

Les microalgues, sources des biocarburants du futur ?

Gilles Peltier

Institut de Biosciences et Biotechnologie Aix-Marseille

CEA Cadarache



CEA Commissariat à l'Energie Atomique
et aux Energies Alternatives



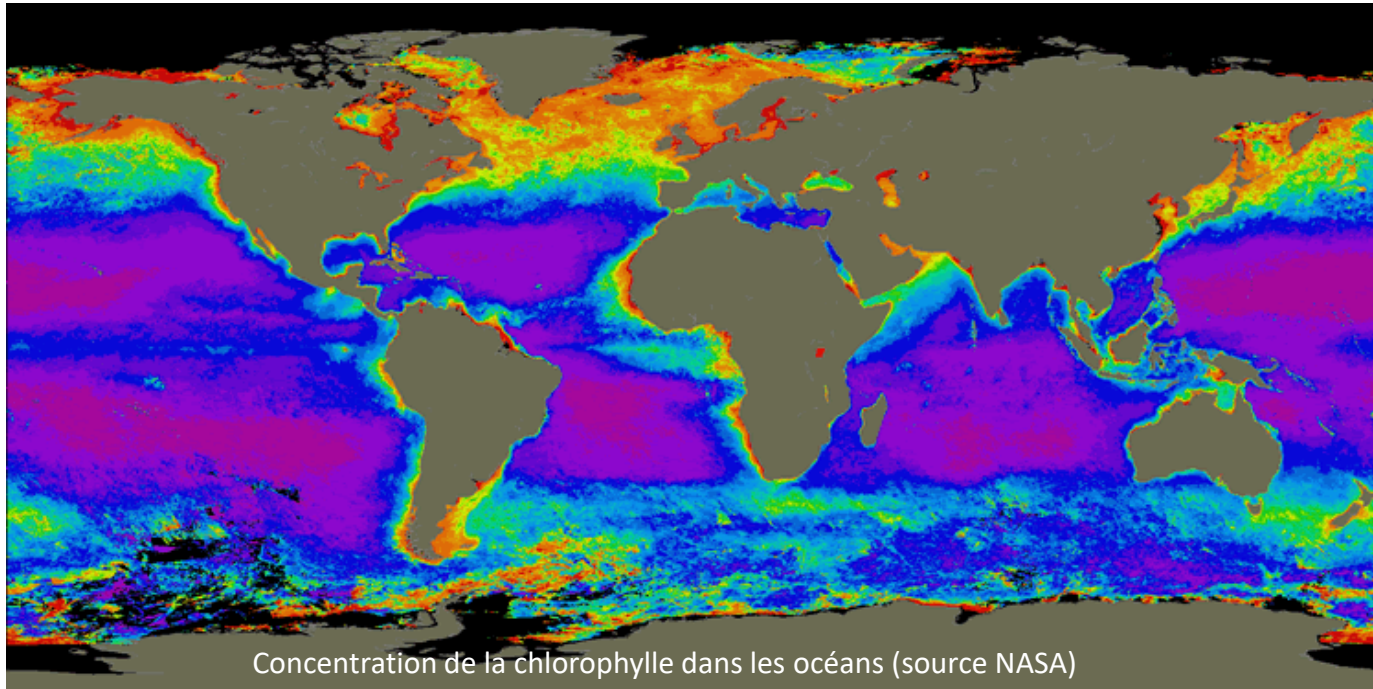
CNRS Centre National de la Recherche
Scientifique



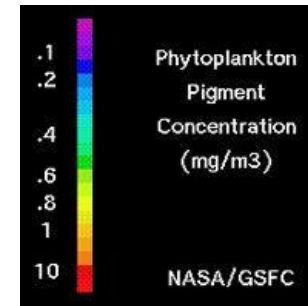
Aix-Marseille Université



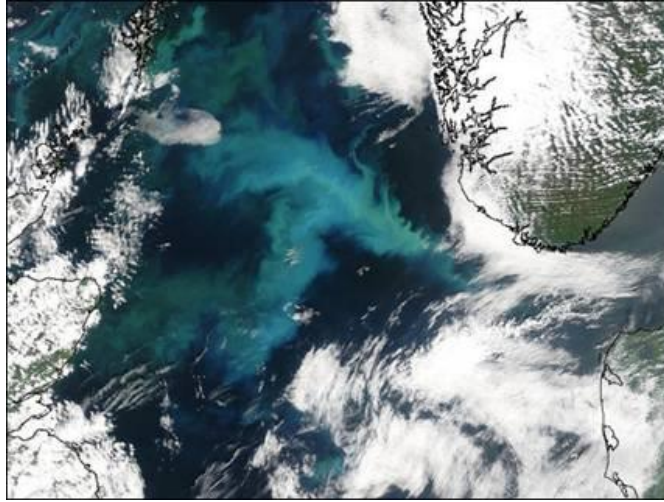
Les microalgues fixent 50% du CO₂ entrant chaque année dans les écosystèmes



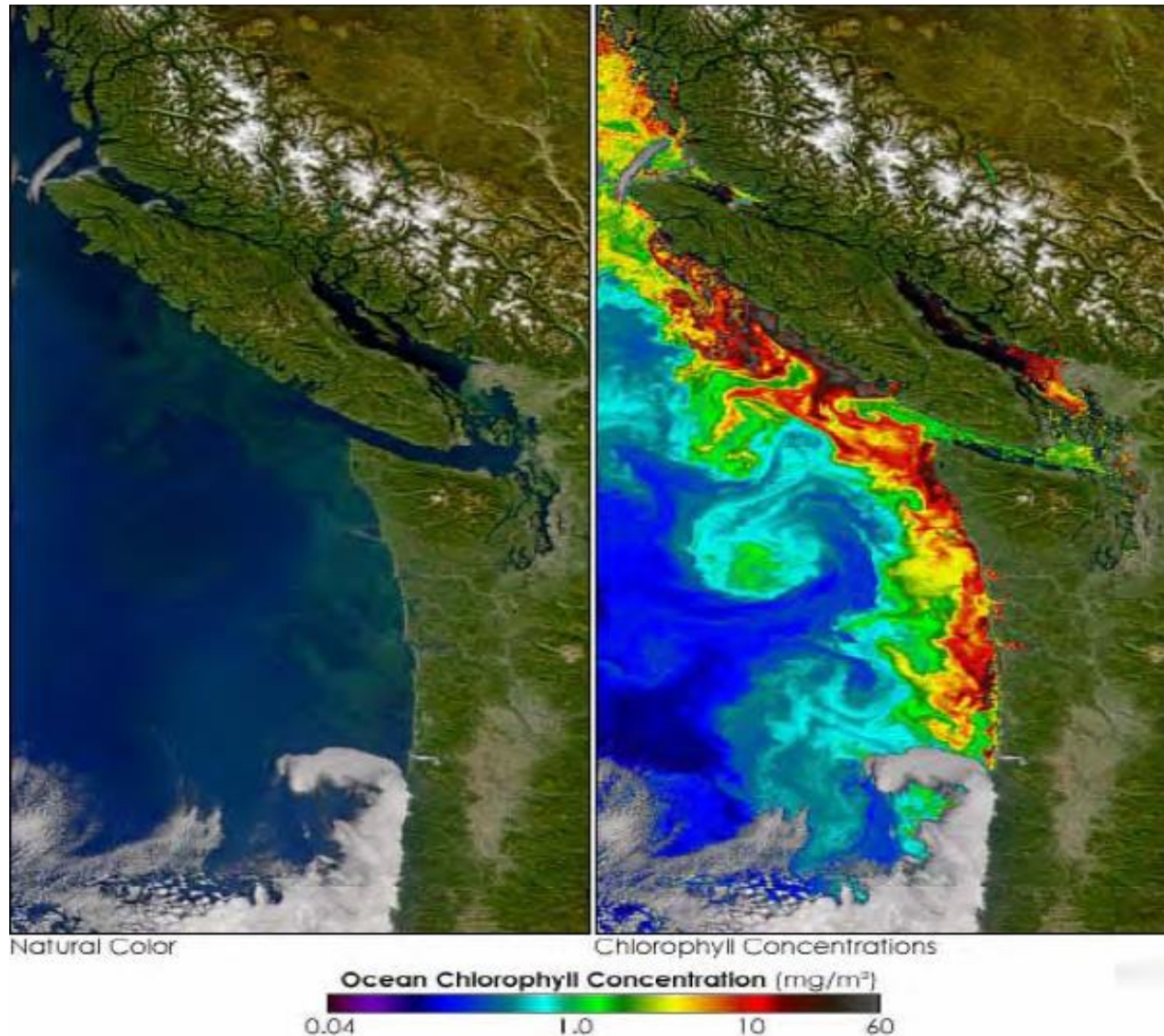
30 000 espèces de microalgues
identifiées, plus d'un million estimé



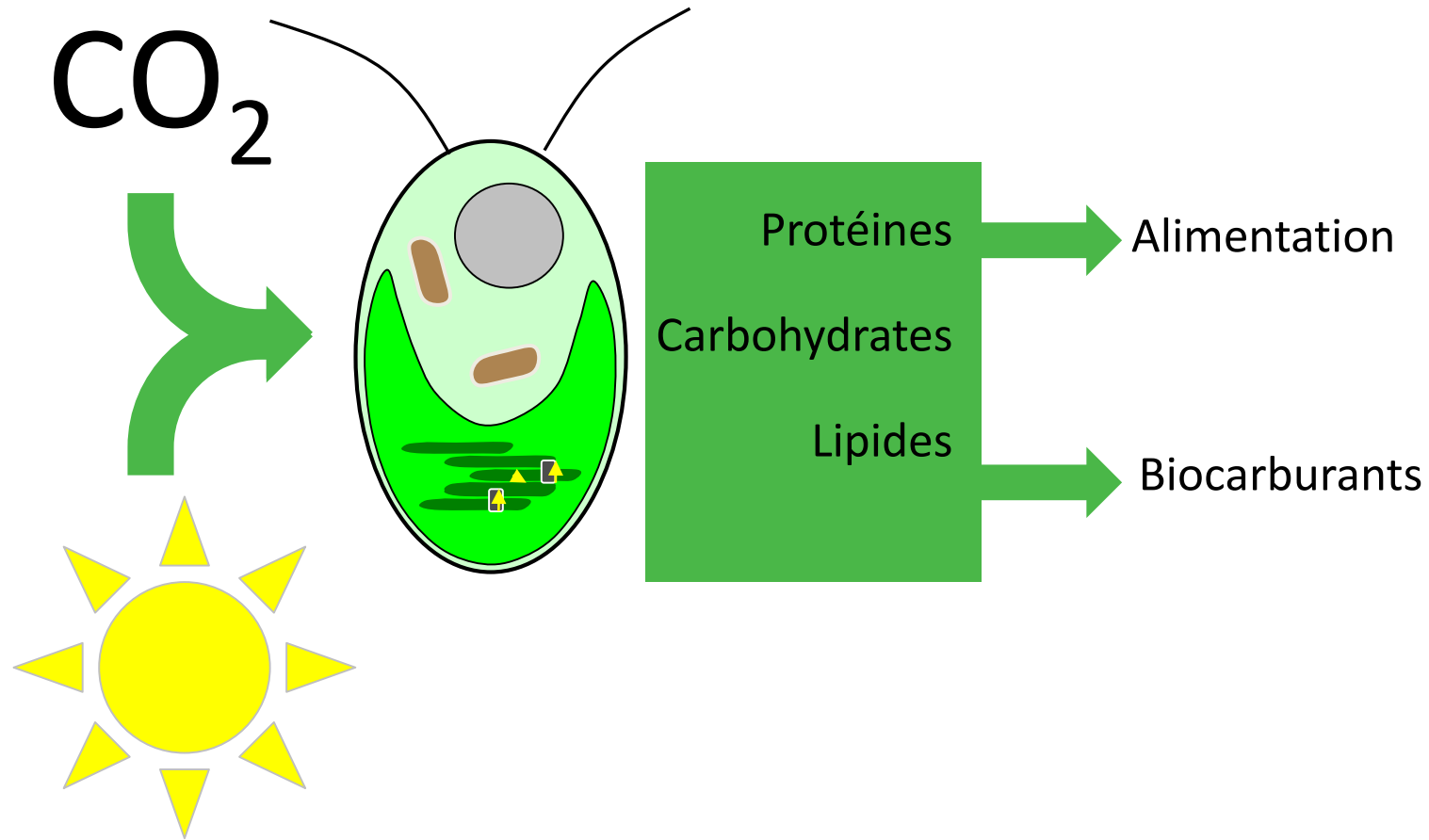
Présentes dans tous types d'environnements (aquatiques et terrestres)



« Bloom » algal, côte ouest des USA 2004



Les microalgues convertissent l'énergie solaire et le CO₂ en composés chimiques



Des composés d'intérêt pour notre alimentation

- Riche en protéine, facile à cultiver, la spiruline était cultivée par les Aztèques au XVIème siècle
- Aujourd'hui utilisée pour lutter contre la malnutrition (FAO)

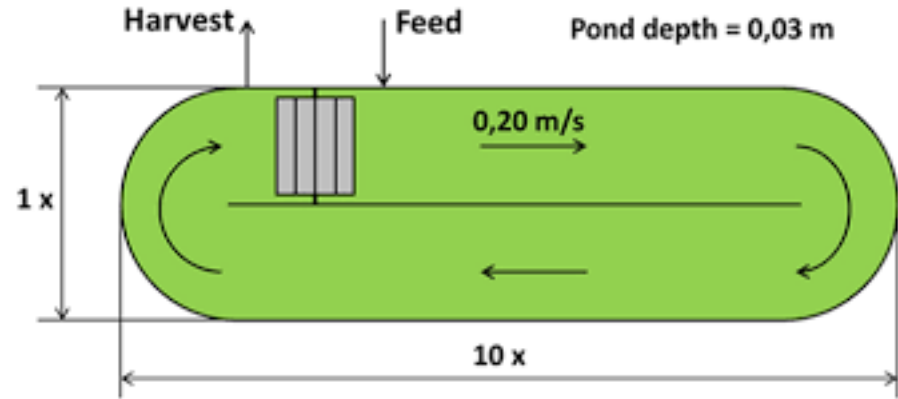


Récolte de Spiruline ("dihé") sur les rives du lac Tchad

Cultures en milieu ouvert... « raceways »



Parry Nutraceuticals, Inde (culture de Spiruline)



Qualitas Health, Inc., Texas, culture de microalgues pour la production d'omega 3



Earthrise Algae Farm, Calipatria, California, USA

Cultures en milieu fermé... photobioréacteurs



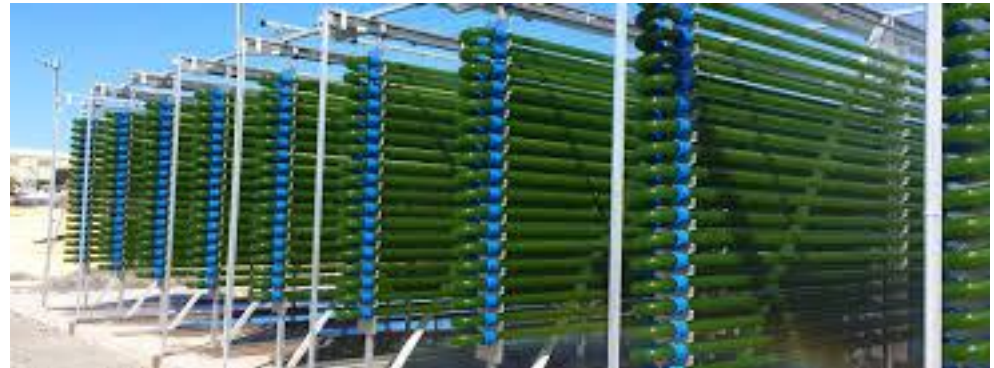
IGV, Allemagne, culture de Chlorelles



Algatech, désert du Negev, Israël; Photobioréacteur tubulaire pour la production d'astaxanthine: culture d'*Haemococcus pluvialis*

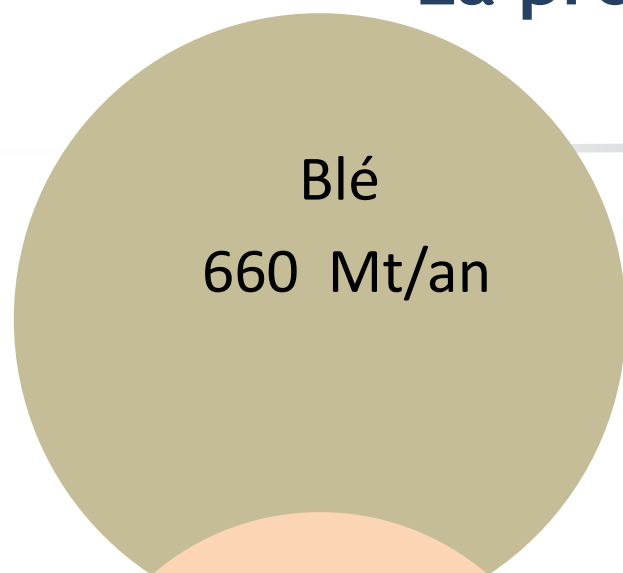


Algenol, California, USA

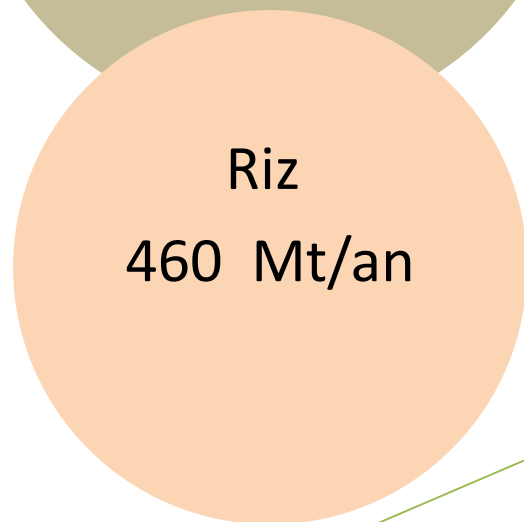


Varicon Aqua, Algal Photobioreactor, UK

La production de microalgues reste très marginale au niveau mondial

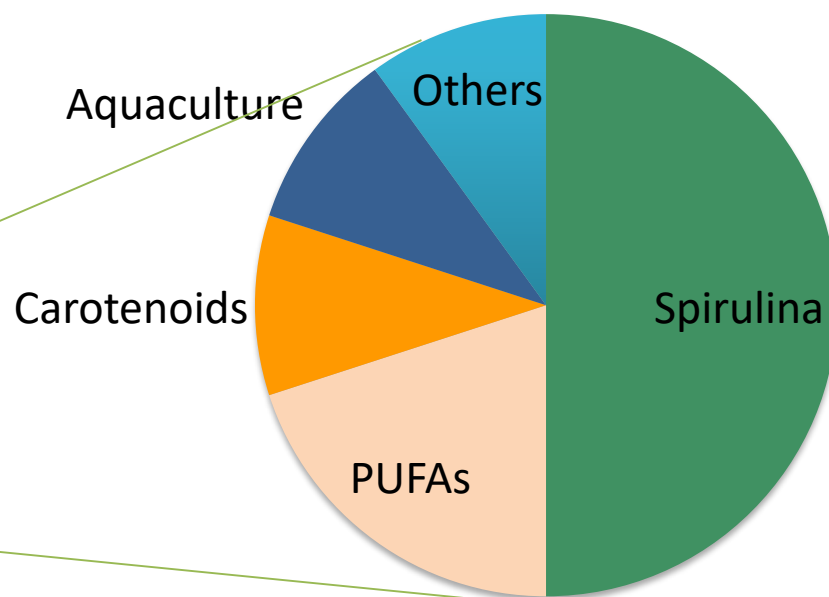


Blé
660 Mt/an



Riz
460 Mt/an

Microalgues
0.015 Mt/an



Des composés d'intérêt pour l'alimentation

■ Les bienfaits de consommer des acides gras poly-insaturés (poisson, l'huile de foie de morue)

■ Les poissons se nourrissent de microalgues

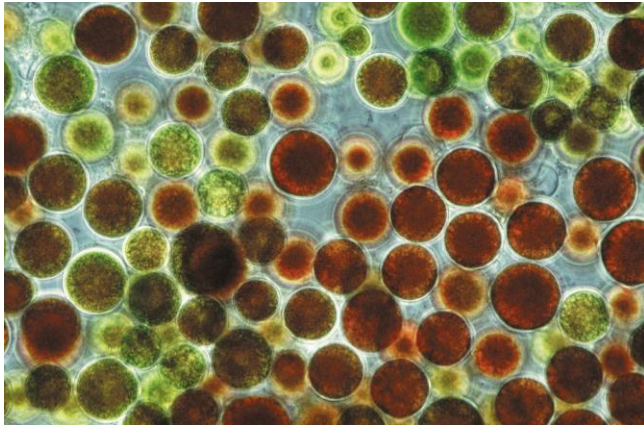


Les huiles de poisson sont riches en acides gras poly-insaturés



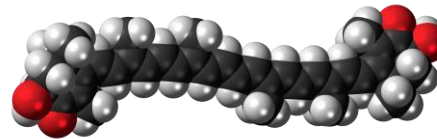
■ Les microalgues trouvées dans la biodiversité marine produisent des acides gras poly-insaturés (DHA, EPA)

Des composés d'intérêt pour l'alimentation



Haemotococcus pluvialis, une microalgue cultivée pour la production d'astaxanthine

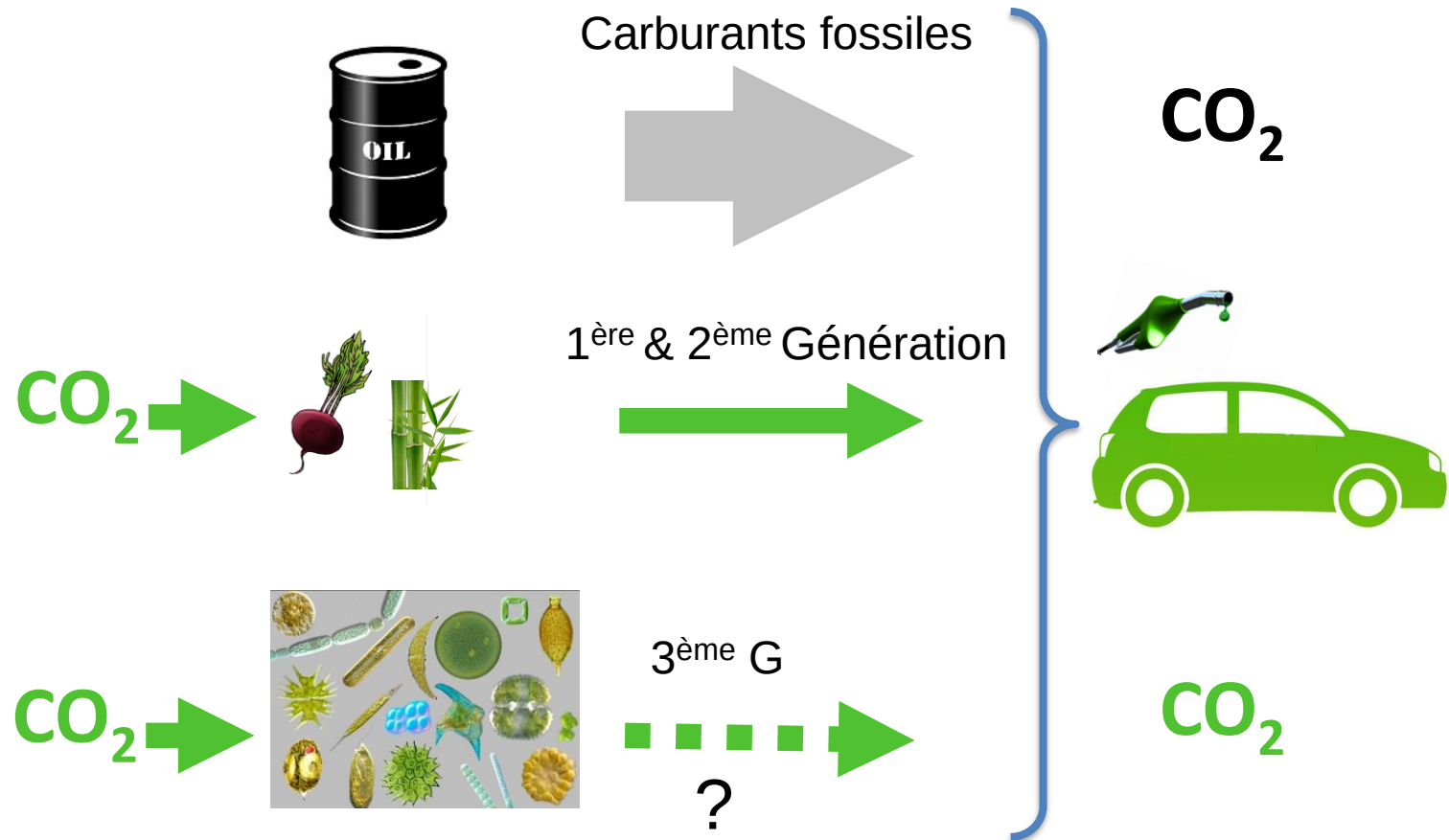
■ Certaines microalgues sont riches en caroténoïdes : astaxanthine, β -carotène, zéaxanthine, fucoxanthine...



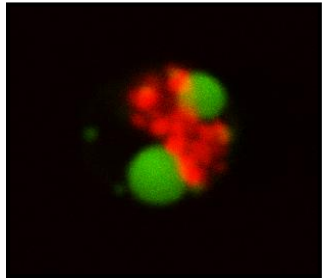
■ L'astaxanthine est utilisée en aquaculture (coloration de la chair des saumon) et dans l'industrie alimentaire

■ Les caroténoïdes ont des propriétés anti-oxydantes : action bénéfique sur la santé (marché des compléments alimentaires)

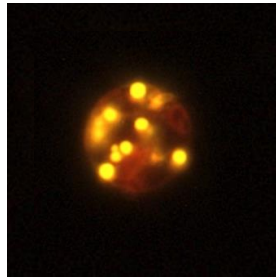
Les biocarburants sont produits par la photosynthèse



Potentiel pour la production de biodiesel et verrous



Neochloris oleoabundans



Chlamydomonas reinhardtii



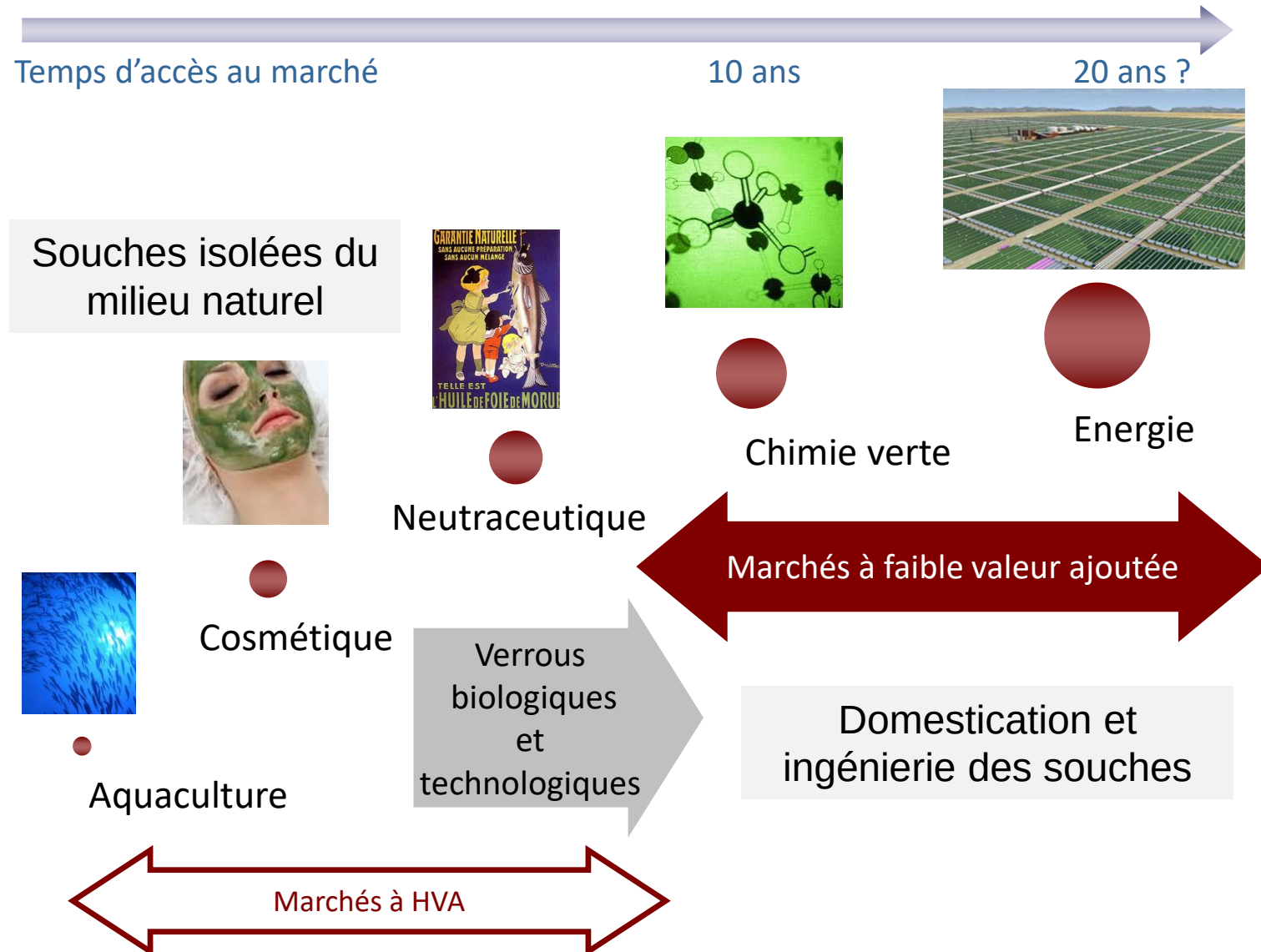
Certaines microalgues accumulent jusqu'à 60% d'huile

	Microalgues	Plantes C4	Plantes C3
Productivité maximale (T.ha⁻¹.an⁻¹) Rendement photosynthétique	150-180 ~6 - 7.5 %	60 ~2.5 %	30 ~1.25 %
Productivité observée (T.ha⁻¹.an⁻¹) Photobioréacteurs Champ	50-70	10-30	10-15
Productivité en lipides potentielle (T. ha⁻¹.an⁻¹)	75-90		
Productivité en lipides observée (T. ha⁻¹.an⁻¹)	15-20	3	1.5
Coûts de production (\$.kg⁻¹)	0.4 - 40	0.04	0.04

**Verrous
Biologiques**

**Verrous
Technologiques**

Des marchés de niche aux marchés de masse



Domestication des espèces sauvages



Téosinte



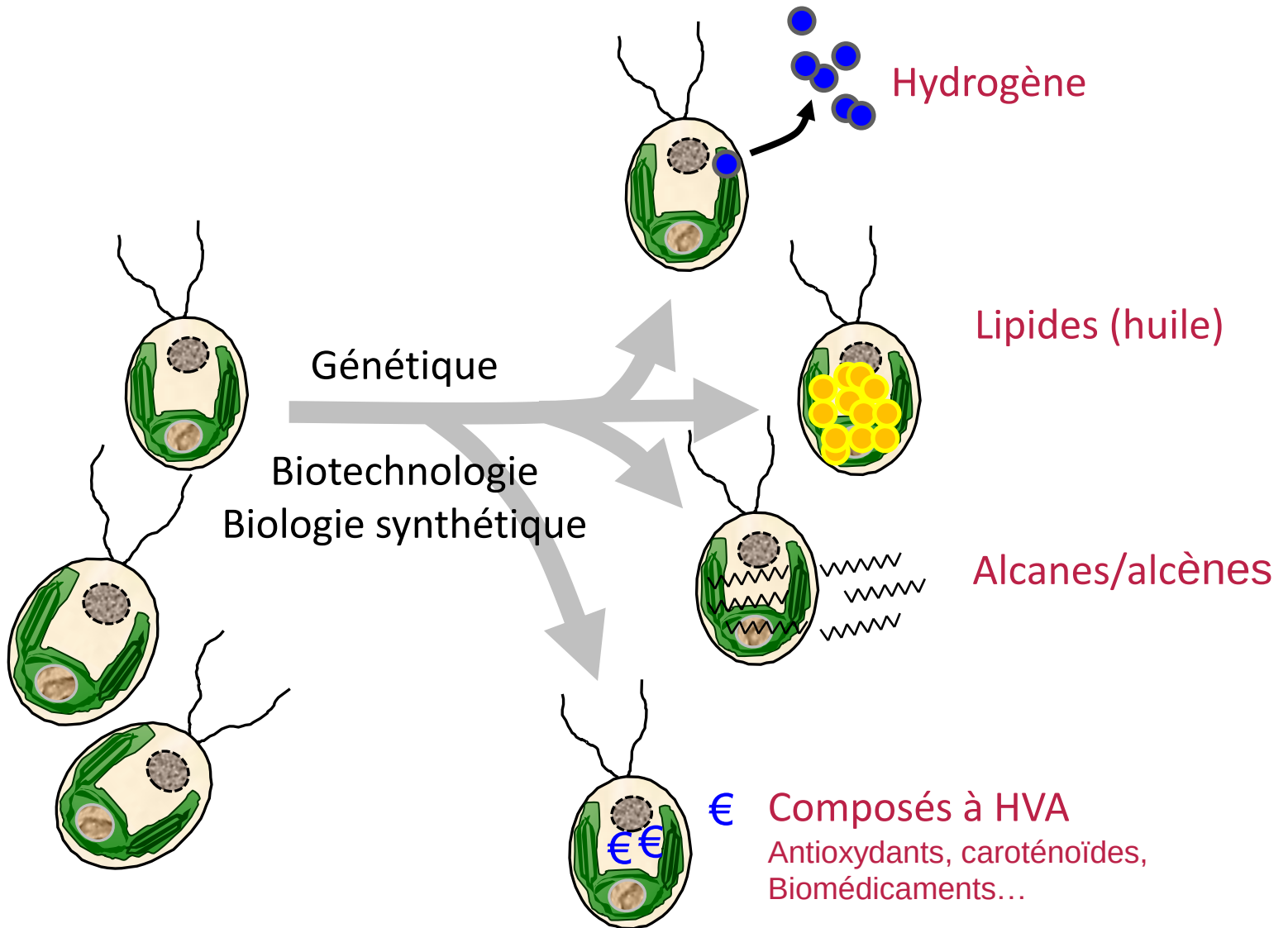
7 000 à 10 000 ans



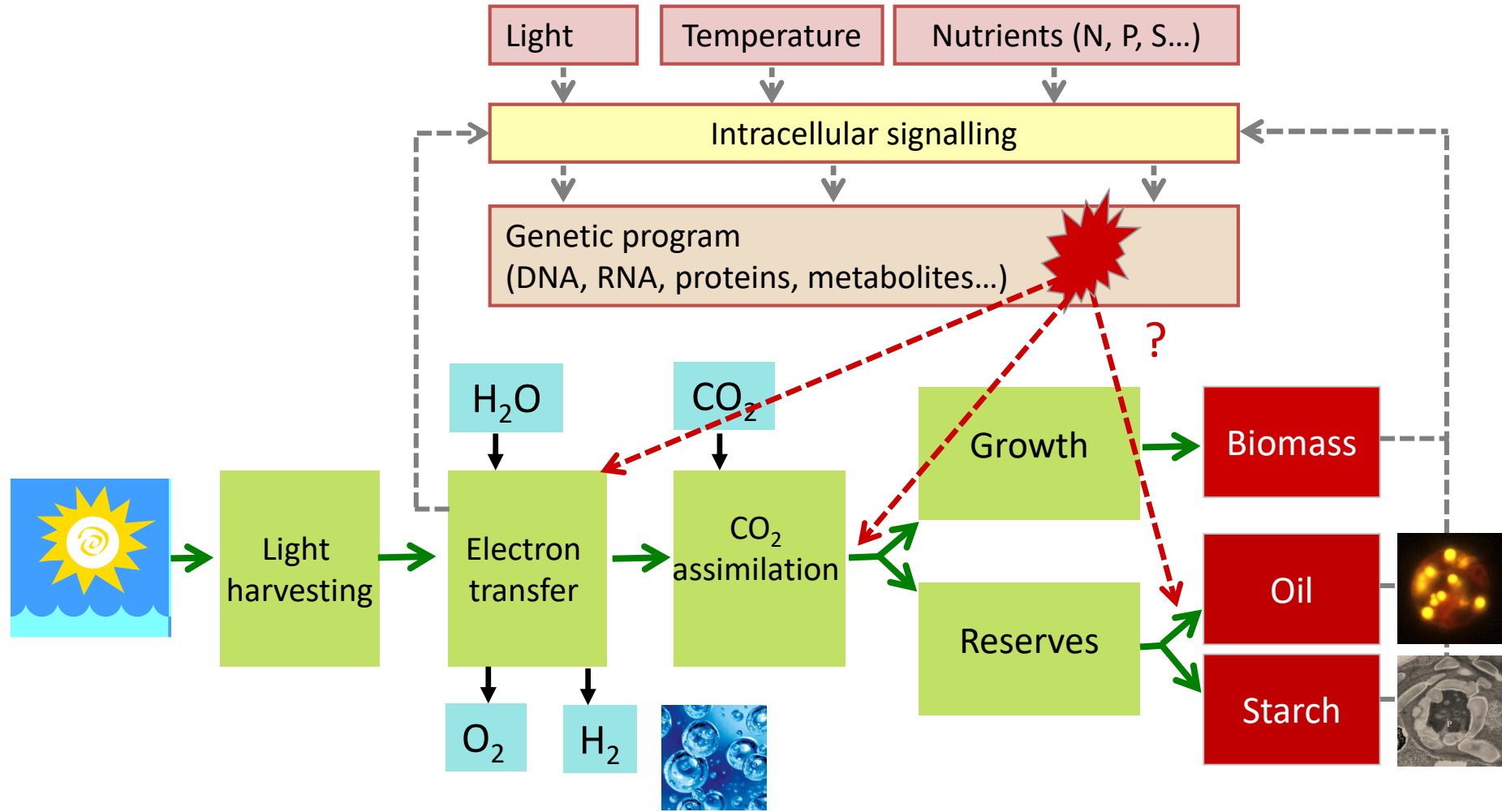
Maïs



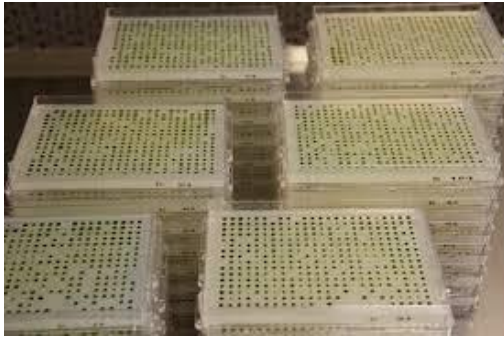
Domestication des algues pour la production de composés riches en énergie ou à HVA



Contrôle génétique de conversion et stockage d'énergie



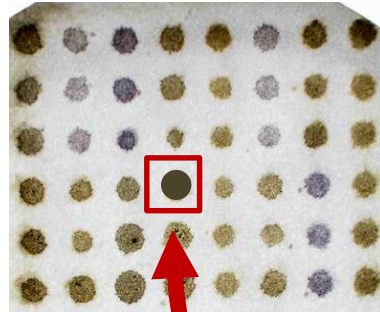
Isolement de mutants hyper-accumulateurs d'amidon



15 000 mutants criblés

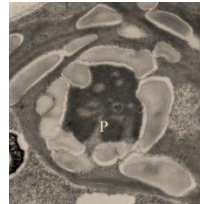


Cultures haute densité



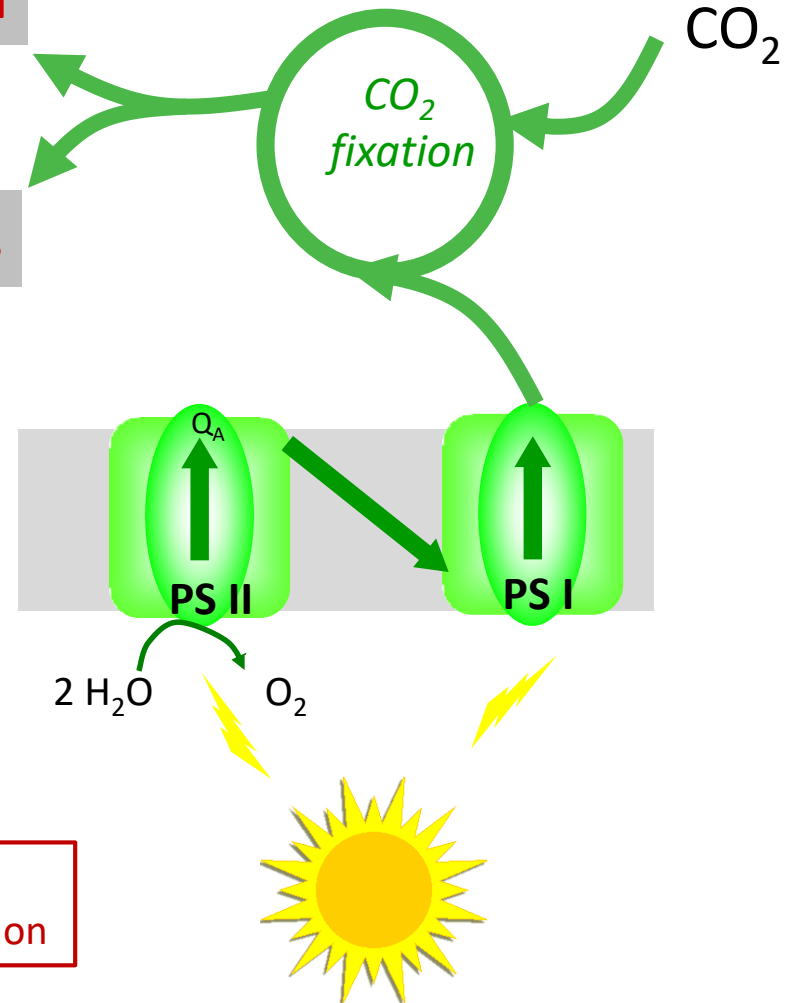
Coloration de l'amidon

Mutant hyper-accumulateur d'amidon



Starch

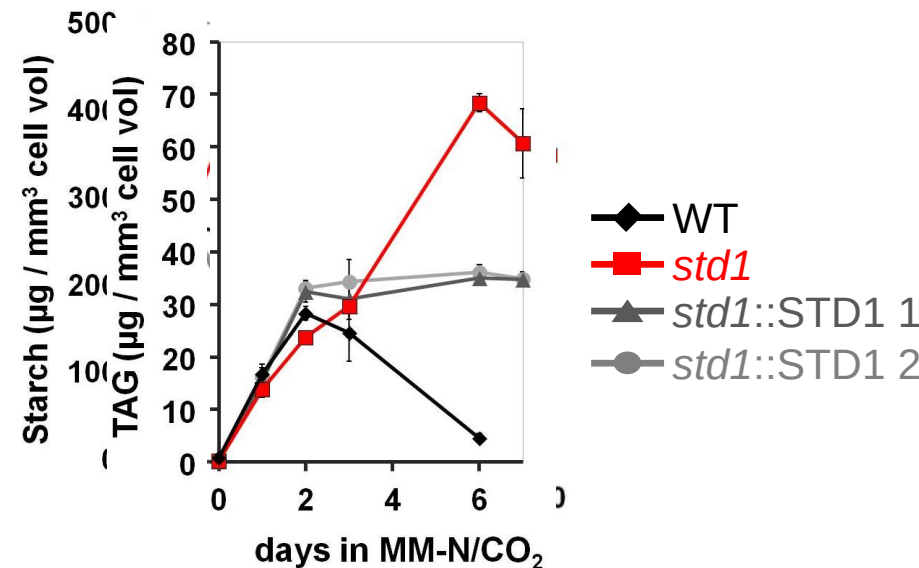
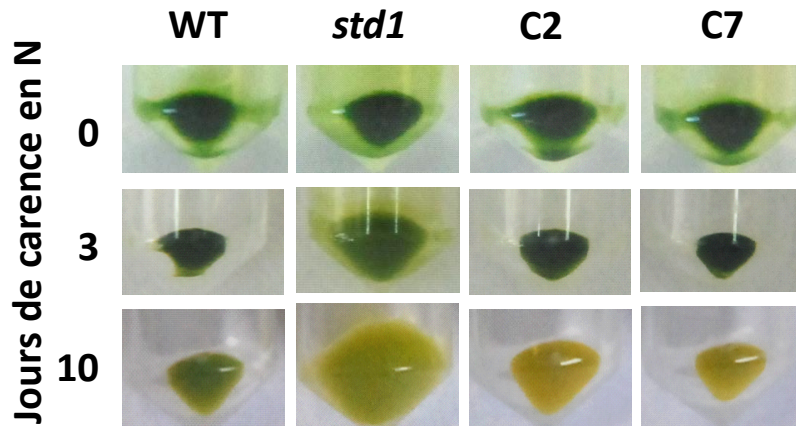
Lipids



Caractérisation d'un mutant hyper-accumulateur

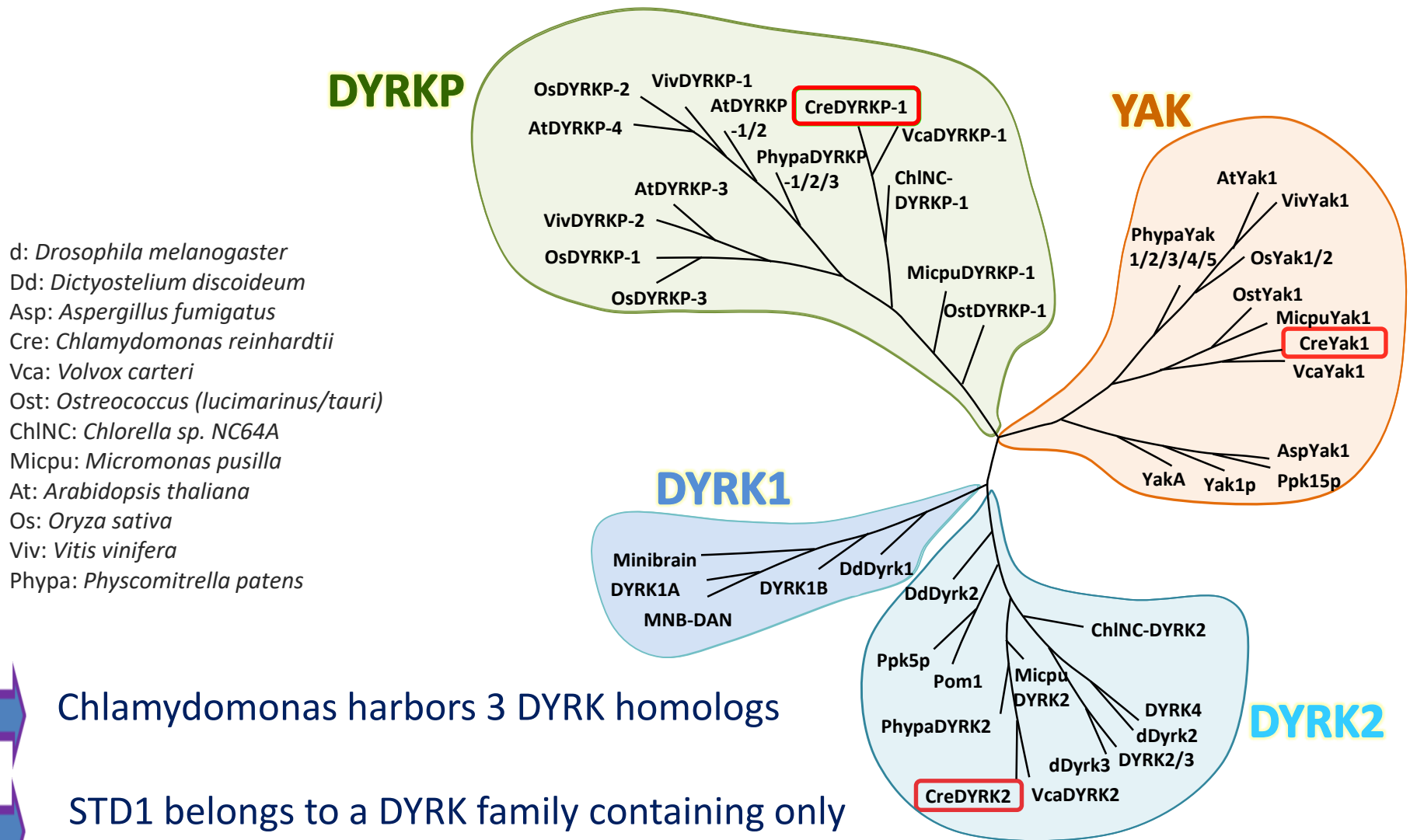
Mutant affecté dans l'expression d'un kinase

DYRK Dual specificity tyrosine-phosphorylation-Regulated Kinase



Schulz-Raffelt et al. (2016) *Biotechnol. Biofuels*

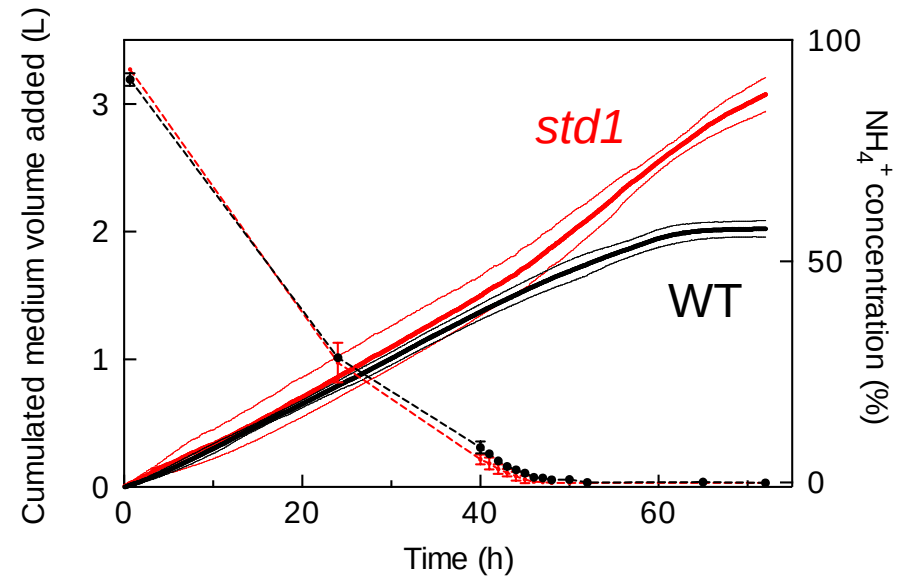
Une famille de DYRK spécifique aux plantes et algues



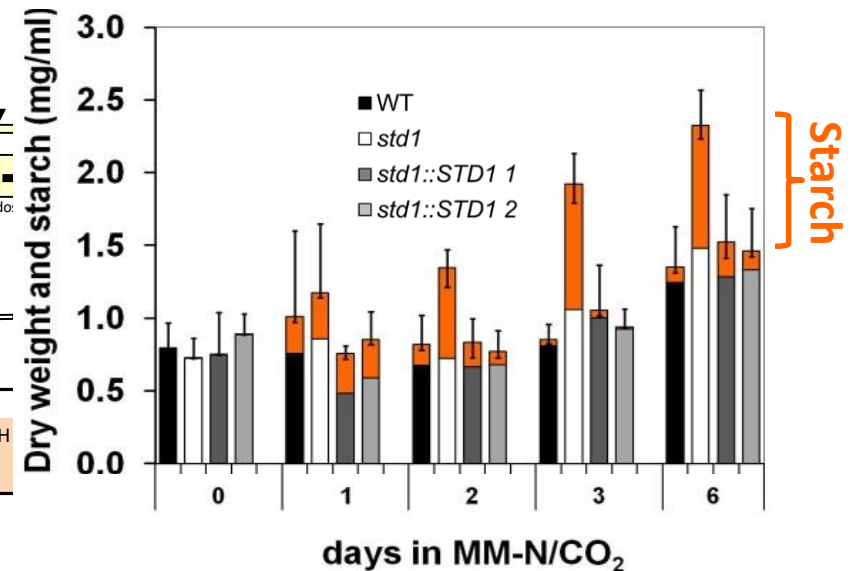
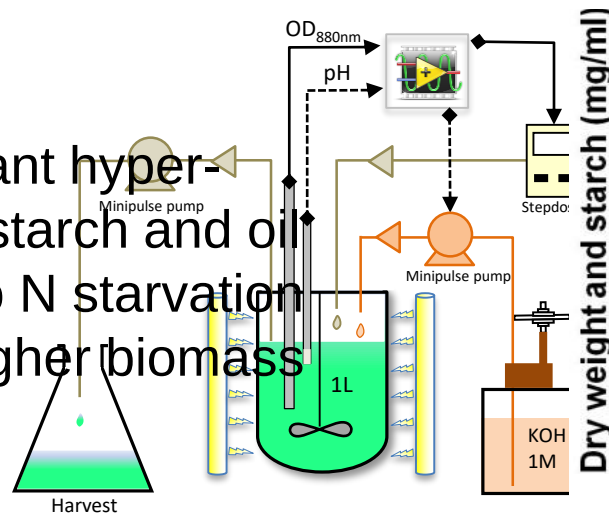
Chlamydomonas harbors 3 DYRK homologs

STD1 belongs to a DYRK family containing only members in plant and algal genomes

Production accrue de biomasse en carence en N

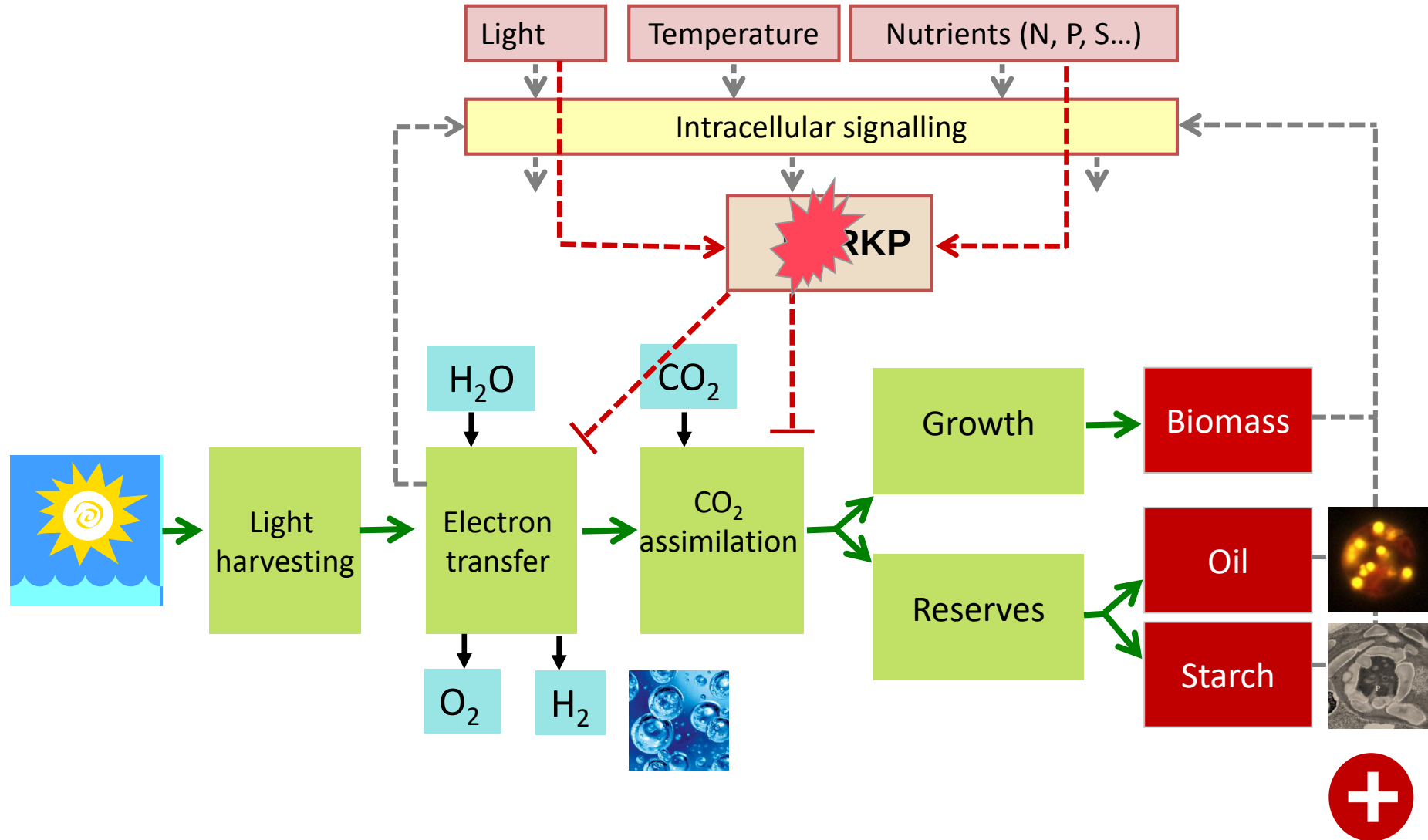


The *std1* mutant hyper-accumulates starch and oil in response to N starvation resulting in higher biomass productivity

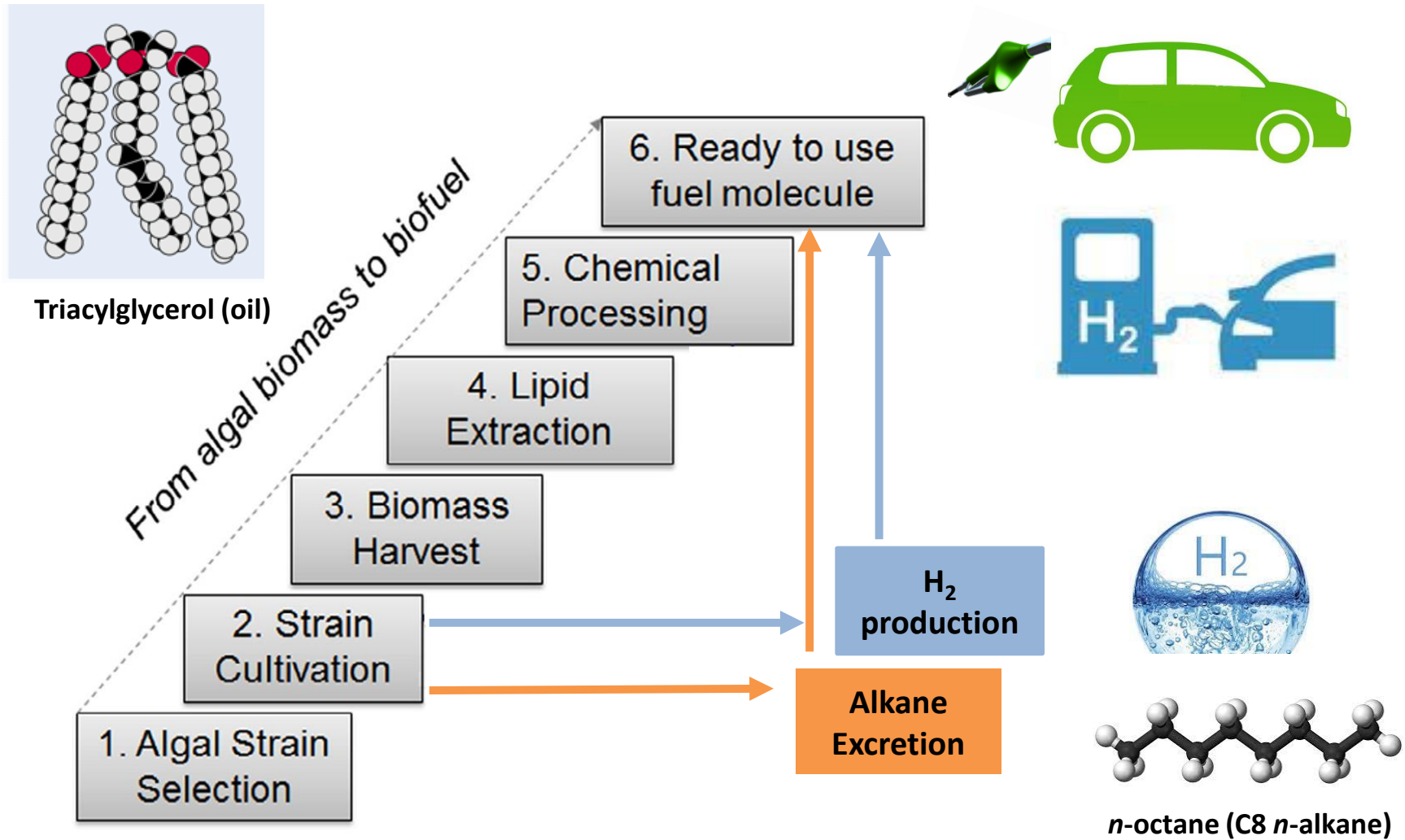


Schulz-Raffelt et al. (2016) *Biotechnol. Biofuels*

Contrôle génétique de conversion et stockage d'énergie



Avantages de produire des biocarburants volatiles



Adapted from Delrue et al. (2013) *Bioresource Technol.*

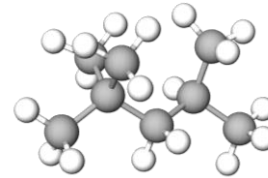
Les alcanes et alcènes sont les composants majeurs des carburants fossiles

1 C



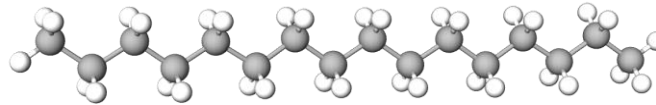
Methane

8 C



Iso-octane

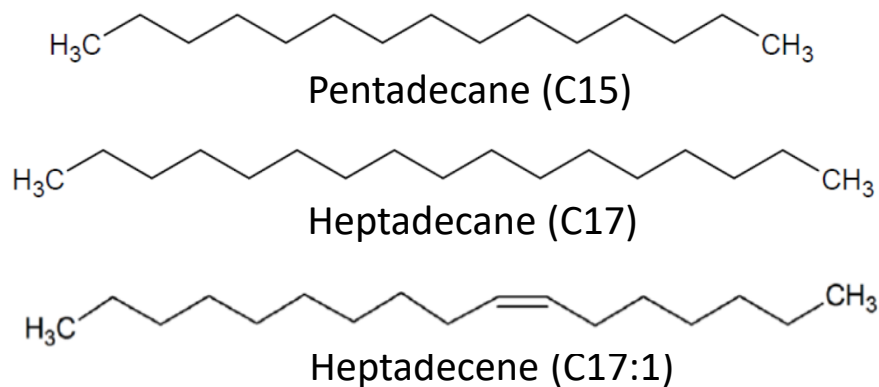
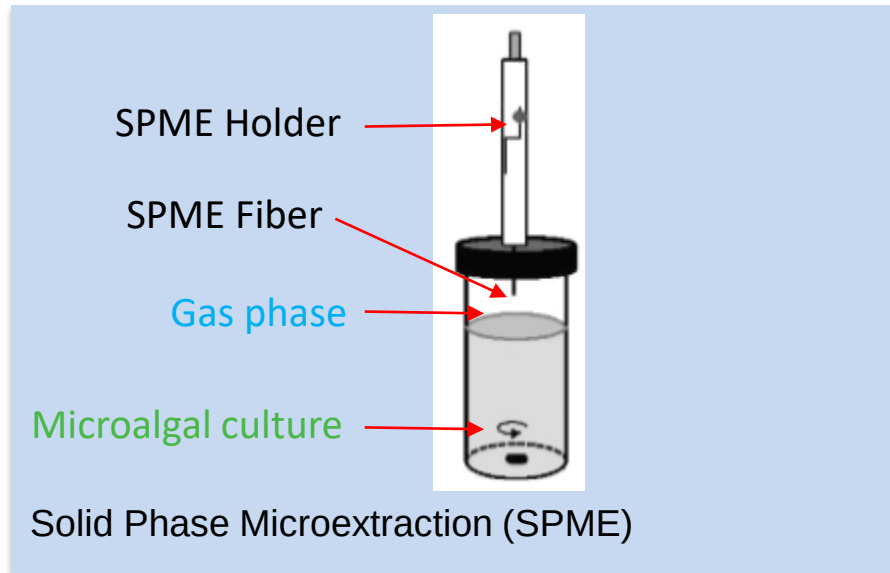
10 C



Cetane (*n*-hexadecane)

- ➔ Essence: 5-10 carbones
- ➔ Kérosène: 10-13 carbones
- ➔ Diesel: 12-20 carbones

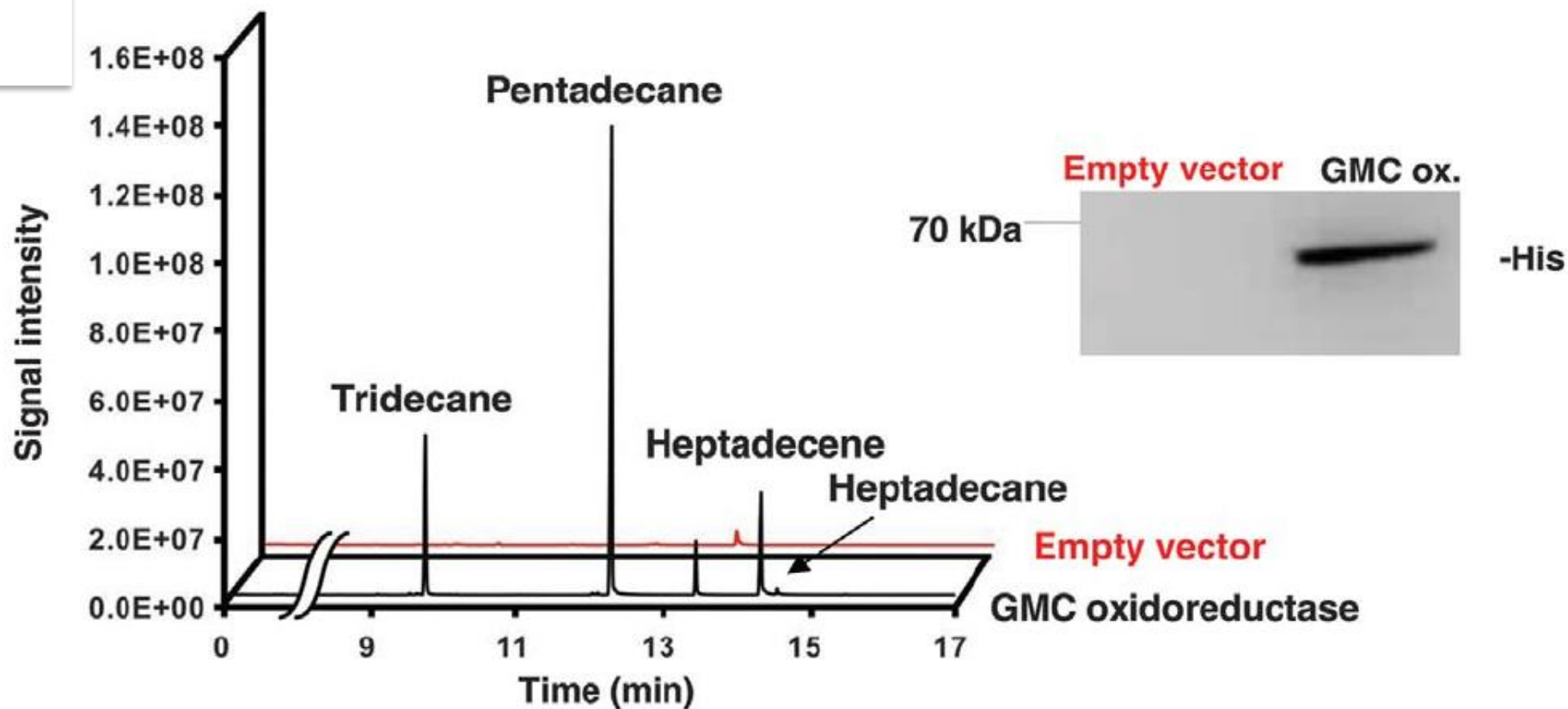
Les microalgues synthétisent naturellement de faibles quantités d'hydrocarbures



Sorigué et al. (2016) Plant Physiol.

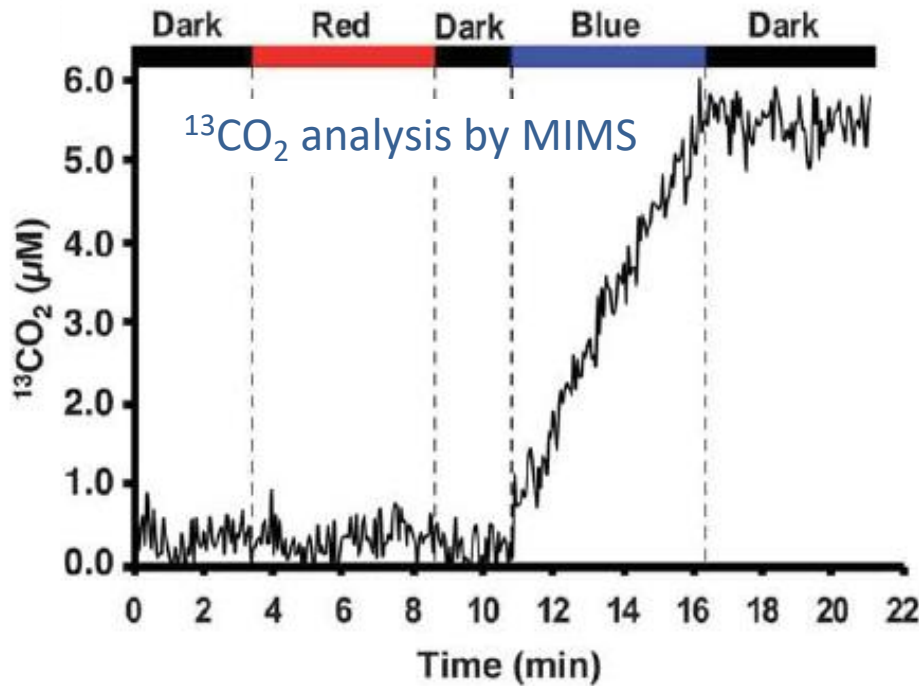
Microalga	Hydrocarbons
<i>Chlamydomonas</i>	C17:1
<i>Chlorella</i>	C15:0 C17:0 C17:1
<i>Nannochloropsis</i>	C15:0 C17:0 C17:1
<i>Ostreococcus</i>	C21:6
<i>Pheodactylum</i>	C21:6

Découverte d'une nouvelle enzyme

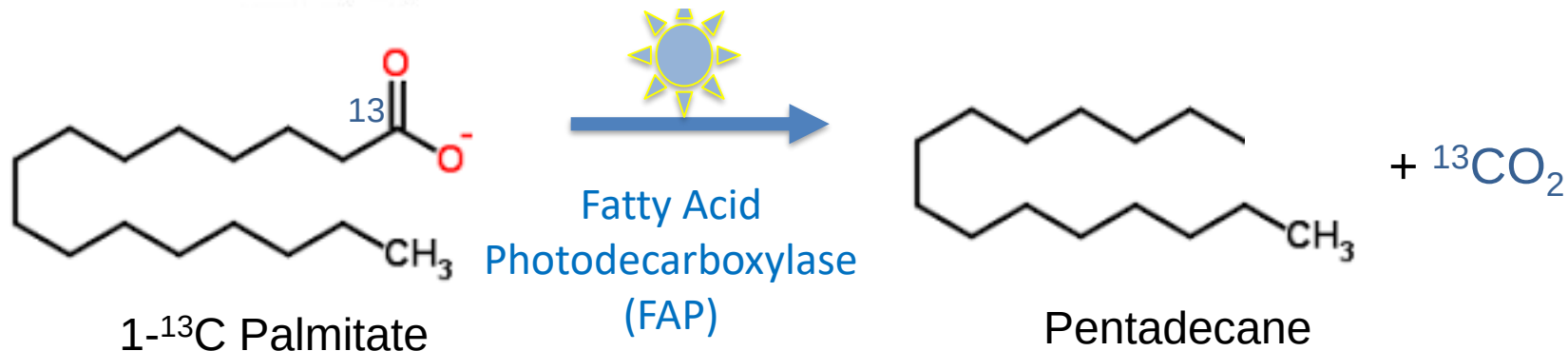
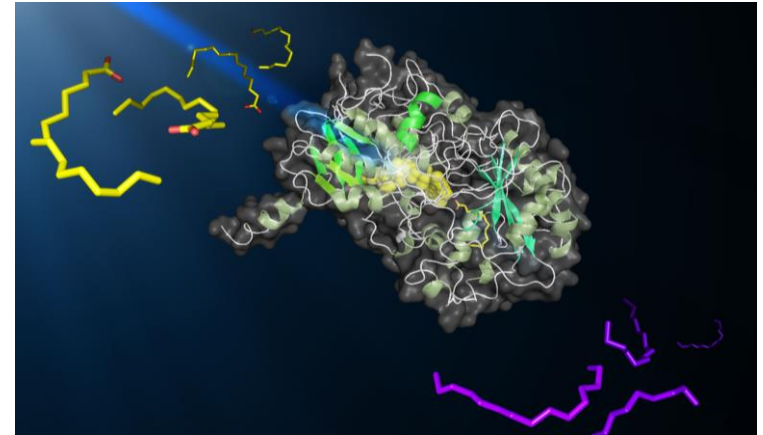


Sorigué et al. (2017) *Science*

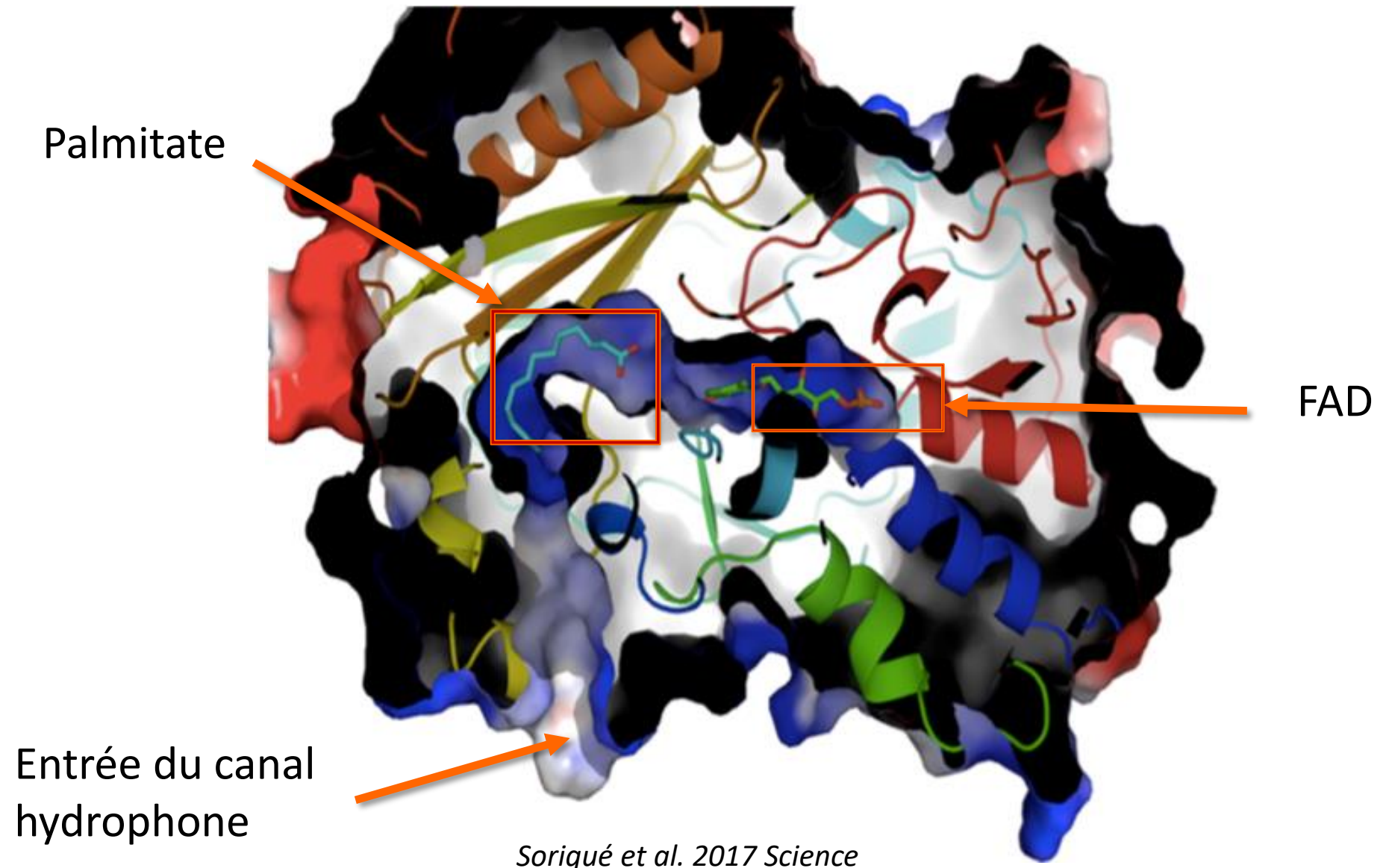
Une nouvelle photoenzyme productrice d'hydrocarbures



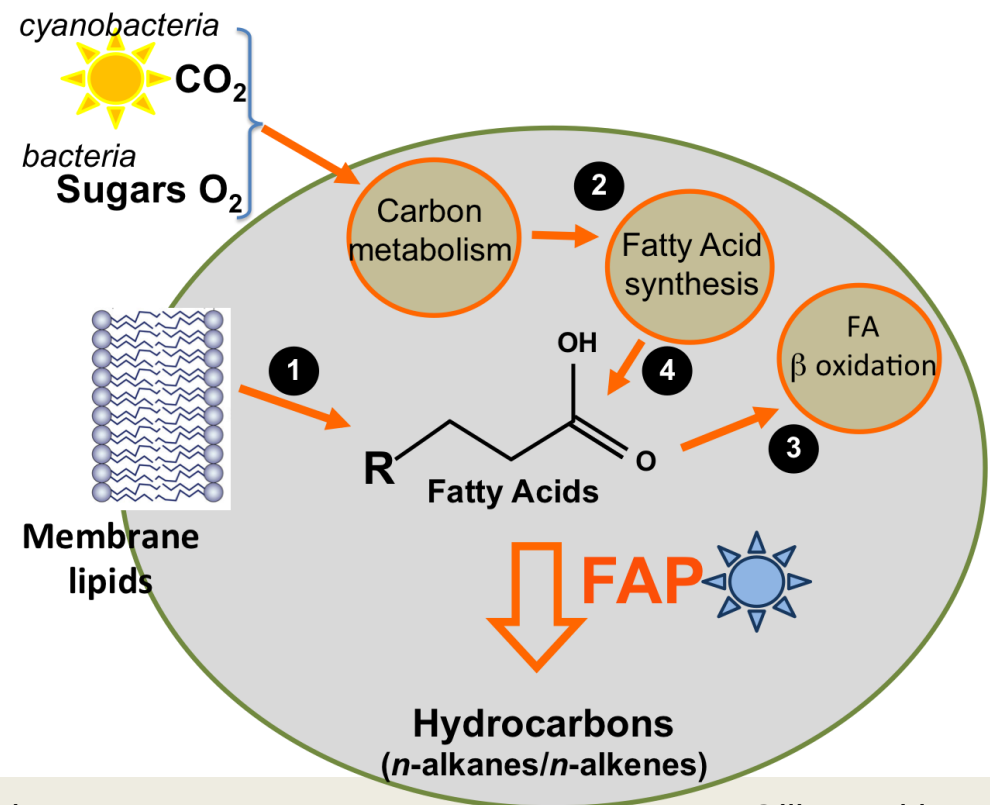
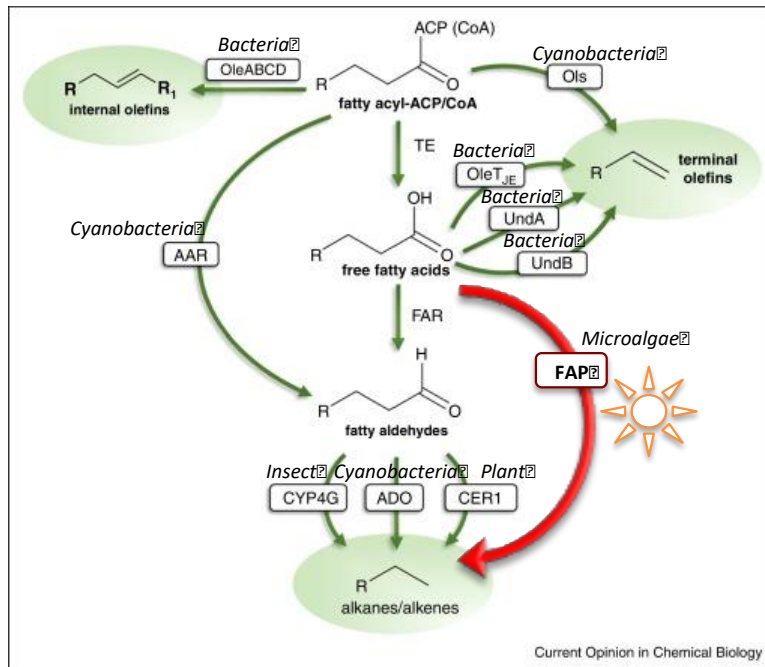
Purified recombinant enzyme
incubated with 1- ^{13}C palmitate



Structure 3D de l'alcane photosynthase



Vers une usine cellulaire productrice d'hydrocarbures

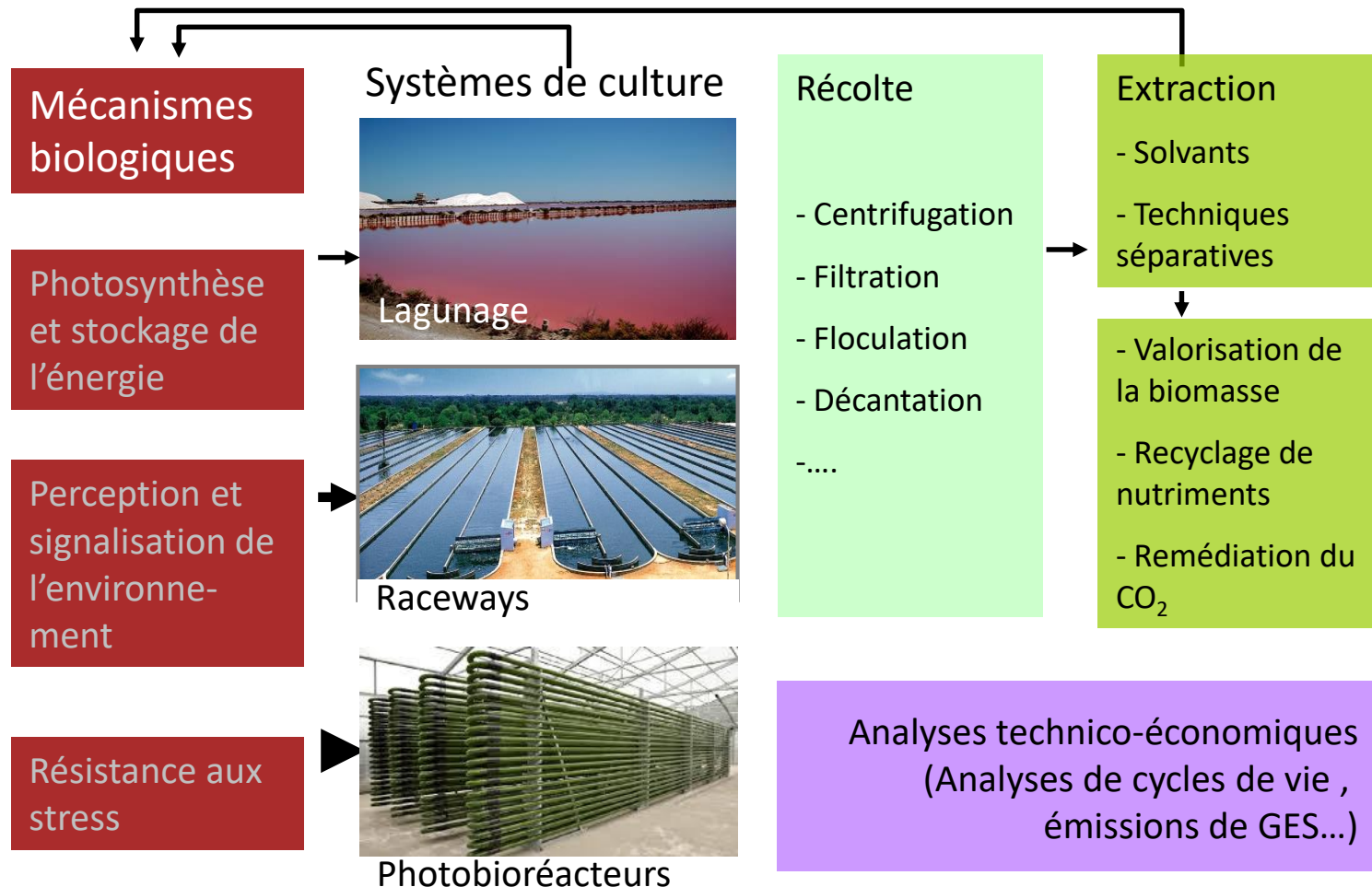


Un lien entre domestication et procédés

Biologie, biotechnologie



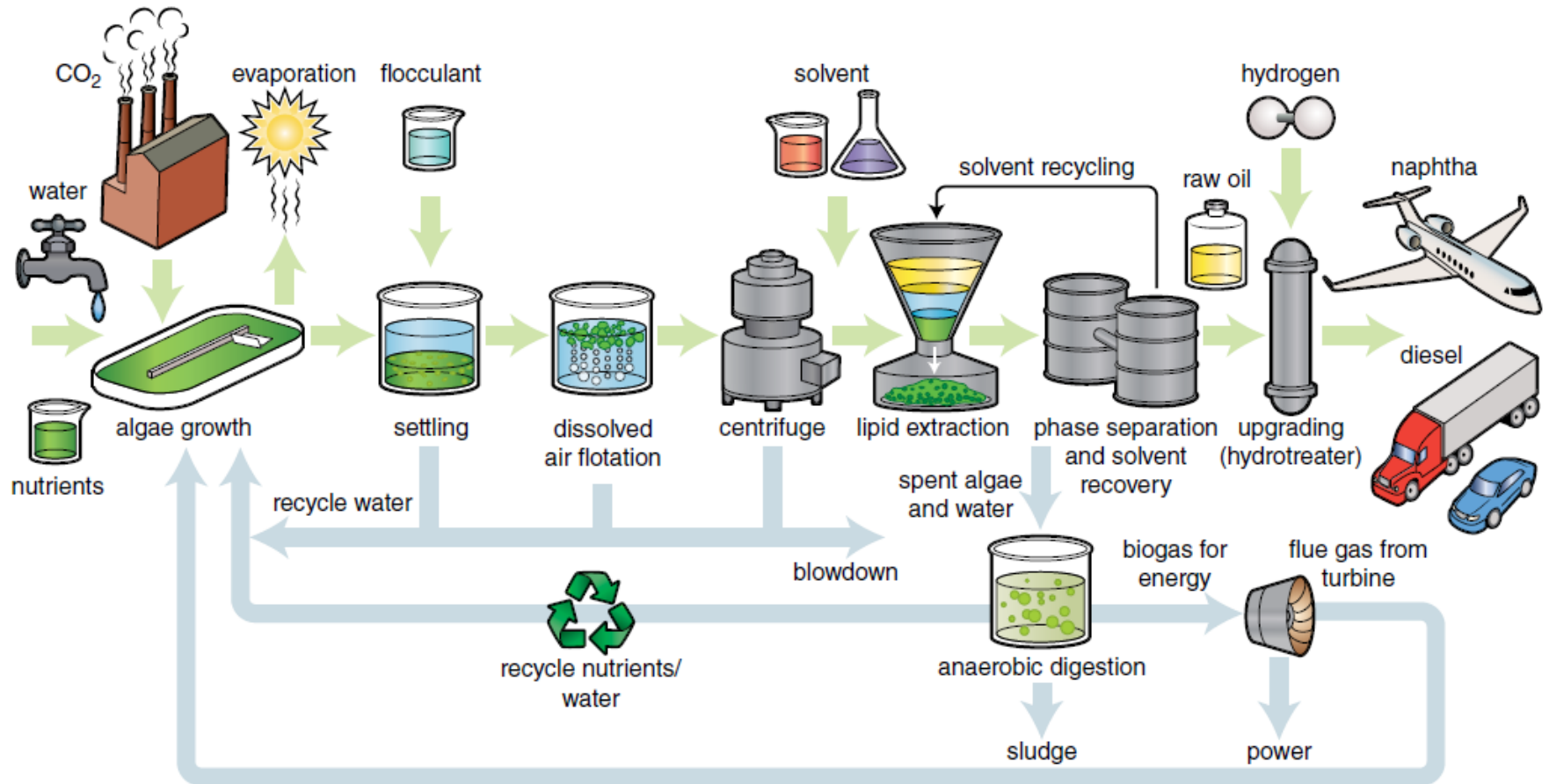
Technologie, génie des procédés



Les microalgues, une source durable de biomasse ?

- Les microalgues sont cultivées pour des marchés de niche (aquaculture, compléments alimentaires)
- Elles produisent une biomasse riche, selon les conditions, en protéines, huile ou amidon
- Des progrès importants (productivité des souches, coûts de production) doivent être réalisés pour qu'elles conquièrent des marchés de masse (alimentation, chimie verte, énergie)
- L'enjeu pour le biologiste est d'accroître la productivité des souches via la domestication des espèces

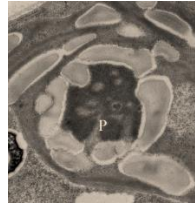
Vers un bouclage des cycles (N, P, S...)



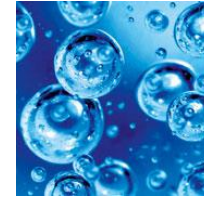
Pienkos et al. (2011) American Scientist

Production de composés riches en énergie ou à haute valeur ajoutée

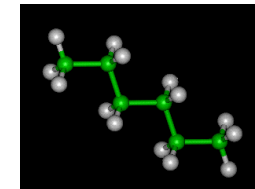
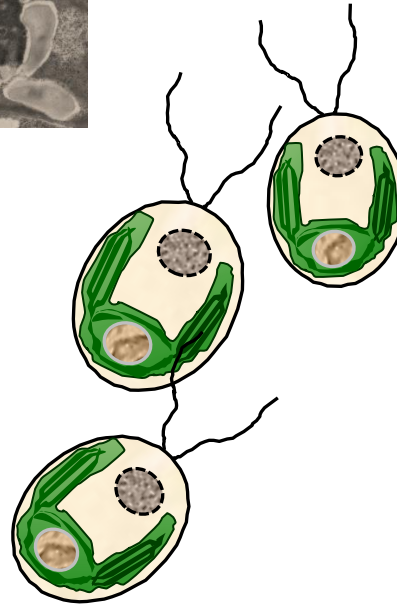
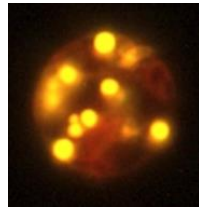
Amidon



Hydrogène



Lipides



Alcanes/alcènes



Caroténoides



Biomédicaments