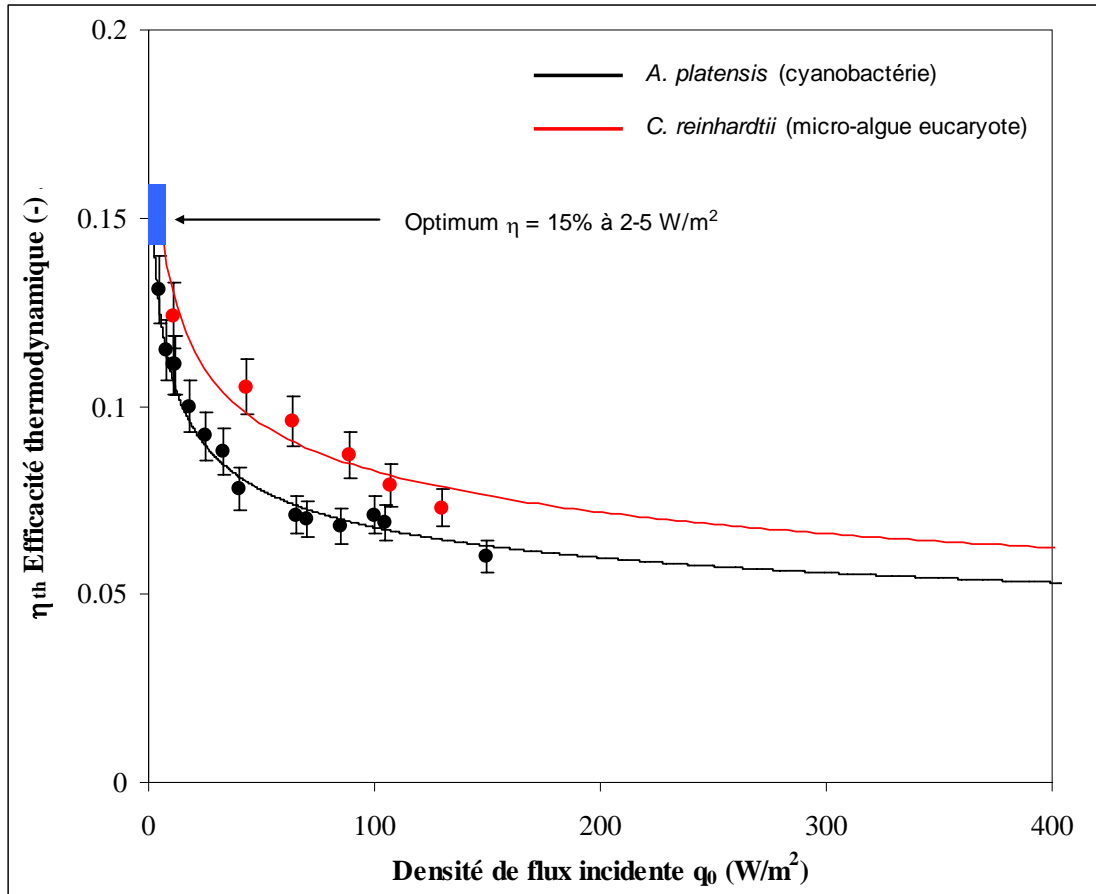


Marge importante pour l'intensification (non permise par le système ouvert)

Principales limitations

- Installation plus onéreuse et délicate à mettre en œuvre : rupture nette en terme de performances nécessaire
- Limitation par rapport aux transferts de gaz (tubes)
- Problèmes de régulation à grande échelle (pH, température)

Optimisation des productivités en surface de captation



Journée ensoleillée,
moyenne en captation
directe :

$$\langle q_0 \rangle = 90-100 W/m^2$$
$$\eta = 7-8\%$$

Productivités environ 10
fois supérieures aux
plantes supérieures en
plein champ

La productivité ramenée à la surface de captation ne dépend que de l'efficacité thermodynamique du processus photocatalytique. La conception d'un PBR à éclairage direct n'influe pas sur ses performances en surface.

Optimisation des productivités en volume

En limitation physique par la lumière (absorber tous les photons) :

$$\text{Productivité : } r = f \cdot a \cdot n(1 + q_0/K)$$

Surface spécifique éclairée
(m^2/m_{TOT}^3)

Le rendement quantique diminue
avec q_0

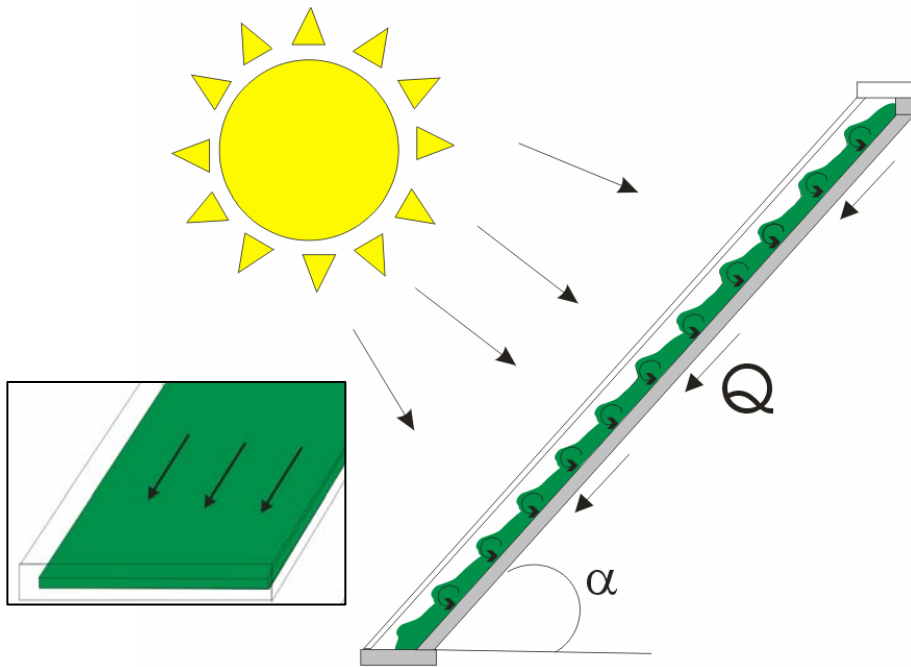
- Augmenter a revient à diminuer la dimension caractéristique sur laquelle on absorbe les photons en limitation physique (*couche mince*) donc à augmenter la concentration en biomasse (*catalyseur*).

- Augmenter q_0 (*par concentration*), ce qui augmentera bien la productivité en volume, mais fera diminuer la productivité en surface (*baisse efficacité thermo.*) – Optimisation globale

Photobioréacteur à « couche mince »

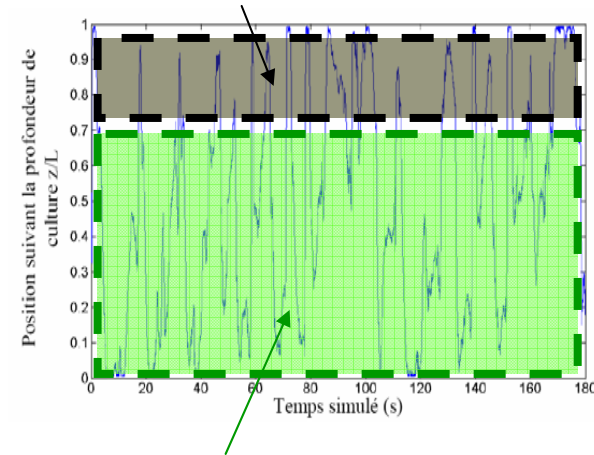
Possibilités de conception

- Système type « panneau solaire » (compromis coût-performance)
- Réalisation d'une épaisseur faible de culture (cm voire moins)
- Culture sous flux incident élevé (éclairage direct)



Film tombant sur plan incliné

Zone sombre (μ négatif ou nul)

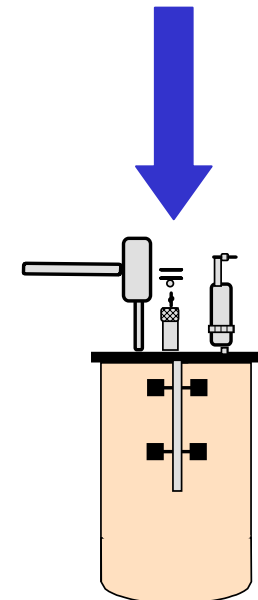
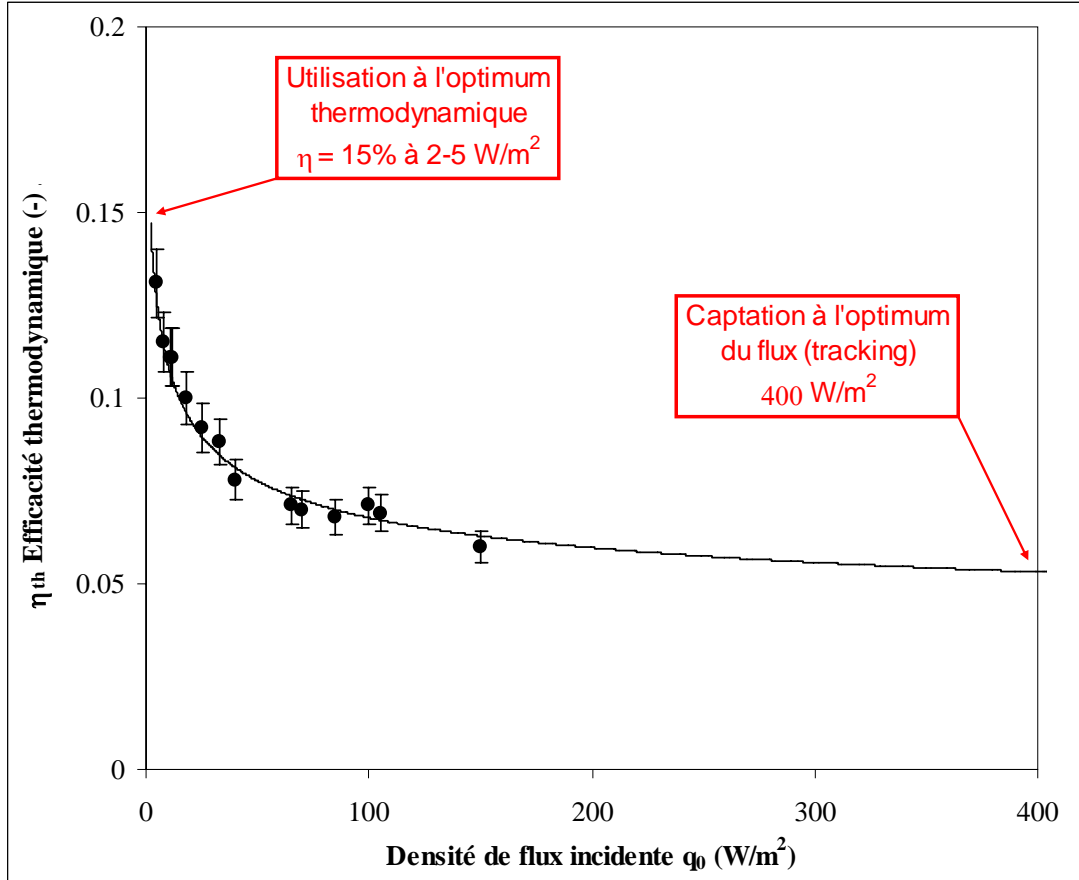


Zone éclairée (μ positif)

Déplacement des cellules suivant le gradient de lumière génère un régime fluctuant vu par chaque cellule

Couplage hydrodynamique – conversion photosynthétique

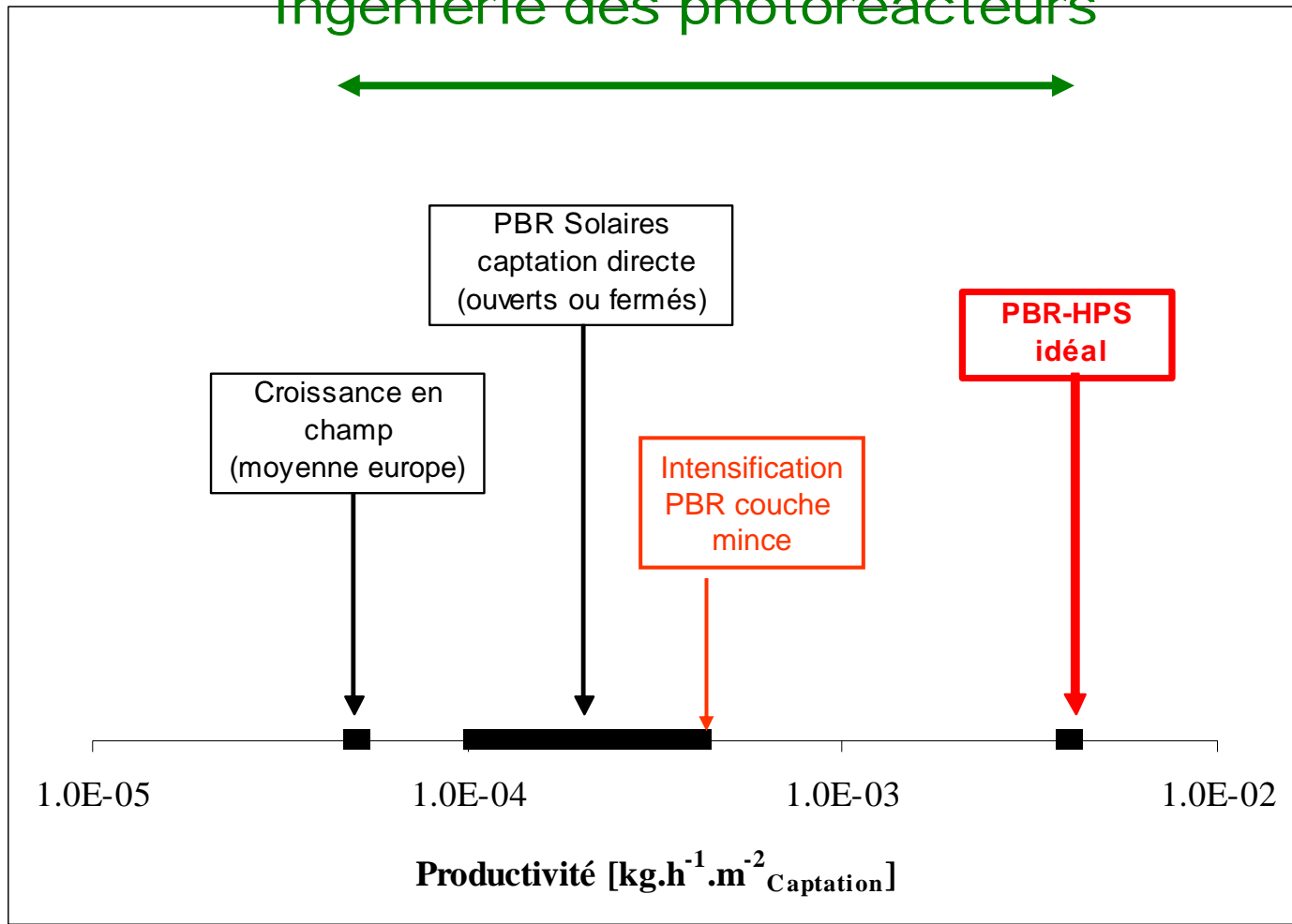
Concept PBR-HP idéal



L'optimisation de la productivité en surface est rendue possible par une captation au flux maximum (tracking) et une dilution en volume à l'optimum thermodynamique (à faible flux) au moyen de fibres optiques

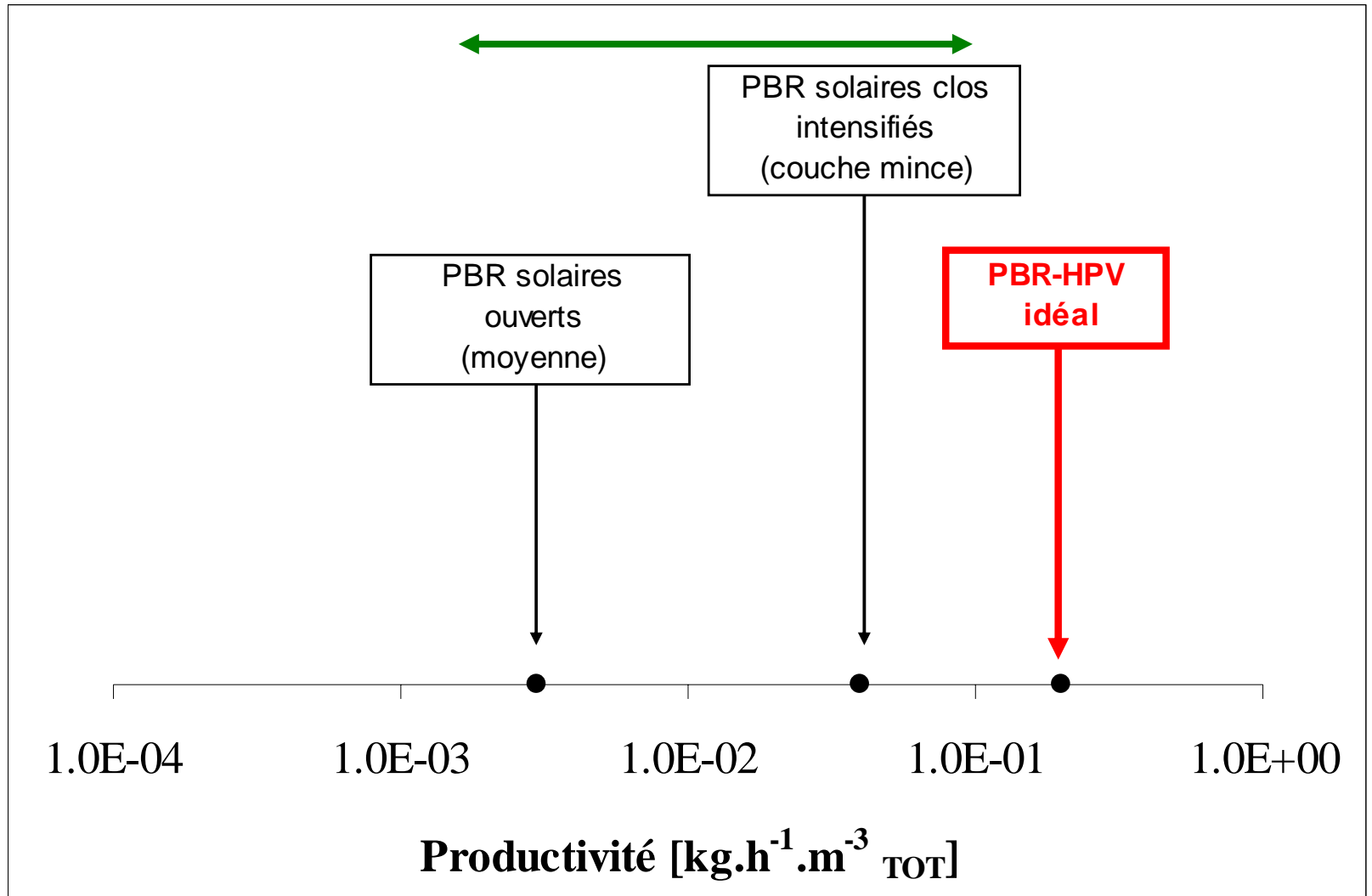
Productivités en surface de captation

Ingénierie des photoréacteurs



Productivités en volume

Ingénierie des photoréacteurs



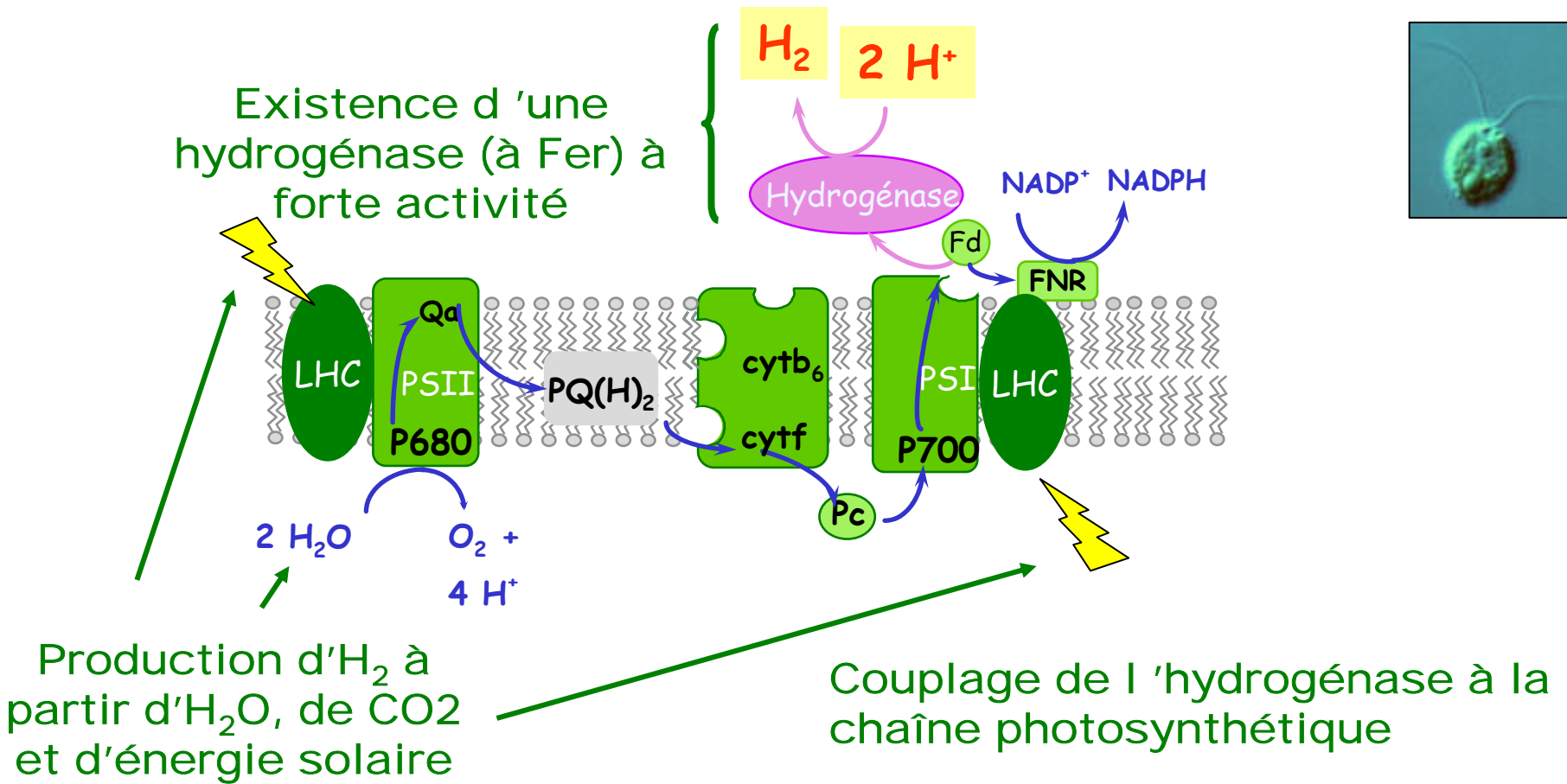
Cas concret

Calcul des surfaces et volumes nécessaires pour la séquestration d'une tonne par jour de CO₂

Type de Système	Flux incident q_0 (W/m ²)	Volume V (m ³)	Surface captation S (ha)	Biomasse maximale atteinte (kg/m ³)
Végétaux supérieurs - Plein champ (moyenne Europe)	100	Non significatif	37	Non significatif
PBR actuels extensifs et solaires (données de la littérature)	100	2500	2,5	0,1 à 0,5
PBR intensifié en couche mince	100	250	2,5	2
	400 (après concentration)	140	5 pour le captage, concentré sur 1,3 de culture	5
PBR avec distribution interne de la lumière (limite thermodynamique, réacteur idéal)	Captation à 400 et utilisation à 4	80	0,2	15

Production d'hydrogène par voie biologique

Microalgue : Chlamydomonas reinhardtii



Production d'hydrogène par voie biologique

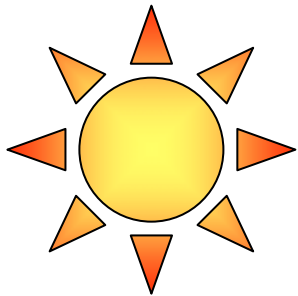
Avantage : Méthodes basées sur la photosynthèse



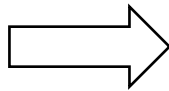
lumière solaire + eau + CO₂ → H₂
Production propre, sans agent stresseur

Inconvénient : Mécanismes physiologiques complexes (production actuellement limitée)

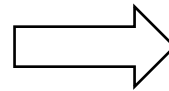
QUE PEUT-ON ESPERER ?



Énergie lumineuse
(Spectre visible)



Rendement de la
photosynthèse + réactions
de conversion
(4 photons par H₂ produit)



Rendement théorique de la
bioconversion lumière => H₂

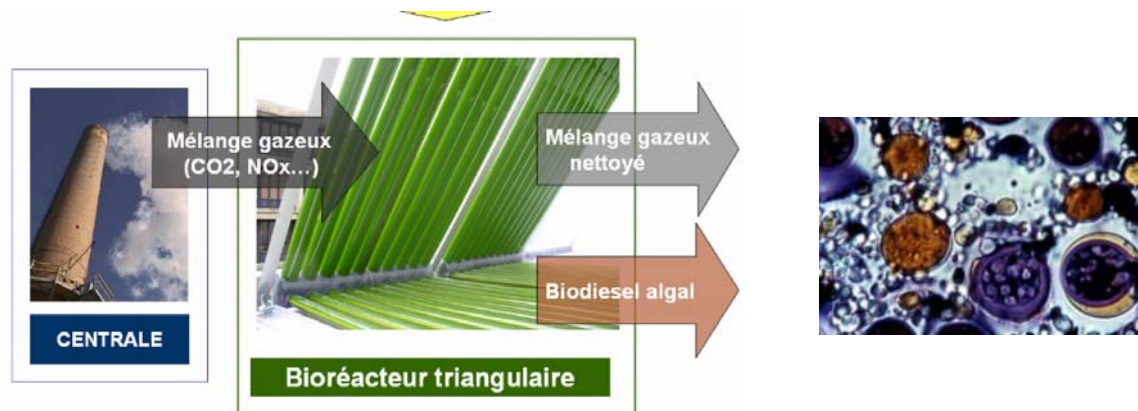
10%

énergie de combustion de
l'H₂/
énergie solaire incidente

A l'échelle mondiale, l'énergie solaire incidente sur la planète représente environ 10000 fois l'énergie utilisée (pour un pays comme la France, le ratio est de l'ordre de 1000 fois).

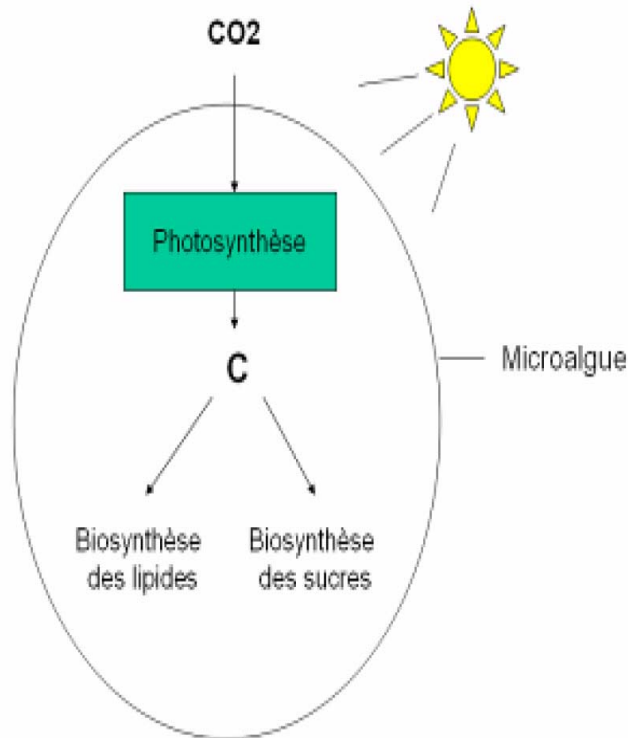
A un rendement de 10%, il « suffirait » donc de couvrir 1% du territoire national pour assurer nos besoins énergétiques à leur niveau actuel.

Production d'acides gras



- Certaines espèces peuvent contenir 60-80% de leur masse en acides gras
- Essentiellement sous forme de triglycérides
- Accumulation transitoire
- Remarque: *Botryococcus braunii* peut produire des hydrocarbures

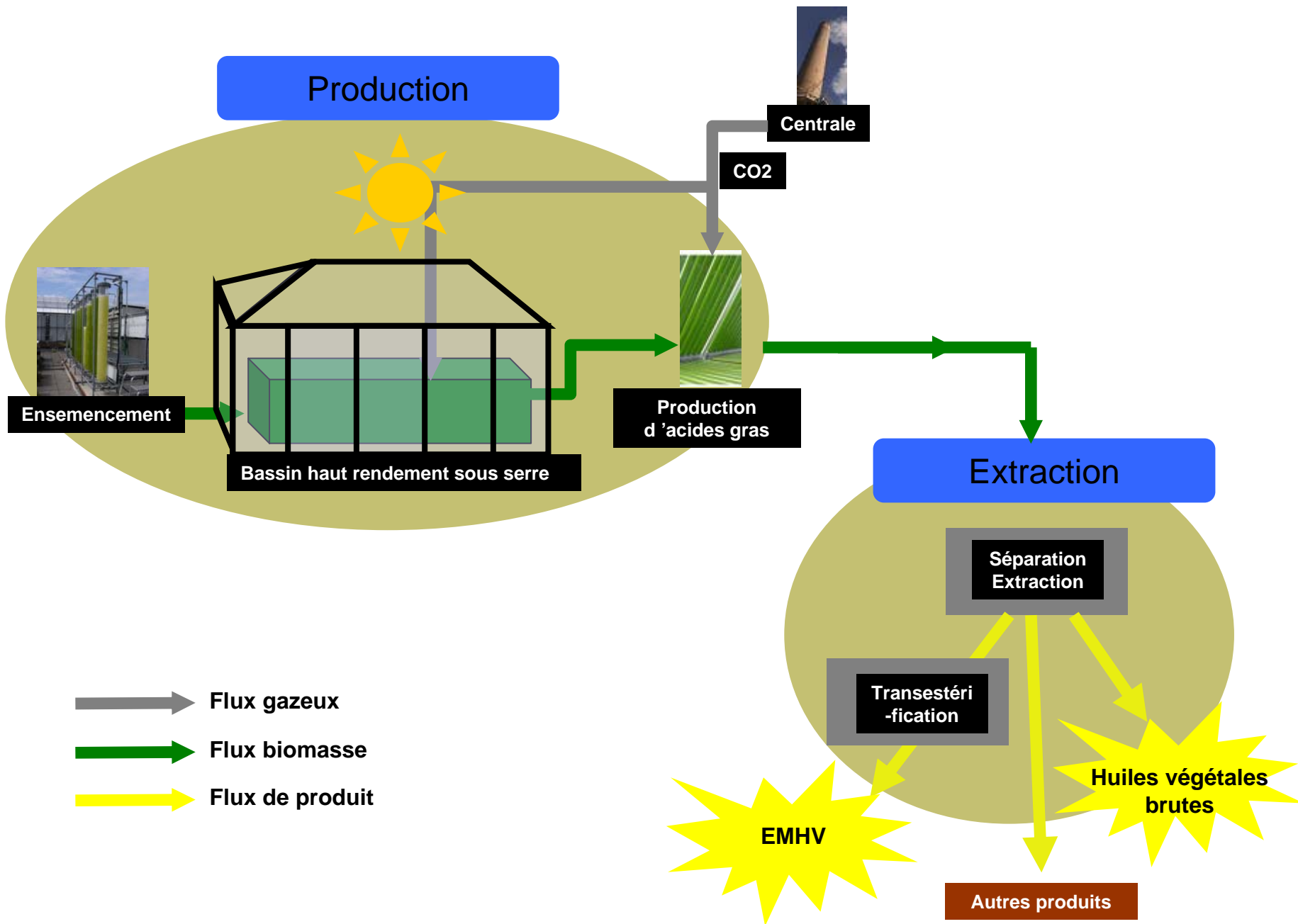
Production d'acides gras



Biosynthèse des lipides et des sucres par les microalgues

Bioproduction stimulée par:

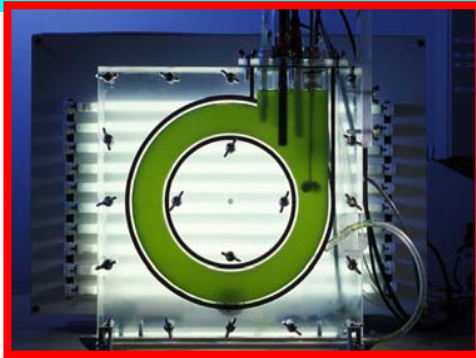
- Carence en azote ou en silice
- Exposition à une lumière forte
- Augmentation du CO2 dissous
- Choc thermique



Production d'hydrogène par des microalgues

O Verrous majeurs :

- Mécanismes physiologiques complexes : voies métaboliques de « secours » non optimisées (1 de la photosynthèse)
- Sensibilité de l'hydrogénase à l'oxygène : processus de production transitoire (incompatible avec la croissance oxygénique par photosynthèse), besoin de photobioréacteurs clos



Productivité actuelle limitée

Production de lipides par des microalgues

O Verrous majeurs :

- Identification des souches à fort potentiel
- Choix du forçage physiologique pour production de lipides spécifiques (chaîne courte)
- Extraction-purification des lipides
- Production intensive et photobioréacteurs dédiés de production de masse

Maîtrise procédé-production