



GEPEA
UMR CNRS 6144

**Alimentation, énergie,
dépollution...**

**Les microalgues, une solution
aux enjeux de demain ?**

Pr. Jeremy PRUVOST

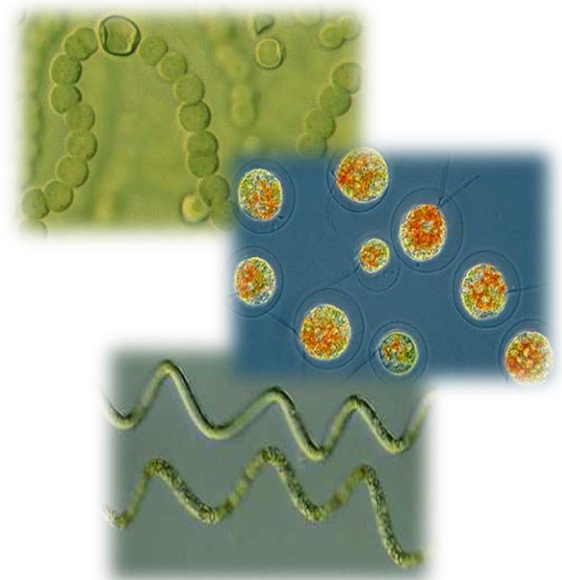
Laboratoire de Génie des Procédés
Environnement - Agroalimentaire

Université Permanente de Nantes
19 Janvier 2022

Qu'est-ce qu'une microalgue ?



Une microalgue est un microorganisme se développant dans l'eau, grâce à la photosynthèse



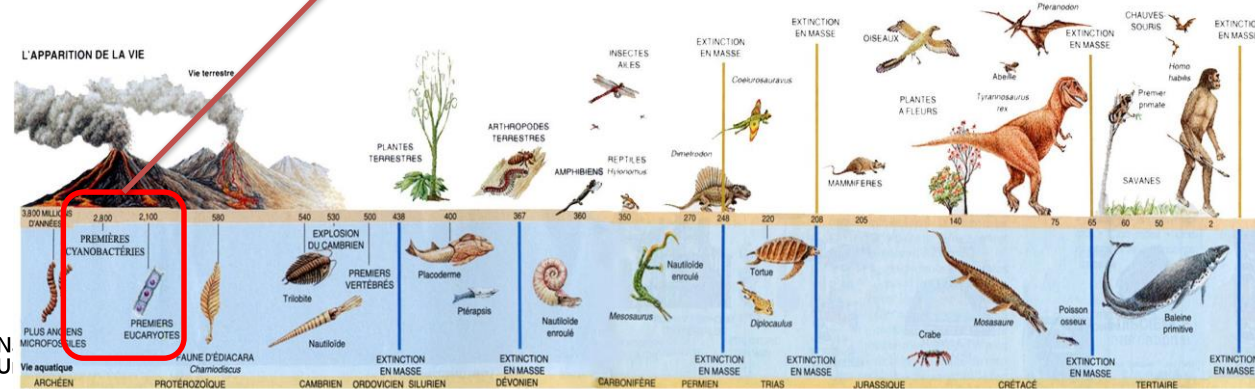
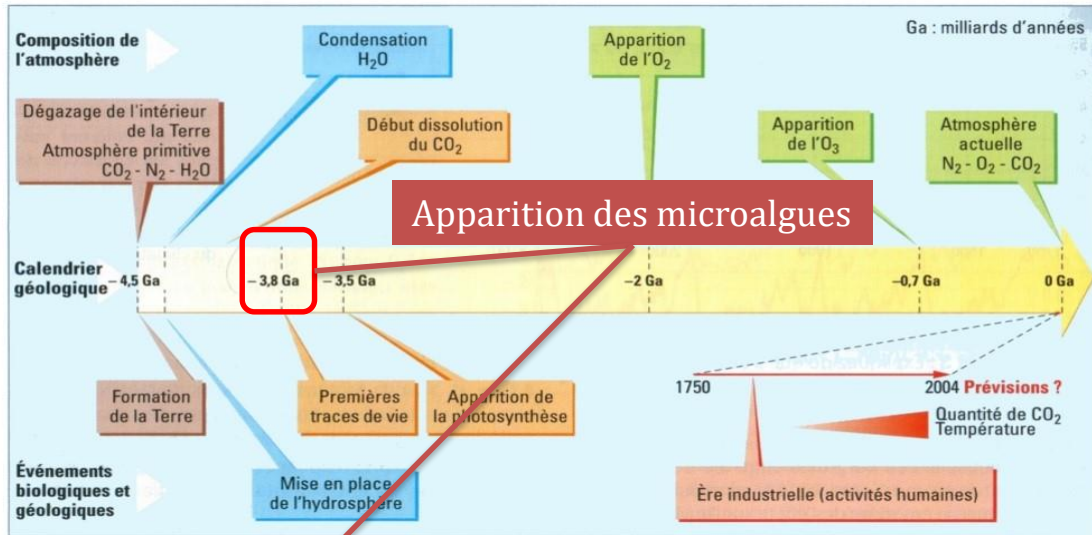
Dans une goutte d'eau, on peut avoir plusieurs dizaines de millions de cellules

On en trouve dans le monde entier, dans les océans, les lacs, sur la glace...

Qu'est-ce qu'une microalgue ?

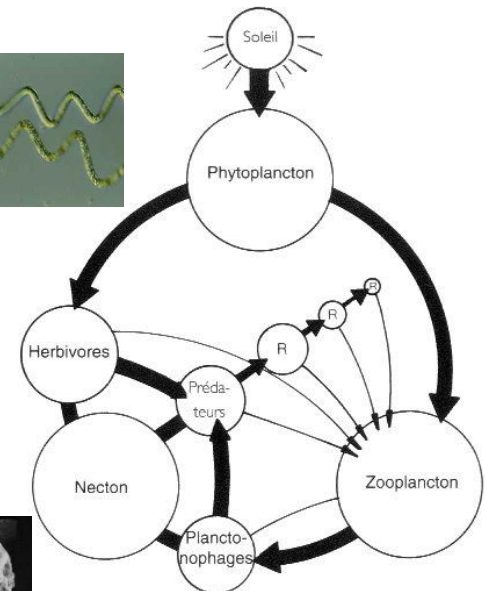
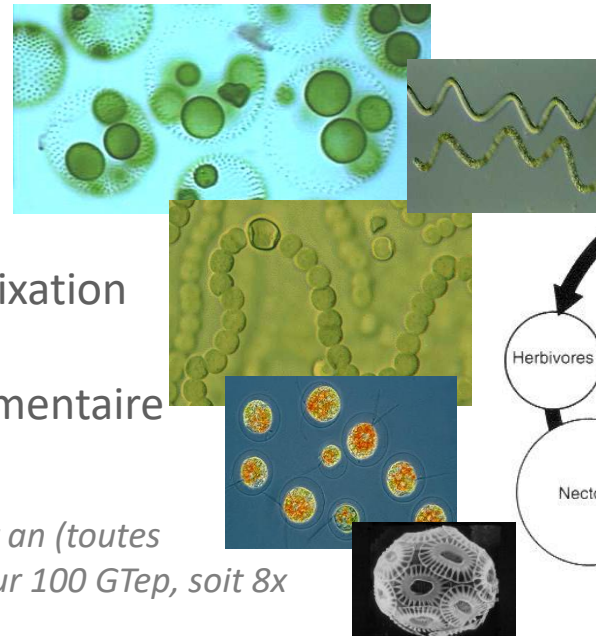
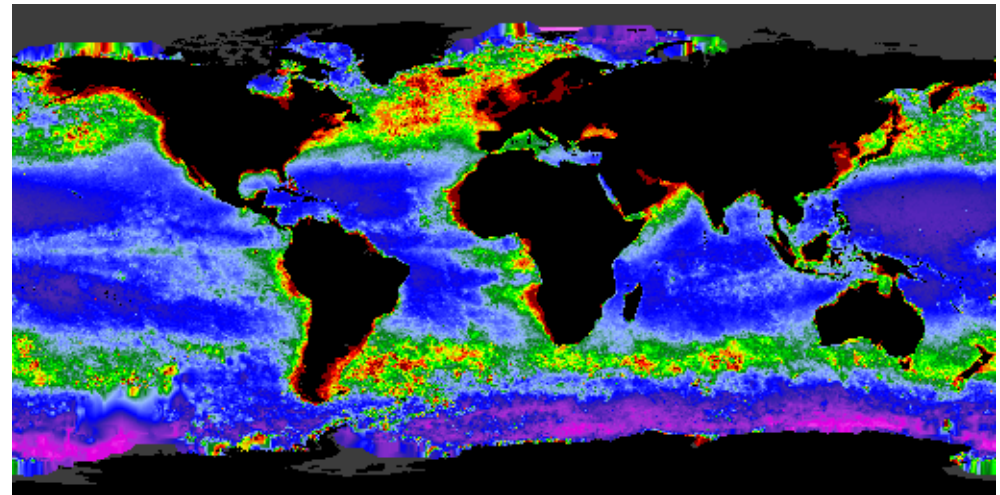
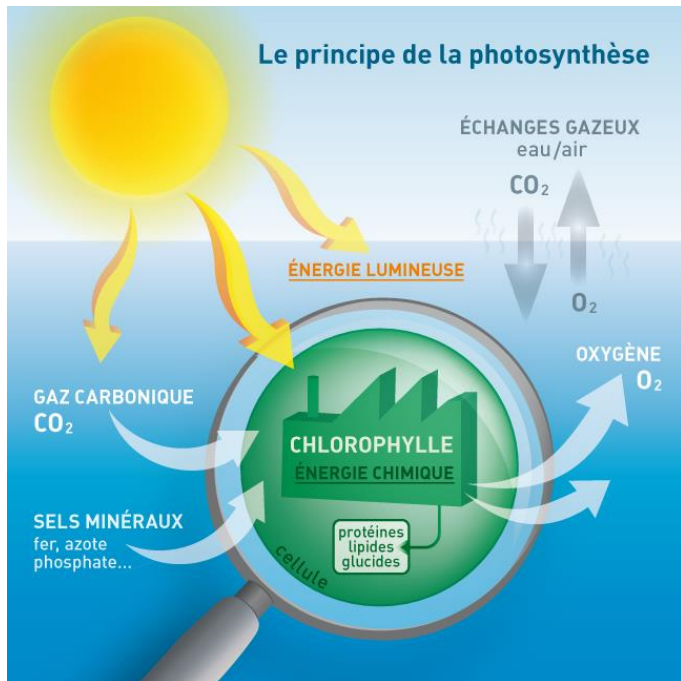
Une très longue évolution : Plus de 3 Milliards d'années !
 L'Homo Sapiens a 200 000 ans, l'ère industrielle 250 ans...

L'évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps



Une biodiversité largement méconnue
 Aujourd'hui, on estime qu'il a plusieurs millions d'espèces de microalgues...
 ...et on en connaît quelques centaines...

Les microalgues dans la nature



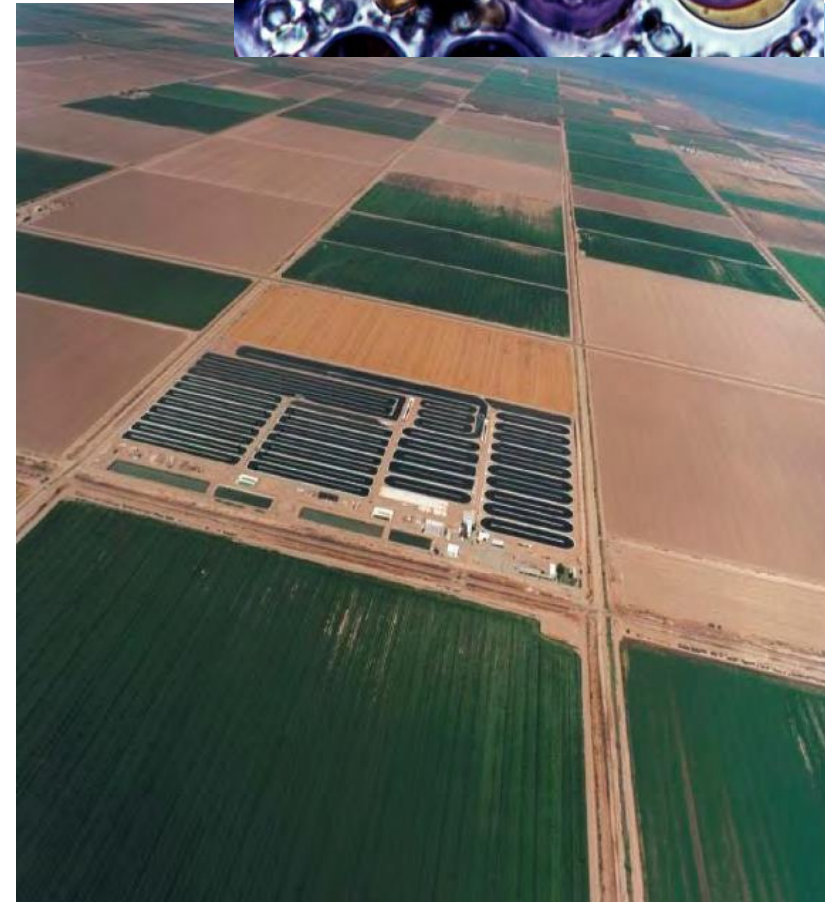
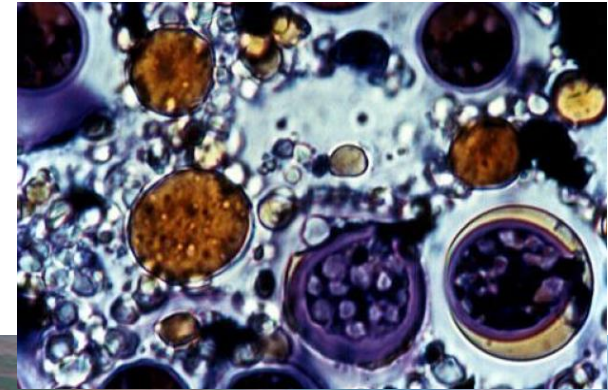
- A l'origine de notre atmosphère
- 40 à 50% de la photosynthèse terrestre (fixation annuelle de CO_2^*)
- Un des premiers maillons de la chaîne alimentaire
- Rôle essentiel dans le cycle du carbone

**La photosynthèse absorbe 100Gt de CO_2 par an (toutes plantes), équivalent aux émissions de CO_2 pour 100 GTEp, soit 8x la consommation mondiale (12GTEp)*

→ mais ce n'est pas du stockage de carbone...

Pourquoi l'homme s'intéresse aux microalgues ?

	Microalgues	Plantes C4 (maïs,...)
Productivité maximale (T.ha⁻¹.an⁻¹)	100	60
Productivité observée (T.ha⁻¹.an⁻¹)	50-70	10-30

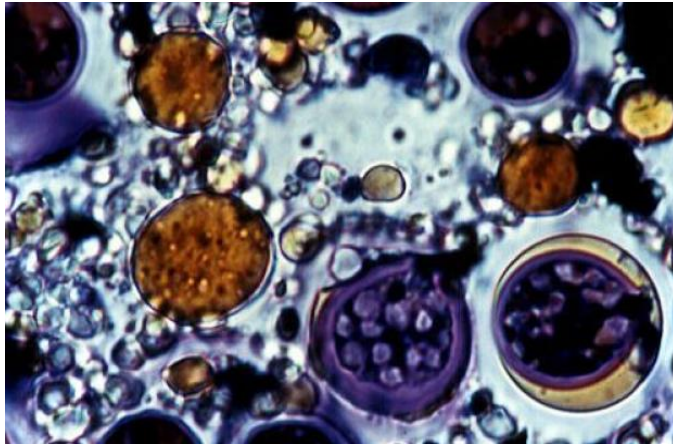


- Moyen le plus efficace de faire de la photosynthèse
- Procédé durable (pas de pollution des sols, recyclage de l'eau)
- Grande variété d'applications : nutrition, santé, biocarburants...
- Principe d'écologie industrielle : dépollution simultanée d'effluents (CO₂...)



Les microalgues dans l'alimentation

Une composition variée



- Selon l'espèce, les fortes teneurs en protéines, sucres ou lipides peuvent être privilégiées
- Certaines espèces présentent des teneurs plus élevées que pour les plantes terrestres
- Une meilleure digestibilité est souvent observée (pas de paroi ligneeuse)
- Une source de composés très prisés, parfois spécifiques à cette bioressource :

- Lipides polysaturés type ω_3 , ω_6 ...
- **Pigments** : caroténoïdes, phycobiliprotéines
- **Vitamins** : A, B₁, B₂, B₆, B₁₂, C, E...

TABLE 1. General composition of different human food sources and algae (% of dry matter) (3)

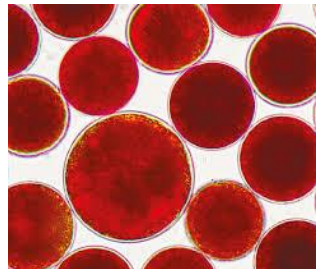
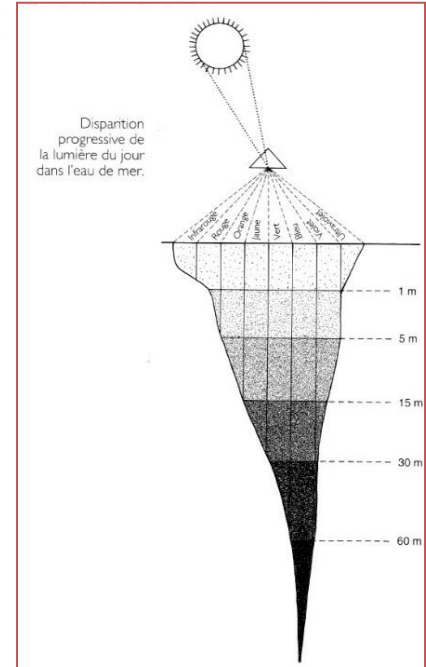
Commodity	Protein	Carbo- hydrate	Lipid
Bakers' yeast	39	38	1
Meat	43	1	34
Milk	26	38	28
Rice	8	77	2
Soybean	37	30	20
<i>Anabaena cylindrica</i>	43–56	25–30	4–7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28–39	40–57	9–14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Spirulina maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11

It should be kept in mind that the figures presented in this table are estimates, since the proportion of individual cell constituents largely depends on environmental parameters.

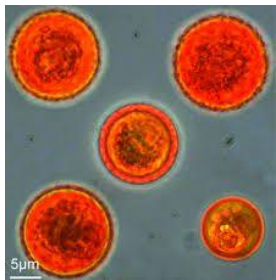
Alimentation : exemples de composés et produits



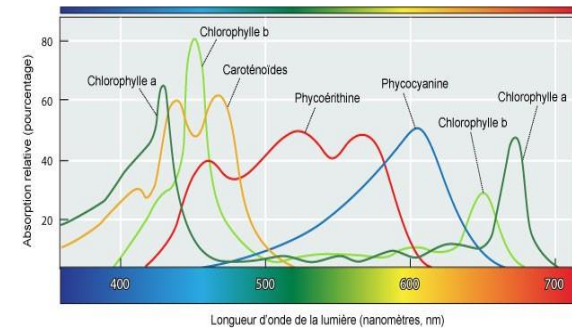
Spiruline



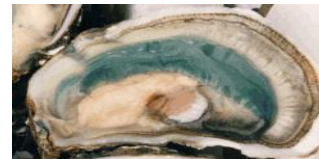
Haematococcus pluvialis



Dunaliella salina



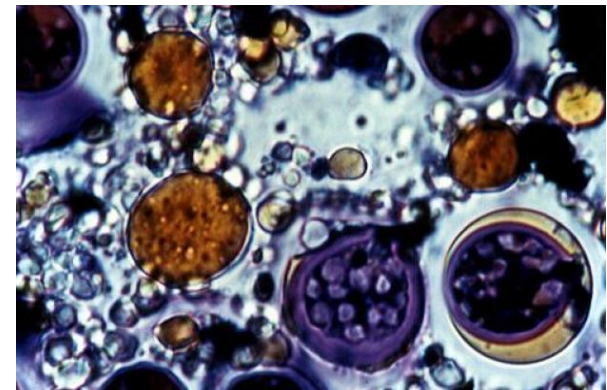
Haslea ostrearia



Les microalgues comme source de biocarburants

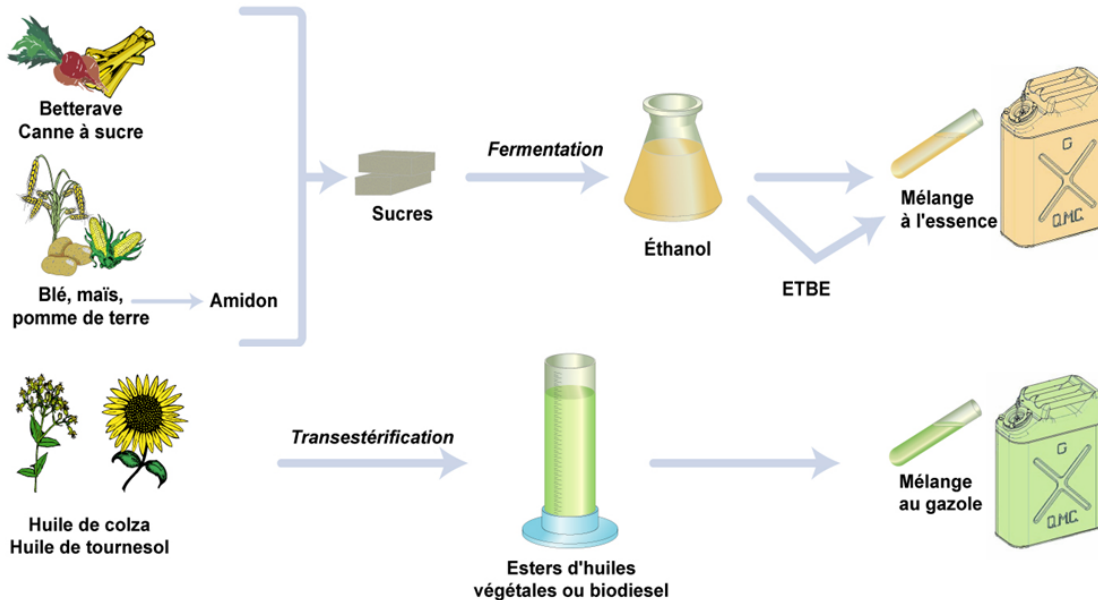
Les microalgues comme source de biocarburants

- Source possible de plusieurs vecteurs énergétiques: biodiesel, biokérosène (lipides, hydrocarbures, alcanes), H₂ issu de la photolyse de l'eau, méthane, bioéthanol (sucres)
- Impact environnemental réduit: utilisation de CO₂, contrôle des nutriments et des rejets
- Productivité en surface plus élevée que pour les plantes terrestres
- Utilisation possible de terre non arable (ex : zones désertiques) et d'eau non potable (ex : eau de mer)
- Culture possible sur une large partie de la planète
- Possibilité d'intensification sans impact sur l'environnement (culture hors sol, possibilité de recyclage d'eau)
- Production industrielle possible



L'alternative « Microalgue » pour la production de biocarburants liquides

Les biocarburants de 1^{ère} génération



- Mais, de nombreux inconvénients
- Rendement énergétique faible
 - Coût environnemental élevé
 - Compétition avec la production alimentaire
 - Compétition avec les ressources en eau
 - Bilan négatif sur l'effet de serre (N_2O)

Utilisation de parties non comestibles : paille, bois...

Les biocarburants de
2^{ème} génération

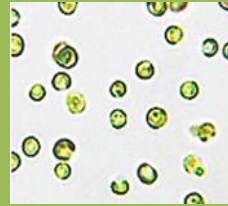
Utilisation de microalgues

Les biocarburants de
3^{ème} génération

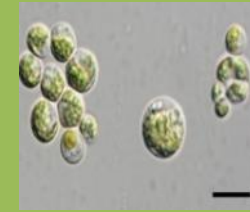


Quel est le potentiel ?

Nannochloropsis gaditana (souche marine)



Parachlorella kessleri (souche d'eau douce)



Données issues du projet ANR DiesAlg
(criblage de la biodiversité algale et
caractérisation des performances de
souches oléagineuses)

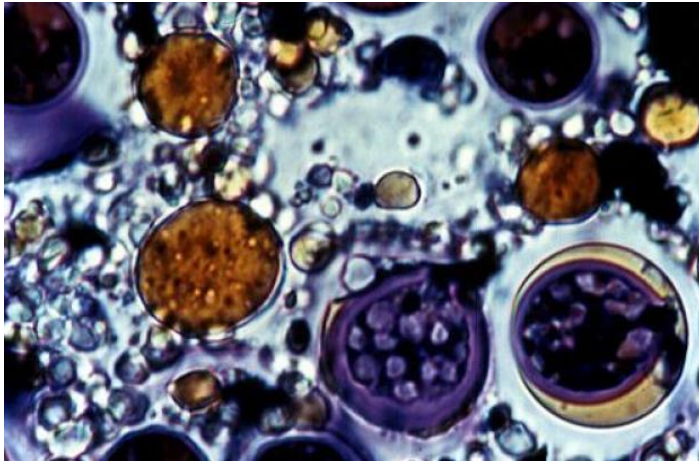
Productivité en biomasse (+N) PFD=250µmole/m ² /s	27g/m ² /jour (100t/ha/an)	27g/m ² /jour (100t/ha/an)
Productivité en lipides (-N)	2,3-2,5g _{TAG} /m ² /jour (8-10t_{TAG}/ha/an)	2,7-4,4g _{TAG} /m ² /jour (10-16t_{TAG}/ha/an)
Productivité en huile	9-12m ³ _{TAG} /ha/an	12-20m ³ _{TAG} /ha/an
Contenu max en lipides	62% de lipides totaux 56% de TAG	41-65% de lipides totaux 38-46% de TAG
Fragilité cellulaire (extraction en voie humide)	>70%	>90%

Références de plantes terrestres :

- *Palmier à huile* (équateur) : environ 3-4t d'huile/ha/an (max : 6)
- *Colza* (Europe) : environ 0.5-1t d'huile/ha/an

Productivité plus élevée (x3 à x10) et possibilité géographique de culture étendue

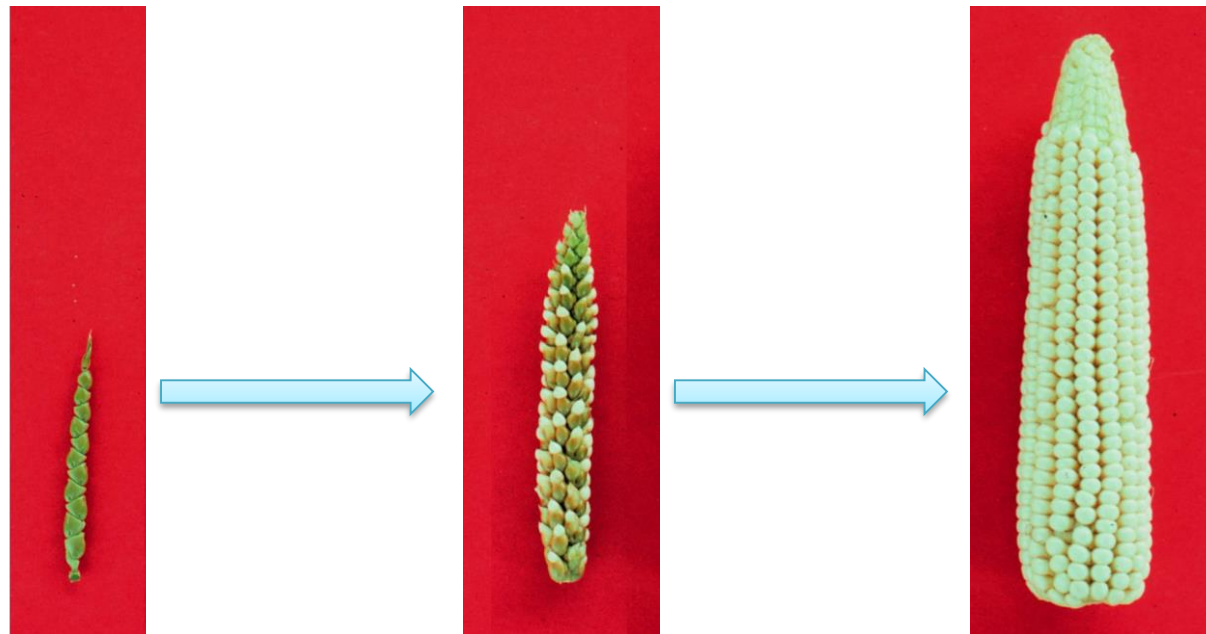
Quels sont les leviers d'optimisation ?



- Rechercher les souches les plus performantes
- Définir les systèmes d'exploitation durables et à très grande échelle
- Mettre en adéquation carburants et moteurs
- Industrialiser et commercialiser la production



Sélection et recherche de souches

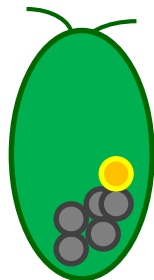


Teosinte

7,000 à 10,000 ans

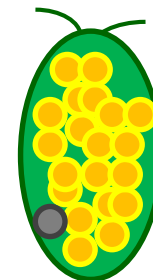
Maïs

Huile ●
Sucres ●



Biodiversité, génomique,
génétique

Outils de la biotechnologie
moderne :
10-20 ans ?



Source G.Peltier – CEA Cadarache

Vers la production de biodiesel par microalgues



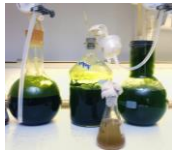
Projet Shamash-PE (2009-2013)

Production de 100 kg de biomasse en système ouvert (raceway)
(AlphaBiotech, AlgoSource group)

Extraction de 5-8 l de lipides de microalgues
(CO₂sc, M2P2)

Production de biodiesel (CIRAD)

Tests moteurs (PSA)



Ballons



Colonnes



Crédits photo PSA



Production de biodiesel démontrée, jusqu'aux tests en moteur HDi chez PSA (*Perrier et al., Fuel, 2015*)

Mais bilan énergétique global négatif.
Pourtant une condition pour une production durable...

Le consommation énergétique : un verrou majeur

Quelques chiffres clés :

- Contenu énergétique de la biomasse algale* : 20MJ/kg (5.56kWh/kg)
Contenu énergétique de l'huile seule : 38MJ/kg (10.56kWh/kg)
- Productivité maximale en biomasse algale (solaire) : 11-27g/m²/jour (40-100t/ha/an)

**Energie maximale récupérable par jour : 220-540kJ/m²/jour
(0.060-0.15kWh/m²/d – 22-54kWh/m²/y)**

L'énergie solaire dépasse de loin notre besoin en énergie primaire (x7000-8000)***

+

Les microalgues sont actuellement la bioressource végétale la plus efficace que nous avons pour convertir l'énergie solaire en biocarburant

Mais, pour atteindre un bilan énergétique positif, l'énergie disponible est seulement de 150Wh/m²/jour !

(soit 50kWh/m²/an : 10 fois moins que l'énergie d'un ordinateur portable utilisé 6h jour !)

* Aussi appelé PCI

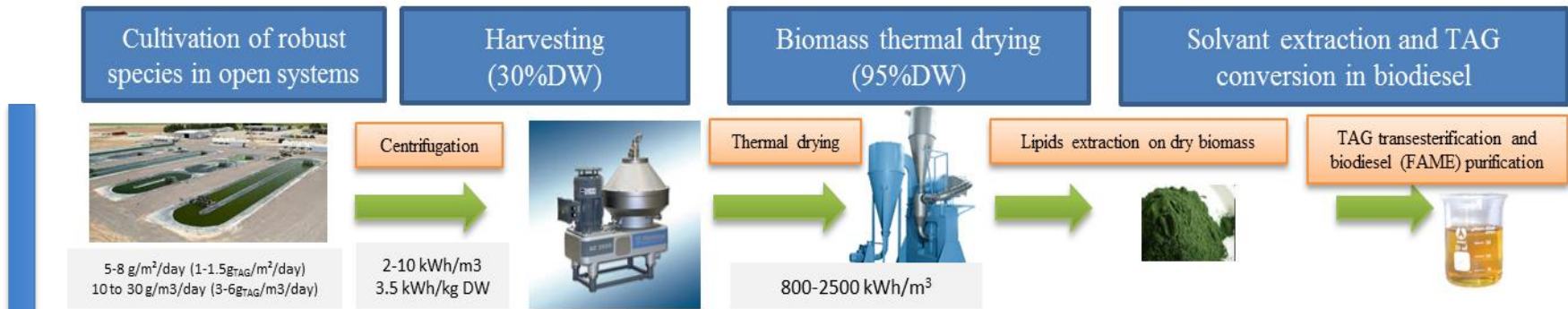
**Note: Biomasse sèche, correspondant à environ 12-40 t d'huile ou sucres, environ 7 000-26 000L d'éthanol ; 12 000-40 000L de biodiesel

***Energie solaire disponible (Californie) : 7-8kWh/m²/jour (2500-3000kWh/m²/an)

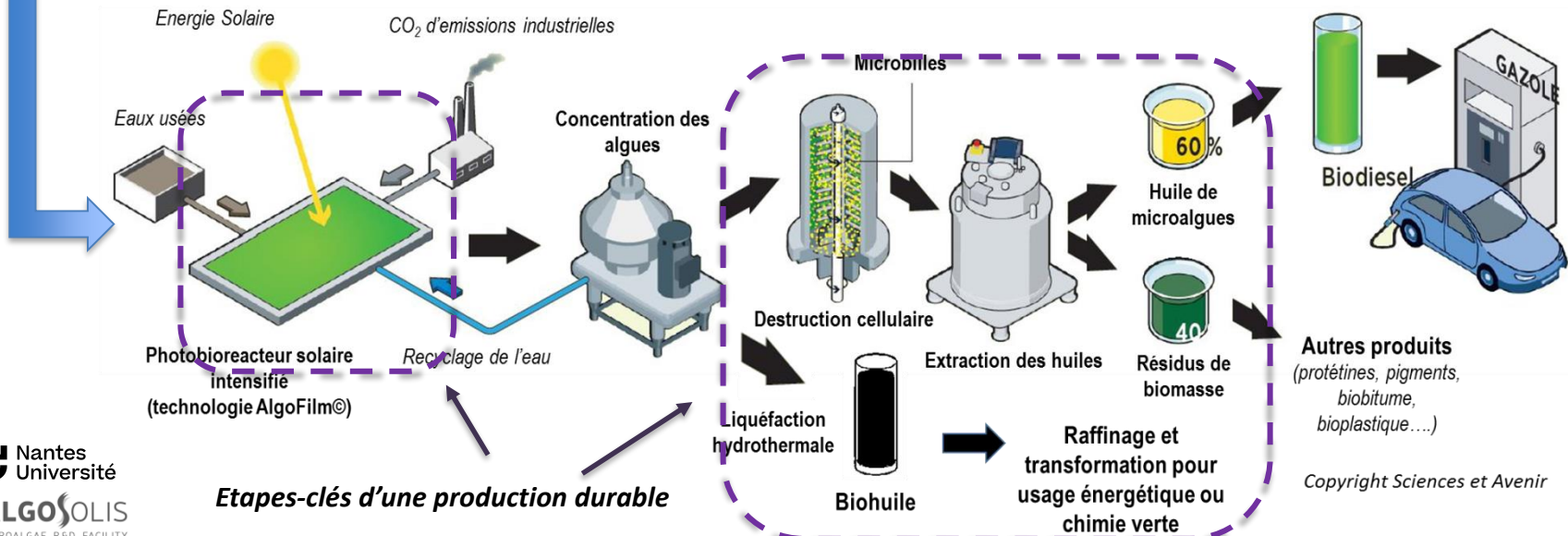
L'innovation technologique pour une production durable

La "voie sèche" mène à un bilan énergétique négatif
 → nécessité de définir une nouvelle voie technologique

Culture en système ouvert + procédés « voie sèche »

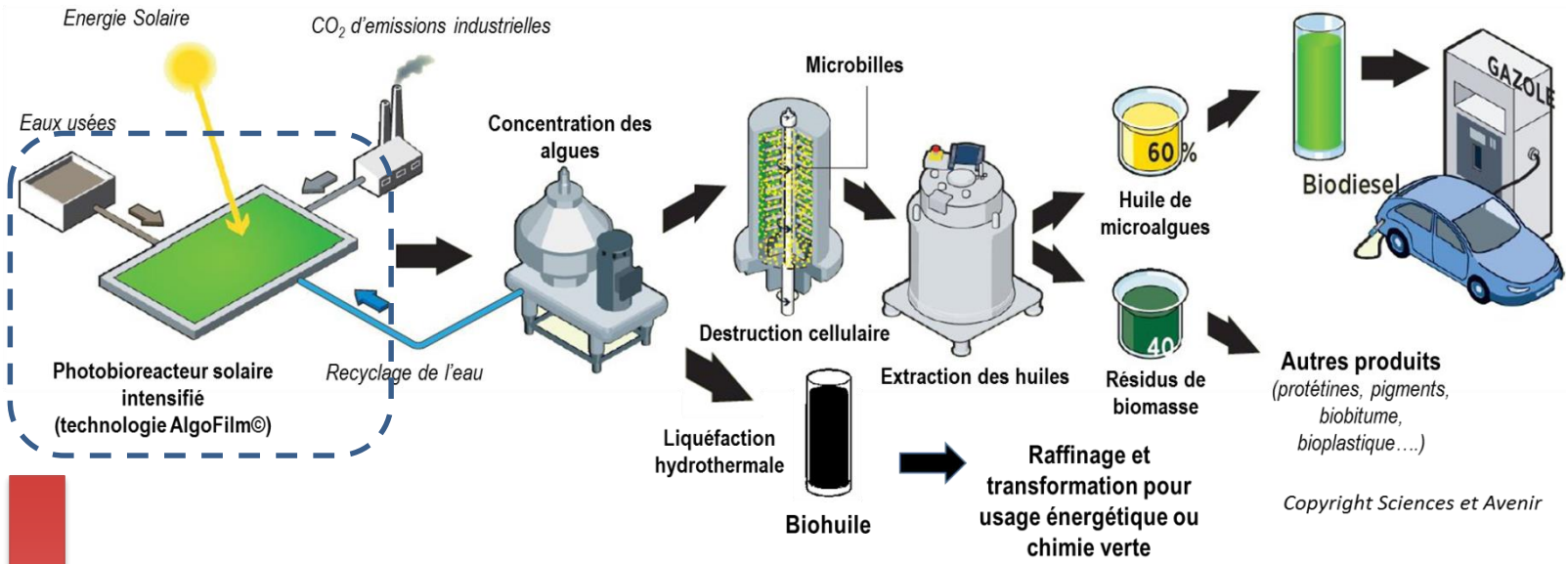


Culture en photobioréacteurs intensifiés et traitement en « voie humide »

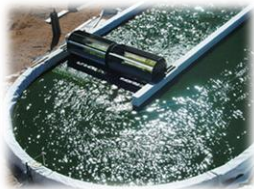


L'innovation technologique pour une production durable

Le levier « photobioréacteur intensifié »



Un point clé : diminuer la quantité d'eau (et donc le volume de culture)



Culture d'algues :
50 - 150 Litres par m²

Mais la nature nous bat (encore !)



Feuilles d'arbre :
0.5 Litre par m² !!

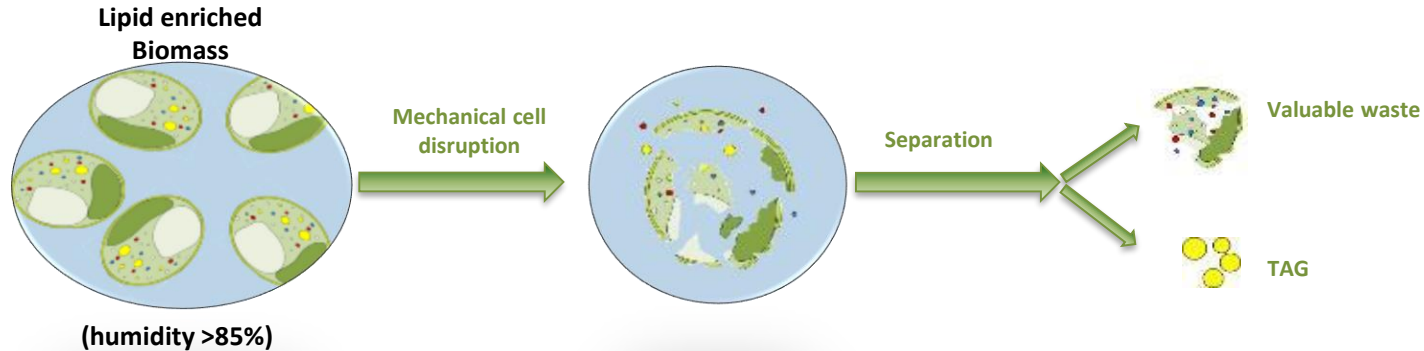
Alors on s'inspire de la nature



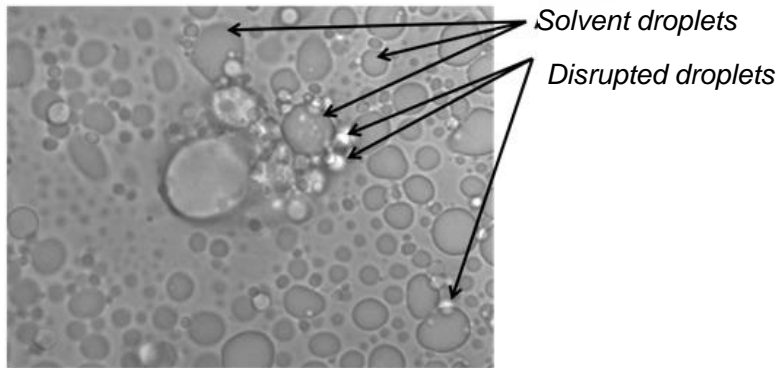
Système AlgoFilm
2.1 Litres par m²
(soit 2.1mm d'eau par m²)

L'innovation technologique pour une production durable

Le levier « extraction en voie humide »

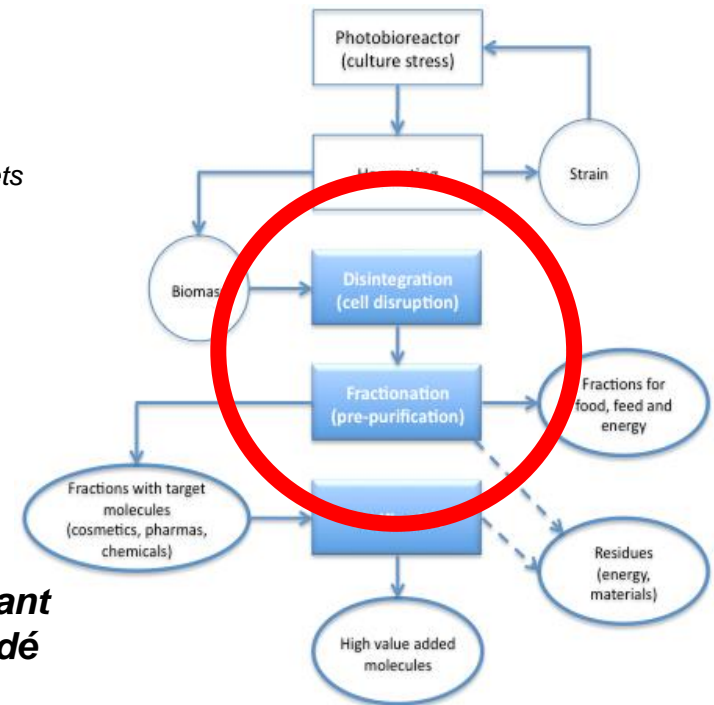


Extraction en voie humide



L'extraction des lipides implique:

- ➔ *Le relargage dans le milieu: **lié à la fragilité cellulaire***
- ➔ *La dissolution dans le solvant d'extraction : **lié au solvant***
- ➔ *Le transfert de matière entre les phases : **lié au procédé***



De l'importance des choix technologiques

Comparaison au scénario « Culture système ouvert + voie sèche »

Reference: classic RW, centrifugation, Drum drying, Hexane extraction
 + transesterification, anaerobic digestion of residues
 (@3€/l, NER < 1, GES @25kgCO₂/100km, Water fp @2000l/l)



AlgoFilm© PBR
 (ultrathin system,
 2l/m²)

Scenario	Bilan énergétique ₁	Emission de GES	Consommation d'eau
Culture en photobioréacteur intensifié et extraction voie humide	+200% (≈2.5-3.4)	Divisées par 3	Divisées par 10

$${}^1\text{Net Energy Ratio} = \frac{\text{Energy Produced}}{\text{Energy Consumed}}$$

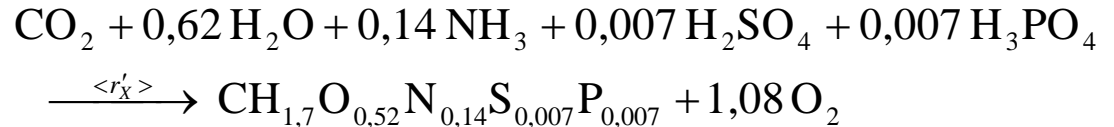
Un bilan énergétique peut être envisagé, accompagné d'un impact positif sur les critères d'impact environnementaux

Les microalgues : au centre d'une écologie industrielle vertueuse ?

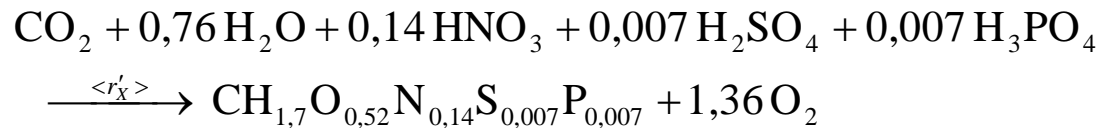
Les nutriments consommés lors de la croissance

Equation stœchiométrique de croissance

Culture sur ammonium



Culture sur nitrate



*Rendement de consommation
(nitrate, sulfate, phosphate)*

NO_3^-	$Y_{\text{NO}_3/\text{C}_x} = 400 \text{g/kg}$ de biomasse sèche
SO_4^{2-}	$Y_{\text{SO}_4/\text{X}} = 60 \text{g/kg}$ de biomasse sèche
PO_4^{3-}	$Y_{\text{PO}_4/\text{X}} = 50 \text{g/kg}$ of de biomasse sèche

Rendement de consommation (CO₂)

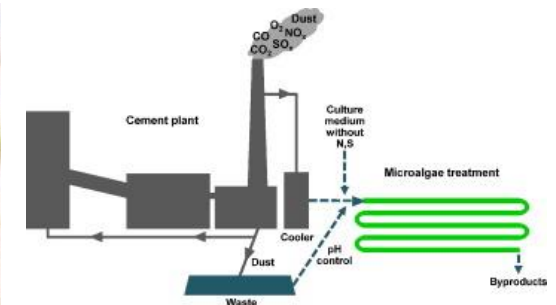
CO_2	$Y_{\text{CO}_2/\text{C}_x} = 1600-1900 \text{g/kg}$ de biomasse sèche
---------------	--

C/N ratio entre 4,2 et 7,8

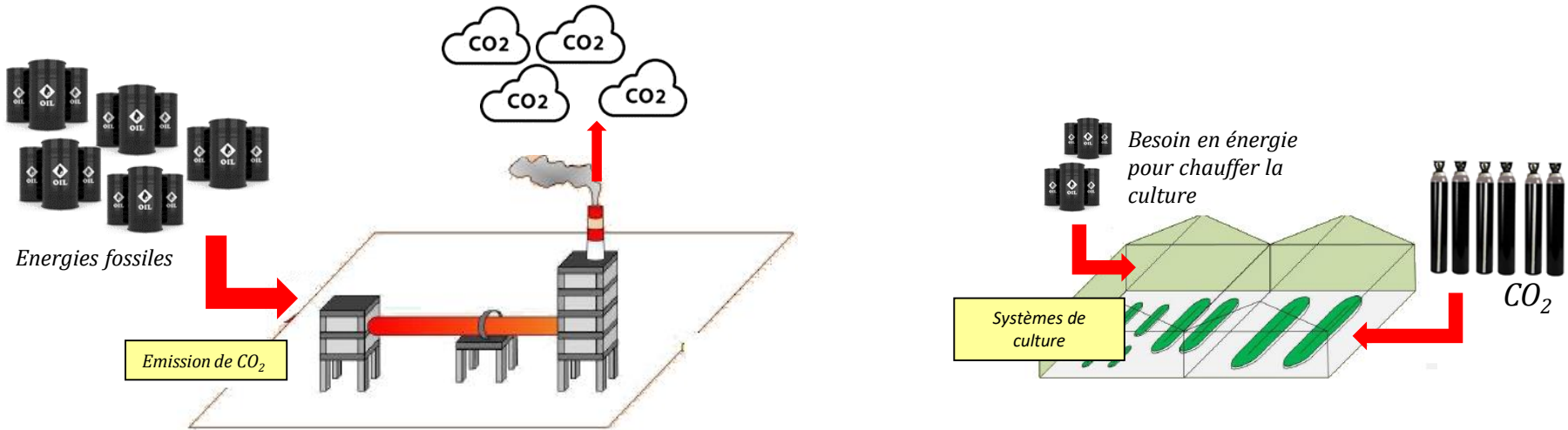
Culture sur eaux usées

- Urban wastewater : Nurdogan et Oswald, 1995
- Porc liver, Zhou et al., 2012
- Anaerobic digestion effluents

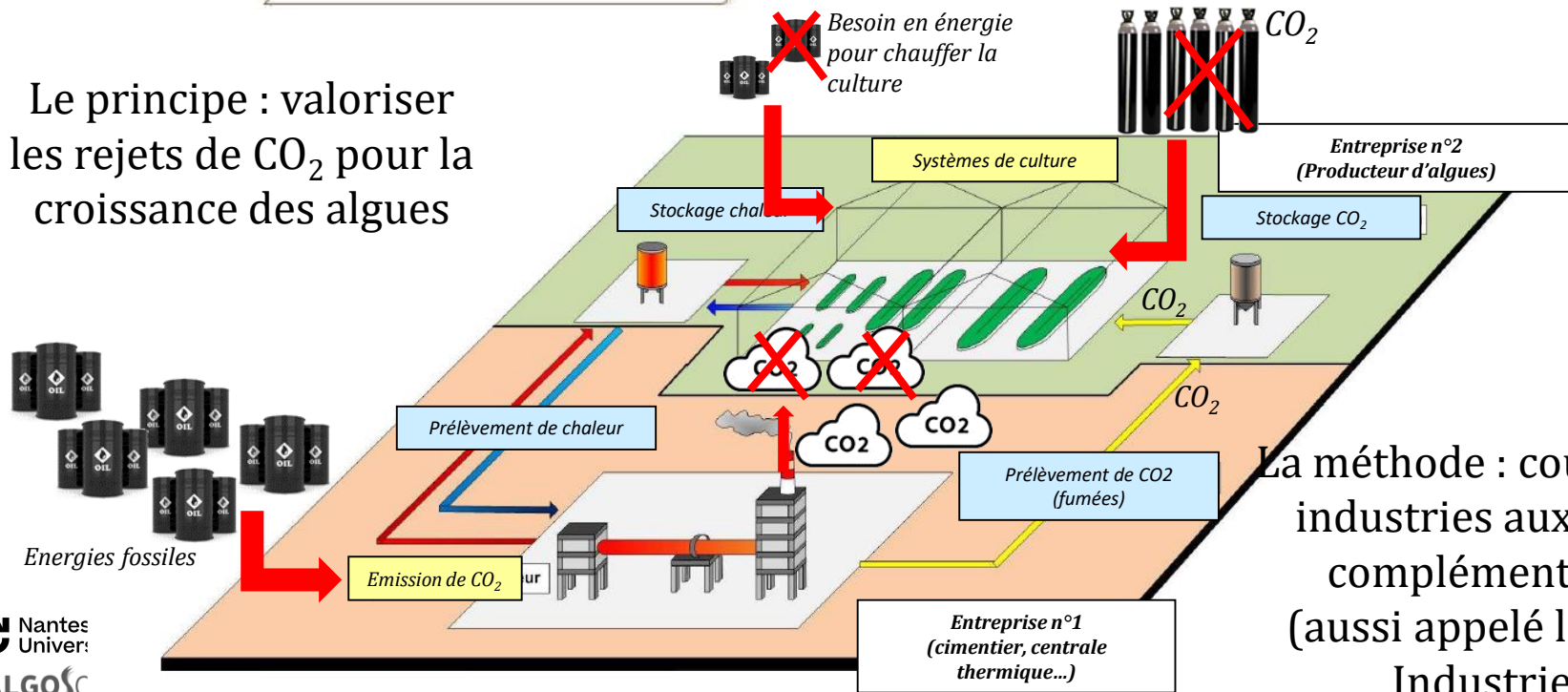
Culture sur effluents gazeux (CO₂ issu de fumées)



Les microalgues pour valoriser le CO₂ industriel



Le principe : valoriser les rejets de CO₂ pour la croissance des algues

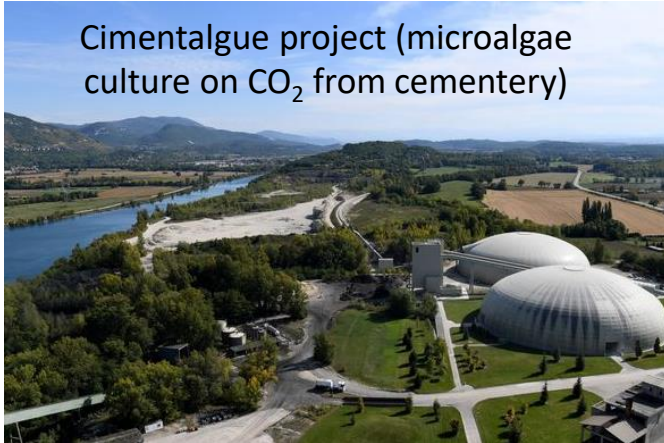


La méthode : coupler deux industries aux besoins complémentaires... (aussi appelé l'Ecologie Industrielle)²³

L'intégration de la culture de microalgues aux sites émetteurs de CO₂

L'approche « écologie industrielle » est un levier de développement de la production de masse de microalgues

Cimentalgie project (microalgae culture on CO₂ from cementery)



ALGO SOLIS
MICROALGAE R&D FACILITY

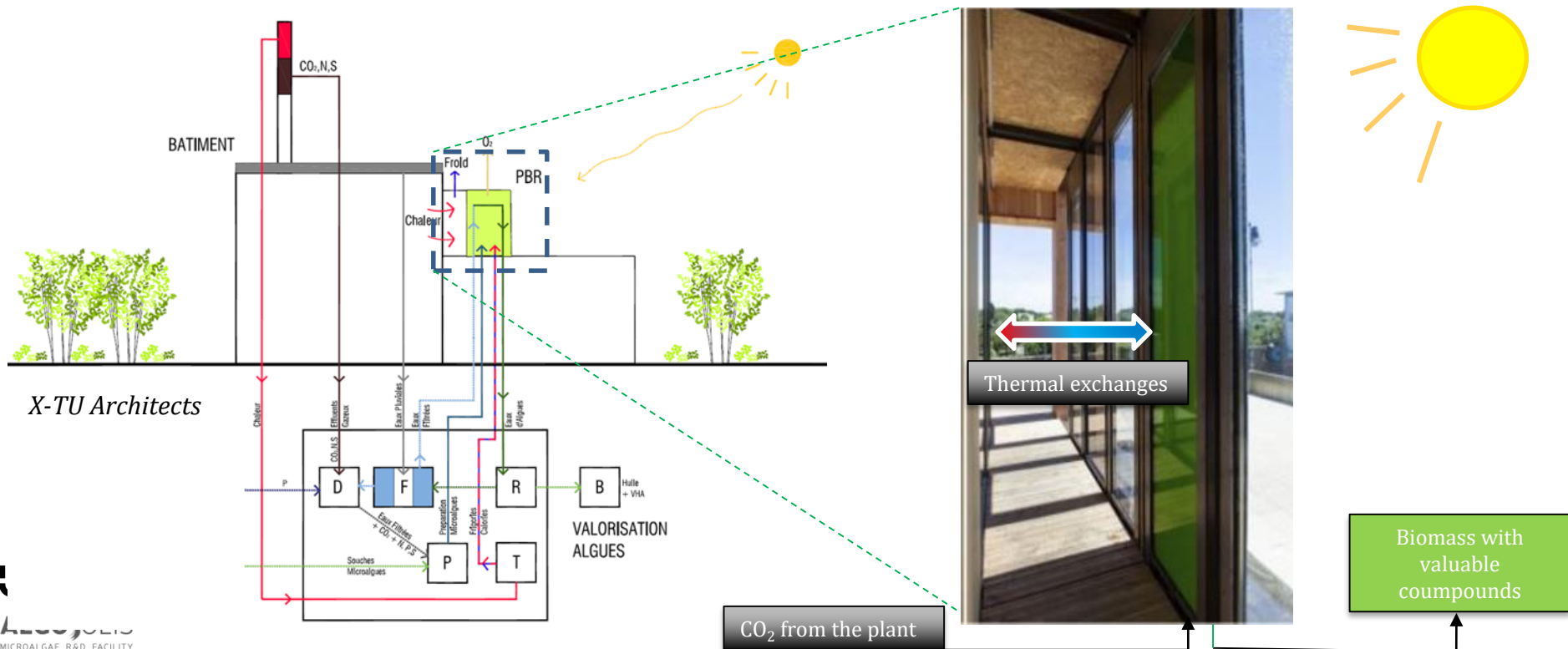


Microalgal culture on flue gas from burners



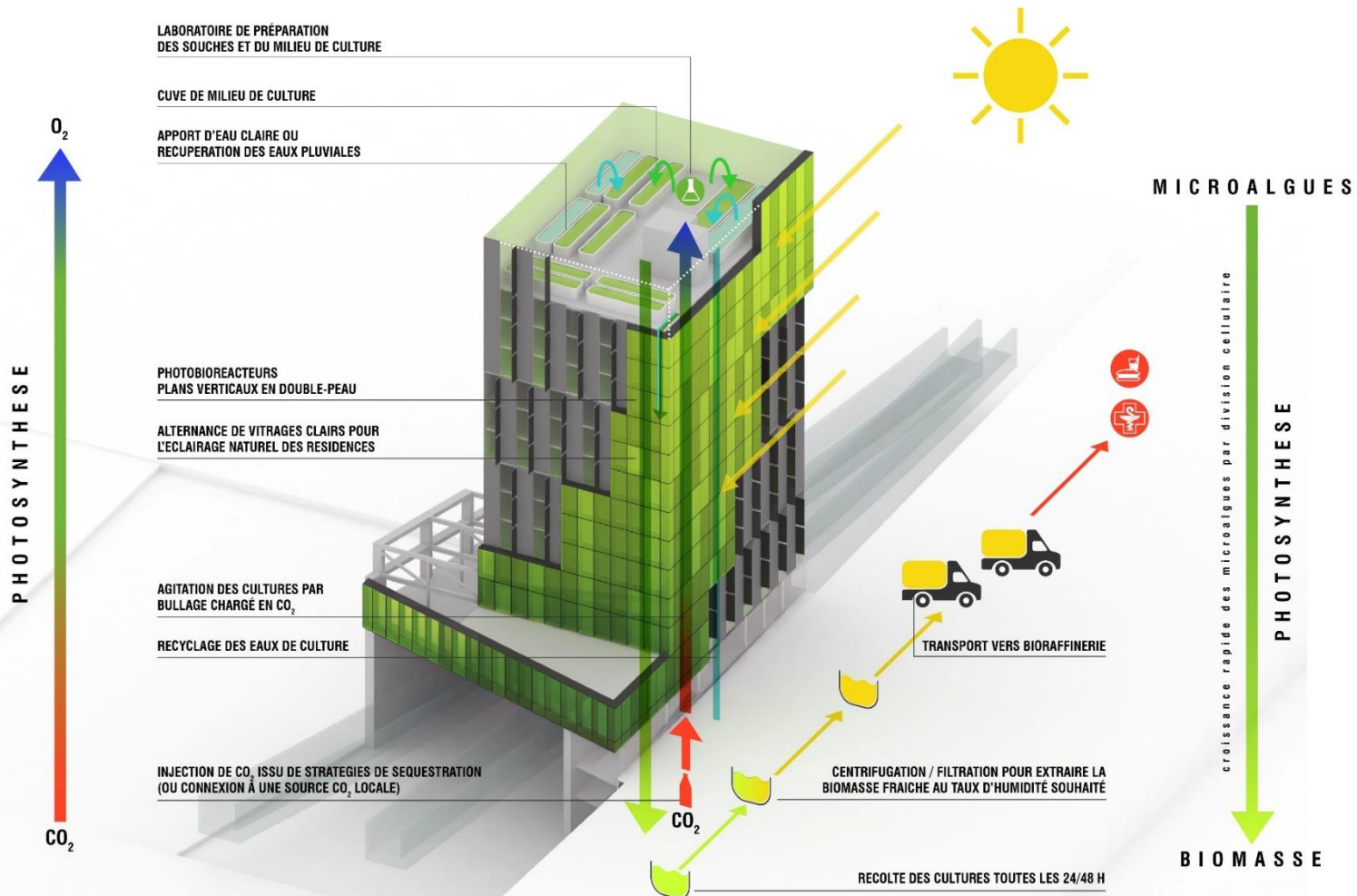
L'intégration urbaine : la culture en bio-façade

- Surfaces éclairées disponibles
- Partage de certains coûts (exemples : verre)
- Possibilité d'induire une symbiose avec le bâtiment support pour réduire les coûts opératoires (échanges thermiques, de CO₂...)



Culture de microalgues en façade de bâtiments

PRODUCTION DE MICROALGUES ET PHOTOSYNTHESE



Source X-TU Architects

Applications



Projet Symbio2
(CSTB, 2016)



Projet InVivo
(Paris 13eme, 2019)



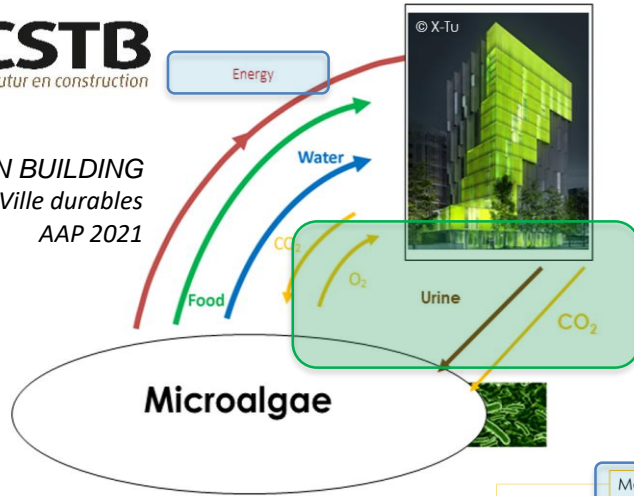
Symbio2Box
(Saint Nazaire, 2013)

La recherche spatiale pour des bâtiments durables

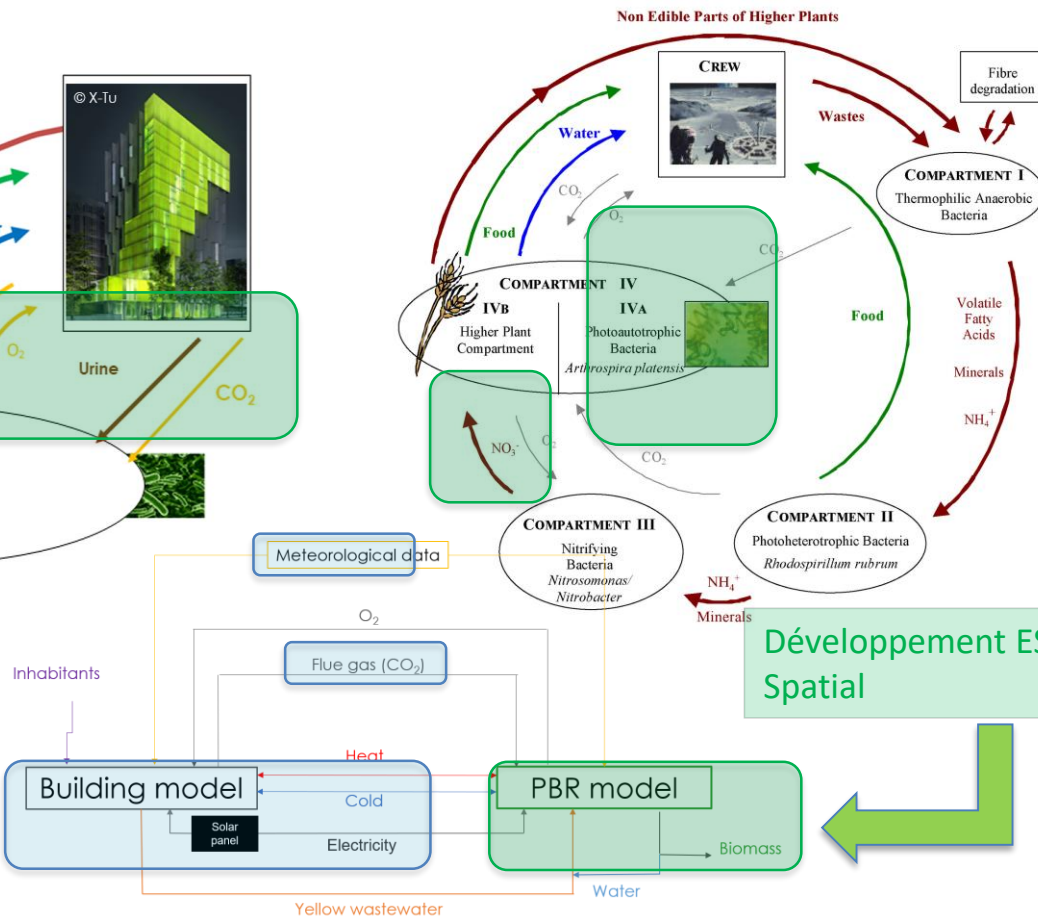
- L'intégration de photobioréacteurs pour la culture de microalgues en façade de bâtiments ouvre la perspective de réalisation de bâtiments durables, par traitement sur site des rejets du bâtiment.
- L'ESA développe des approches similaires pour les vols spatiaux habités au travers du projet MELISSA.



Projet GREEN BUILDING
Bâtiment & Ville durables
AAP 2021

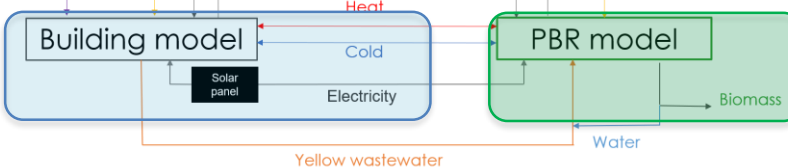


Transposition terrestre –
Développement Bâtiment



Projet MELISSA – ESA :
Boucle Support-vie pour
les vols habités

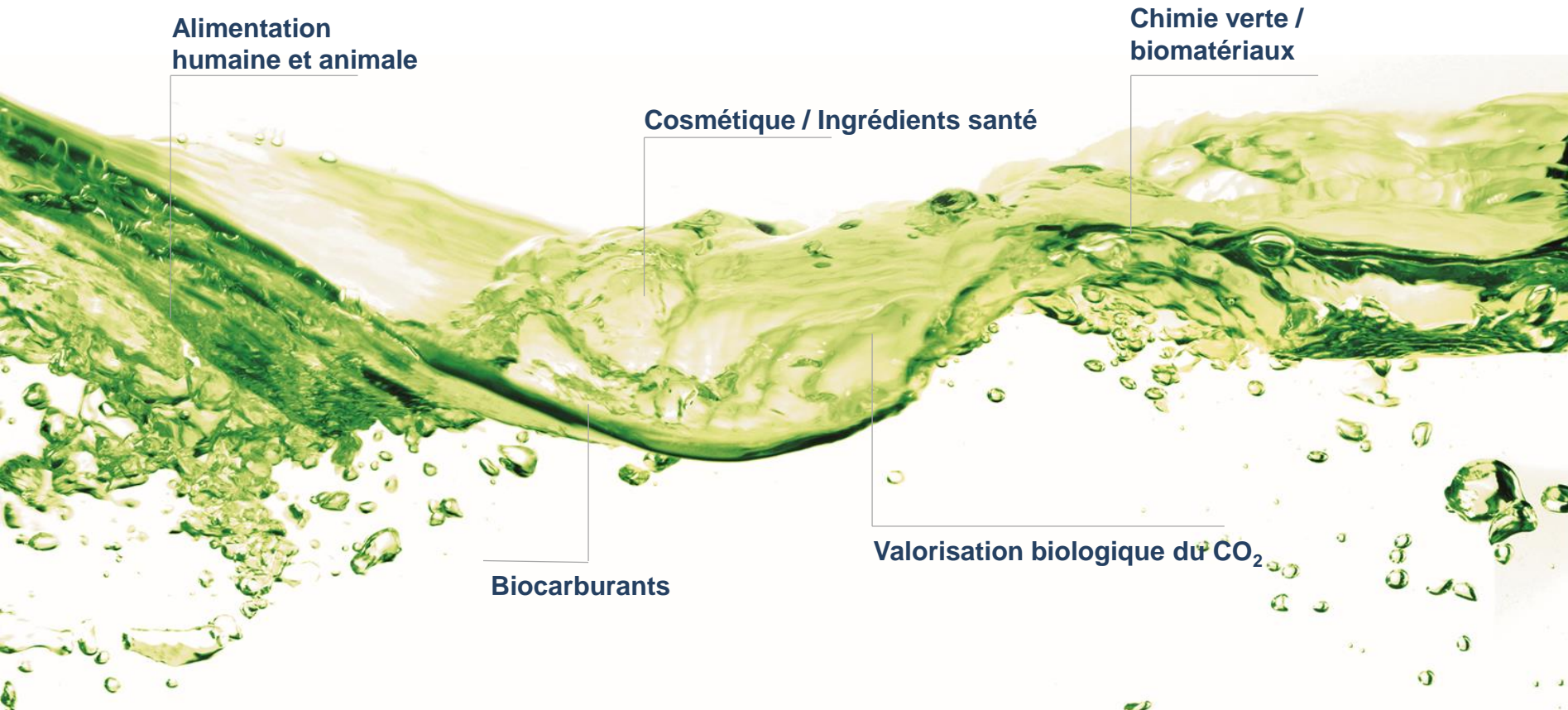
Développement ESA- Melissa -
Spatial



Modèles de connaissance

Et la réalité ???

Les microalgues, une bioressource aux nombreux débouchés

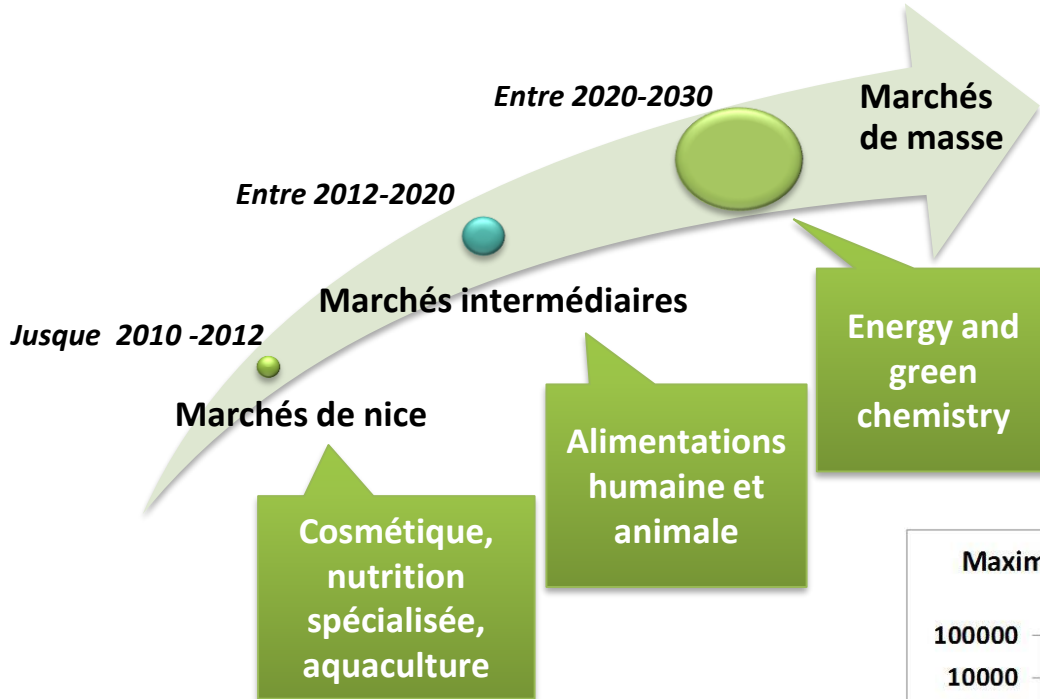


... mais une exploitation industrielle aujourd'hui limitée

**On produit autant de microalgues en un an,
que de céréales en 4 minutes !**

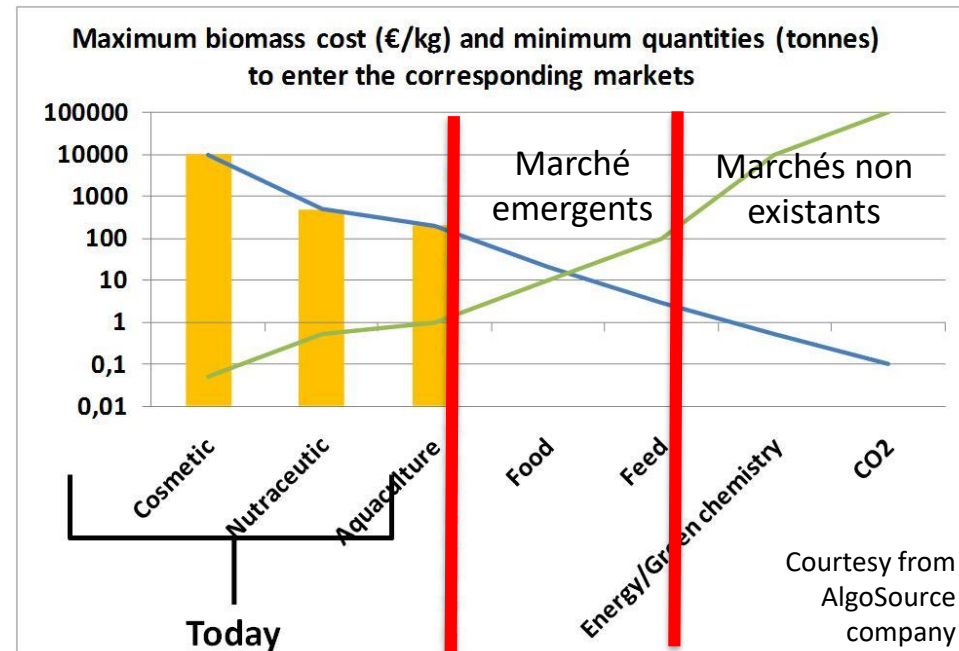
L'enjeu Cout/Volume de production

Projection des applications des microalgues (réalisé en 2010)



Les 2 critères majeurs pour de nouveaux marchés : le **volume** et le **coût**

- Coût de production > 5€/kg, souvent ~ 20-30€/kg
- Production mondiale d'environ 20-30 000t/and



Une industrie longtemps tirée (tirillée?) par sa promesse ultime: les biocarburants



the post algaefuels age

Aquatic Species Programme

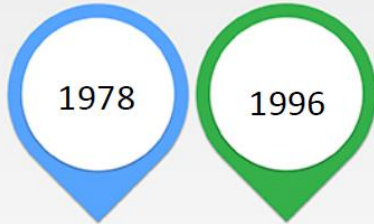


Table 1

Comparison of some sources of biodiesel

Crop	Oil yield (L/ha)	Land area needed (M ha) ^a	Percent of existing US cropping area ^a
Corn	172	1540	846
Soybean	446	594	326
Canola	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Coconut	2689	99	54
Oil palm	5950	45	24
Microalgae ^b	136,900	2	1.1
Microalgae ^c	58,700	4.5	2.5

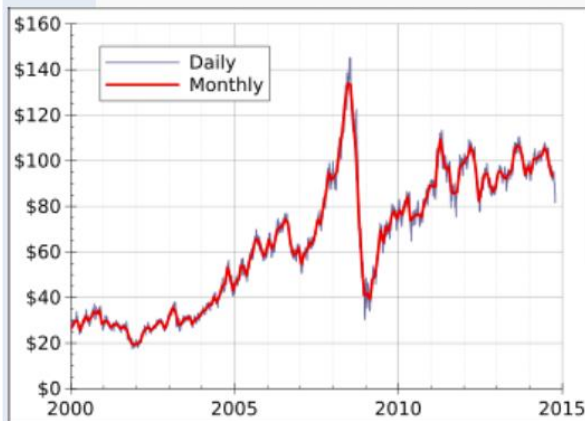
^a For meeting 50% of all transport fuel needs of the United States.

^b 70% oil (by wt) in biomass.

^c 30% oil (by wt) in biomass.

the age of algae for biofuels

today



Biotechnology Advances 25 (2007) 294–306

Research review paper
Biodiesel from microalgae

Yusuf Chisti*

Institute of Technology and Engineering, Massey University, Private Bag 11 222, Palmerston North, New Zealand

The most cited paper in the topic

Source Vitor V.Vieira (EABA, A4F)

Exemples de l'entreprise AlgoSource

Our journey towards sustainability

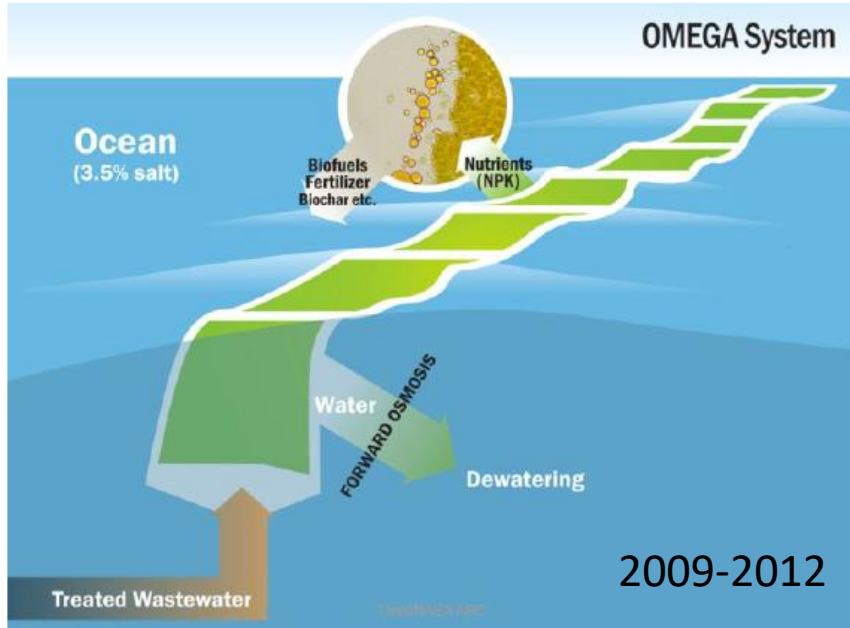


Source O.Lépine - AlgoSource

- 1993: Creation of Alpha Biotech
- 1995 First company to produce Spirulina in France
- 1998 Phycocyanin extraction patent: no solvents, water based, cold extraction, no drying
- Cultivation of all the classic strains in cheap affordable systems
- 2005: Biofuels from algae boom
- 2008 Shamash project: First production of biodiesel from autotrophic algae in Europe, First life cycle analysis (Lardon at all). Biodiesel tests with PSA
- 2012: Algoroute, first bitumen from algae using HTL, world wide patent
- 2014 Diesalg : HTL development, Economic modelling, Net Energy ratio calculation in different scenarios
- 2016 Biofat : production of biodiesel from Nannochloropsis. Engine tests
- 2017: Life Cycle analysis of Spirulina extract production
- 2017-2020: 5 M€ investment program, new plant construction

La conséquence majeure : l'entreprise est sensibilisée aux éléments de la production durable (mais ne commercialise pas de biocarburants)

Vers la production industrielle à grande échelle : une industrie émaillée d'essais-erreurs



Vers la production industrielle à grande échelle : une industrie émaillée d'essais-erreurs **et de réussite !!**



Création en 1992 et toujours actif (1000t/an, 40ha)



Création en 1985 et toujours actif (400t/an)



Our experience
in Designing,
Building and
Operating the
largest
PBRs with
more than
1.300 m3
for *Chlorella*
and
Nannochloropsis



Et depuis une dizaine d'années, la
technologie photobioréacteur se développe
pour la culture de masse

La réalité des applications en 2022

established applications



emerging applications



Une industrie à part entière aujourd'hui

	Asia mostly ... India, Japan and China	Europe ... Finland to Portugal, Iceland to Israel	America mostly US
Large companies	<p>final products</p> <p>the Largest companies in the sector</p> <p>small organic growth</p> <p><i>acquisition of smaller companies</i></p> <p>Product based, Gov. framework</p> <p>Euglena Co, Chlorella Ind, DIC, ...</p> <p>BGG, King Darmsa, Green-A, ...</p>	<p>ingredients</p> <p>The Fastest growing companies</p> <p>strategic alliances</p> <p>acquisition of large companies</p> <p>Product based, Business framework</p> <p>DSM, BASF, Corbion, Roquette,</p> <p>Astareal, Algatechnologies,</p>	<p>final products</p> <p>Large companies</p> <p>higher risk approaches</p> <p>investment driven,</p> <p>supported by Government</p> <p>Cyanotech, Heliae, Earthrise</p> <p>Solix, Alltech, Qualitas Health. ...</p>
SMEs and Startups	<p>Few companies except Spirulina in China</p> <p>Few Clusters, mostly Spirulina</p> <p>Product centric</p> <p>Government supported</p> <p>ingredients</p>	<p>Many SME companies</p> <p>strategic alliances</p> <p>Many clusters</p> <p>Science and Tecnology driven</p> <p>Involvement in R&D projects</p>	<p>Many startups</p> <p>hype & policy influenced</p> <p>Some clusters, some unique as AFA</p> <p>Technology driven</p> <p>final products</p>

L'industrie des microalgues en Europe (2015) :

- >430 entreprises (280 PME)
 - environ 4600 emplois
 - CA de 750M€ (<500tDW/an)
- (+ 300 groupes de recherche, soit environ 5000 emplois)

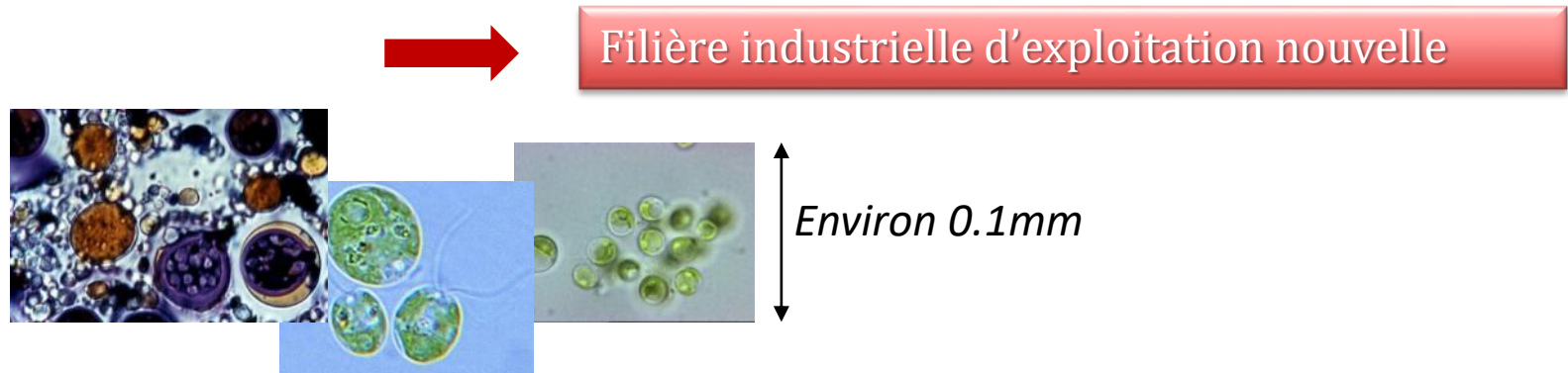
Et dans le monde :

- 2000 entreprises
- >30 000emplois
- CA > 2.6Milliards d'€

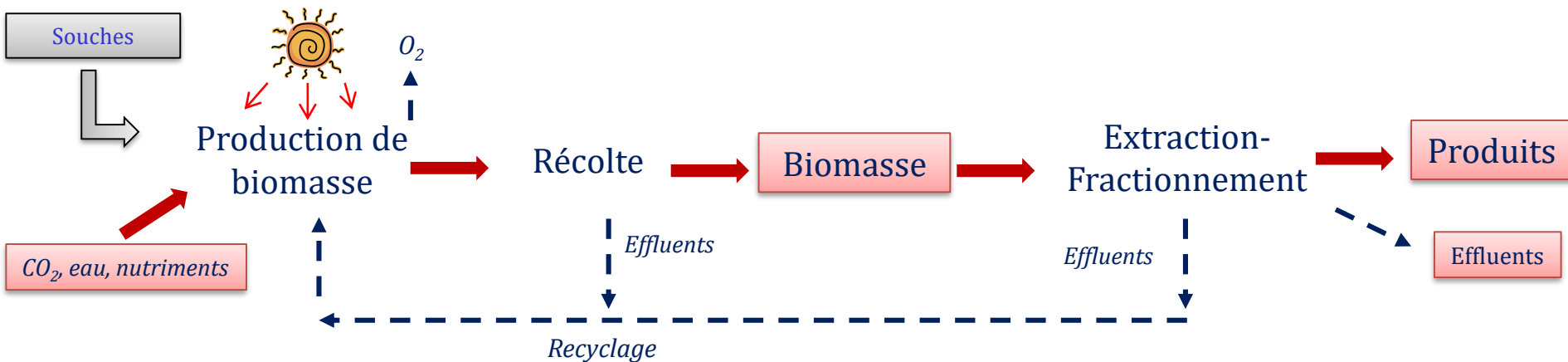
Les enjeux

Exploiter pleinement le potentiel des microalgues

- Bioressource très spécifique : microorganismes végétaux en milieu aqueux



- Besoin de procédés particuliers d'exploitation



Culture de microalgues : un enjeu technologique



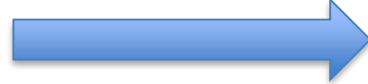
Le besoin d'une démarche intégrée procédés-produits

Le développement de l'industrie des microalgues est lié au développement de nouveaux produits commercialisables

Biomasse

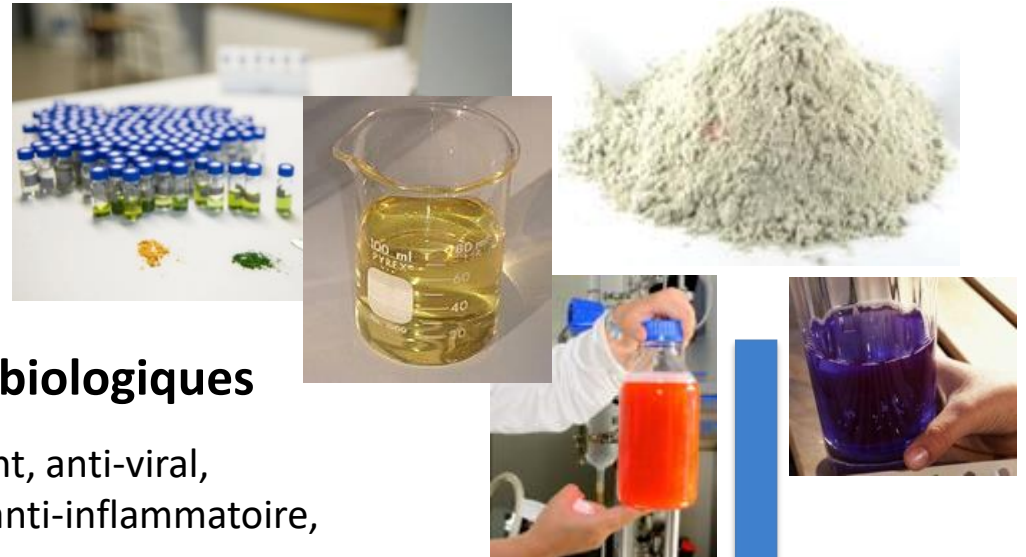


Bioraffinage



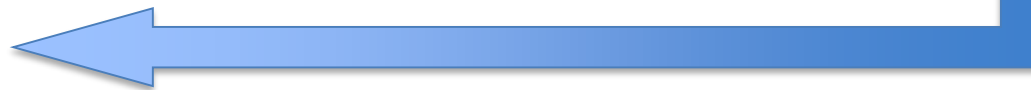
Extractions

Pigments anti-oxidants, Exopolysaccharides, Lipides - PUFAs, extraits protéiniques...



Activités biologiques

Anti-oxydant, anti-viral, texturant, anti-inflammatoire, hydratant ...



Produits fonctionnels

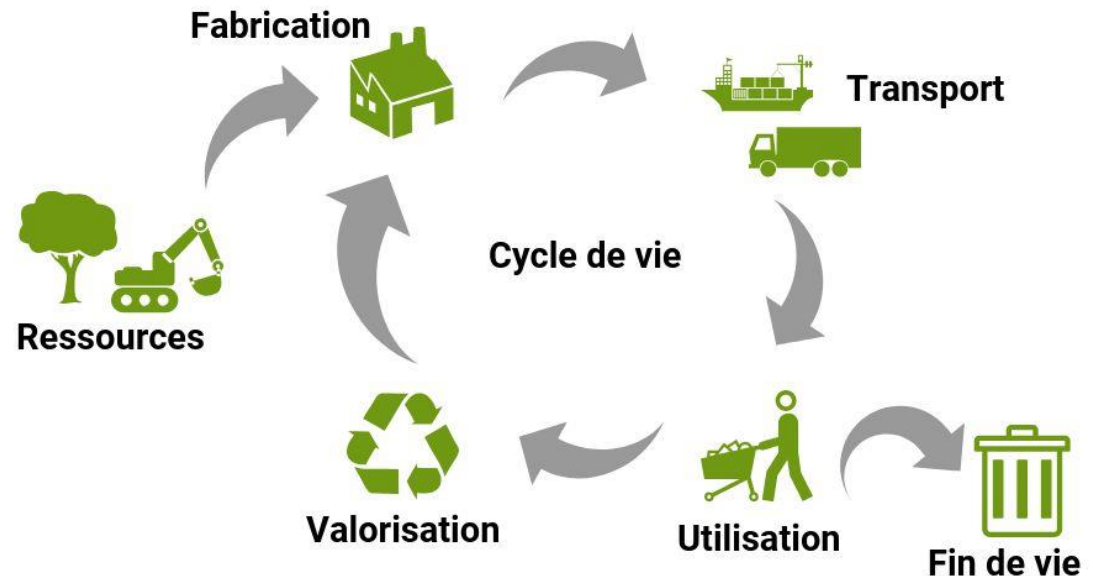


Un point clé : l'éco-conception

**La question-clé de la transition environnementale :
la solution proposée est-elle meilleure que l'existant ??**

Le développement de procédés (et de façon générale, de nouvelles technologies) est à adosser à une analyse globale de l'impact environnemental, dite ACV :

- Prise en compte de **l'ensemble des étapes et des flux entrants** (ex : matière première) et sortants (rejets), du « berceau à la tombe »
- Calcul **d'indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement**



L'ingénieur dispose aujourd'hui d'un outil normé (ISO 14040) :

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Emissions de CO₂ pour une culture de microalgues : quelques chiffres

Source O.Lépine + J.Pruvost
Conf. AlgaEurope 2021

Exemple : Production d'1kg de Spiruline sèche en France (Ouest)

Un total de **15 kg CO₂ par kg de Spiruline est émis*** :

- **Electricité: 3 kg CO₂/kg de Spiruline**
- **Infrastructure et maintenance : 5 kg CO₂/kg de Spiruline**
- **Nutriments et produits de nettoyage: 7 kg CO₂/kg de Spiruline**

**Culture d'Avril à Octobre, sans regulation thermique, en bassin, conditions optimales de culture, sans séchage ni congélation*



Pour comparaison : 1 kg de tomates sous serre en France → **12.5 kg eq. CO₂**

Données pour un mix électrique français : 0.12 kg eq. CO₂/kWh électrique

- Avec le mix chinois (0.766 kg eq. CO₂/kWh) : 30 kg CO₂ par kg de Spiruline
(18 uniquement pour l'électricité)
- Avec le mix allemand : 23 kg CO₂/kg de Spiruline

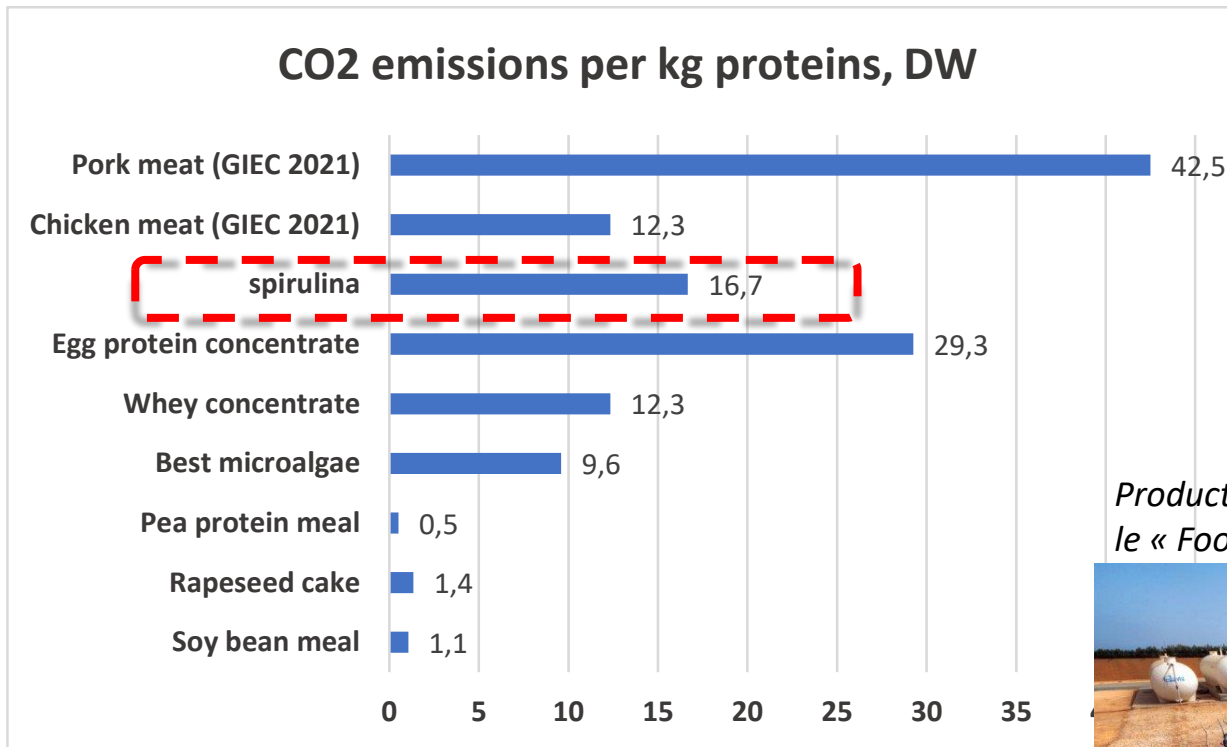
Note : en lumière artificielle, 1kg de microalgues aura besoin au mieux de 110 kWh d'électricité soit 12 kg de CO₂ en France

(et sans compter le refroidissement, équivalent à l'énergie électrique fournie !)

Un exemple : émissions de CO₂ par kg de protéines

L'un des enjeux de la transition industrielle alimentaire : **la production de protéines**

La Spiruline est l'une des biomasses ayant la plus forte teneur en protéines (60-70%) et elle est produite par photosynthèse (1kg de biomasse consomme biologiquement 1.6-1.8kg de CO₂)



Source O.Lépine + J.Pruvost
Conf. AlgaEurope 2021

L'analyse globale (ACV) montre que les microalgues ne sont pas forcément la meilleure solution... (à l'heure actuelle)

Production de microalgues au Qatar : le « Food Security issue »



Mais ce n'est pas le seul critère : enjeux de l'**usage des sols, en particulier non arables, et sécurité d'approvisionnement (pays désertiques)**

→ 2 notions non prises en compte dans l'ACV

Le levier technologique dans la réduction de l'empreinte environnementale

Scenario étudié : Production d'une tonne de biomasse sèche

Etape de culture



Façade PBR



Raceway



45° inclination PBR



AlgoFilm© PBR
(ultrathin system)

8 g/m²/day
200g/m³/day
Mixing 0.35 kWh/m³
Thermal regulation 1.1 kWh/m³
(0 if optimal symbiosis)

5 g/m²/day
10 to 30 g/m³/day
Mixing 0.1 kWh/m³
Thermal regulation 0 kWh/m³
(no regulation)

13 g/m²/day
260g/m³/day
Mixing 0.35 kWh/m³
Thermal regulation 1.1 kWh/m³

13 g/m²/day
6000g/m³/day
Mixing 0.35 kWh/m³
Thermal regulation 1.1 kWh/m³
(0 if passive regulation)

Etape de récolte

Harvesting
(30%DW)

Biomass thermal drying
(95%DW)

Centrifugation

Thermal drying

Dry biomass



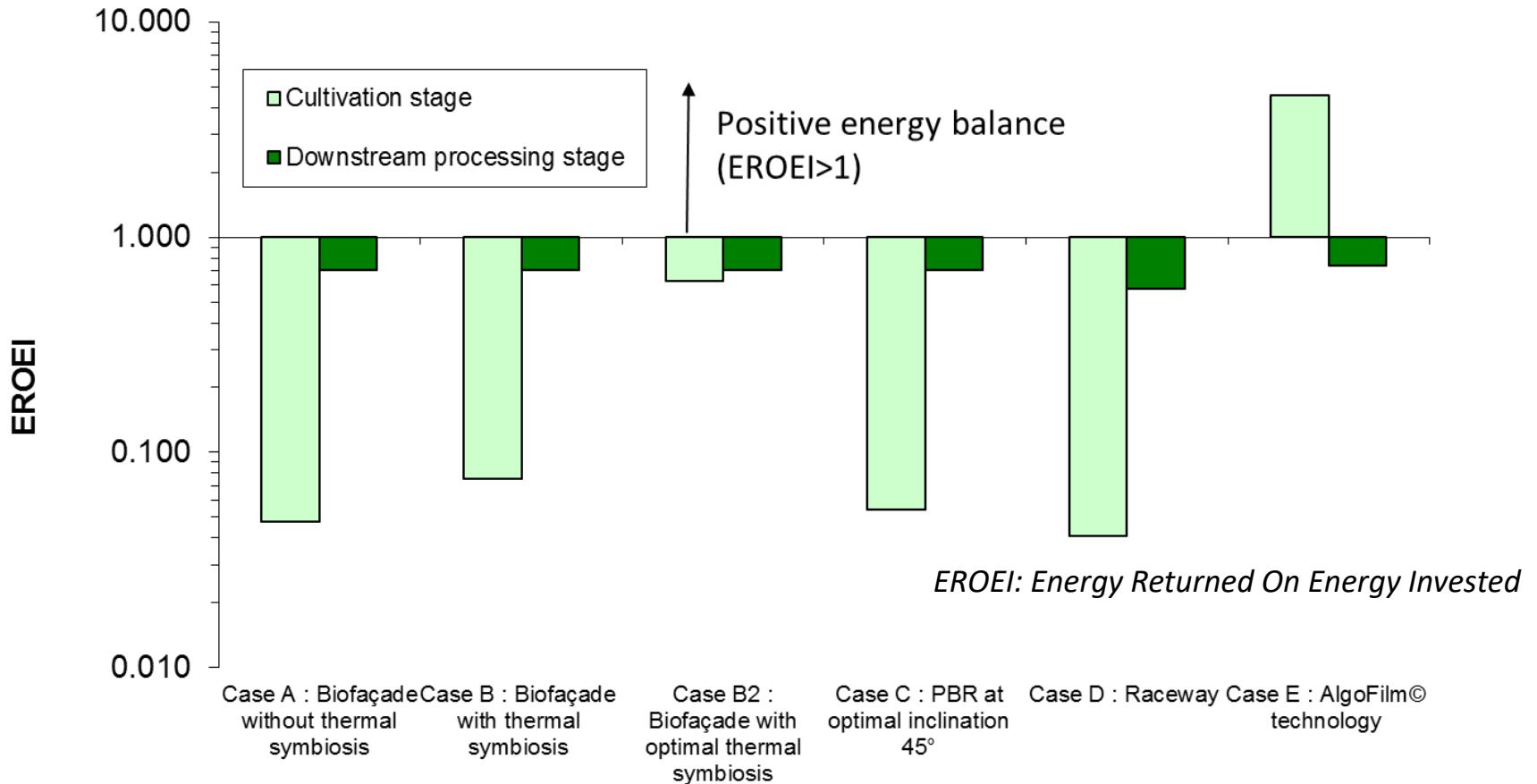
2-10 kWh/m³
3.5 kWh/kg DW

800-2500 kWh/m³

Le levier technologique dans la réduction de l'empreinte environnementale

Analyse restreinte à la consommation énergétique

Cas simulé:
Culture et séchage de biomasse



La quantité d'eau utilisée par m² de culture a un impact majeur sur la consommation énergétique : **ici, seul le système intensifié type AlgoFilm permet d'envisager une production à énergie positive**

Réduction des émissions de CO₂ : culture intensifiée et écologie industrielle

Exemple : Production d'1kg de Spiruline sèche en France (Ouest) avec écologie industrielle

2 leviers majeurs :

- L'intensification permet de réduire d'un facteur 100 environ le besoin énergétique
- L'écologie industrielle permet d'utiliser le CO₂ issu des fumées industrielles et d'étendre la culture à toute l'année (valorisation de chaleur fatale)



Un total de **5.3 kg CO₂ par kg de Spiruline est émis*** (-70% comparé aux bassins classiques) :

- Electricité: 0.3 kg CO₂/kg de Spiruline (-90% comparé aux bassins classiques)
- Infrastructure et maintenance : 2 kg CO₂/kg de Spiruline (-60% comparé aux bassins classiques)
- Nutriments et produits de nettoyage: 3 kg CO₂/kg de Spiruline (-60% / aux bassins classiques)

* Cela permet de gagner 10 kg CO₂/kg de Spiruline
Mais, au final, environ 200 tonnes de CO₂ émis/ha/an

→ 5 fois plus que le CO₂ capté dans la biomasse (1,8 kg/kg)

Source O.Lépine + J.Pruvost
Conf. AlgaEurope 2021

Note : L'azote devient le principal émetteur → utilisation d'azote issu d'effluent industriel ?

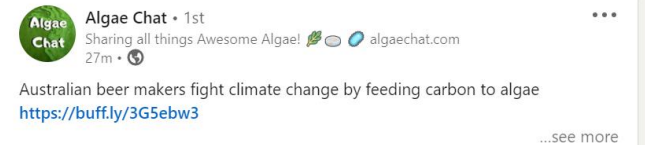
De la communication autour des microalgues...

« Nos bio-procédés permettent la décontamination tertiaire, la réduction de l'azote et du phosphore, **le captage massif du CO₂** et la préservation des écosystèmes »

« La culture de microalgues permet de participer à la lutte contre le réchauffement climatique provoqué par l'activité humaine, grâce à la capture du CO₂. En effet, pour 1 kg de microalgues produites (en matière sèche), 2 kg de CO₂ sont captés. Très propre, la production de microalgues n'entraîne aucun rejet polluant, **l'oxygène étant la seule émission produite.** »



« Un curieux mobilier urbain, capable d'absorber autant de gaz carbonique qu'une centaine d'arbres grâce à ses microalgues qui rejettent l'oxygène. »



Une ACV rigoureuse permettrait de tempérer certains propos

L'écosystème nanto-nazairien

Le laboratoire GEPEA (UMR-CNRS)

Chiffres-clés :

- Environ 230-240 personnes (77 chercheurs)
- 5 équipes de recherche, 4 plateformes (AlgoSolis, Prever, SafeAir, Flavor) et 3 plateaux techniques (Baking, Mars, EASI)
- Impliqué dans 3 DUT, 3 Ecoles d'Ingénieurs, 1 Master international
- Production annuelle: 100 publications ACL, 40 projets obtenus(4-5M€), 20 thèses soutenues

Plus d'infos : www.gepea.fr
+ RS (Linkedin, Twitter)

Campus de Saint-Nazaire

IMT Atlantique

IUT de Nantes



IUT de la Roche-sur-Yon

ONIRIS Géraudière

Le Génie des Procédés pour l'essor de l'Usine du Futur et la réponse aux enjeux des **transitions environnementales, énergétiques, et alimentaires** :

- **Gestion sobre et optimisée des (bio)ressources** (nouveaux sourcing alimentaires, approches intégrées procédés-produits, réduction d'empreinte industrielle),
- **Préservation de la qualité de vie** (écotechnologies pour la qualité de l'environnement air eaux, procédés de co-valorisation matière-énergie de résidus ou déchets industriels, procédés d'exploitation de ressources marines et en particulier *microalgues*).

AlgoSolis: une plateforme de recherche dédiée au développement industriel de nouvelles applications basées sur les microalgues



Culture solaire



Photobioréacteurs couche mince

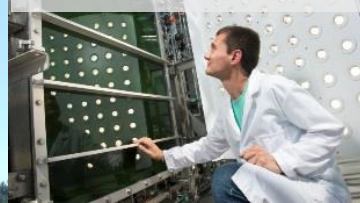
« © Jean-Claude MOSCHETTI/AlgoSolis/CNRS Photothèque ».



UNIVERSITÉ DE NANTES



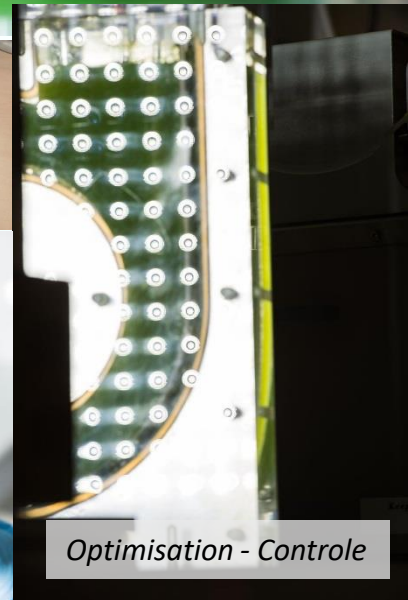
Culture lumière artificielle



Biocarburants



Bio-bitume



Optimisation - Contrôle



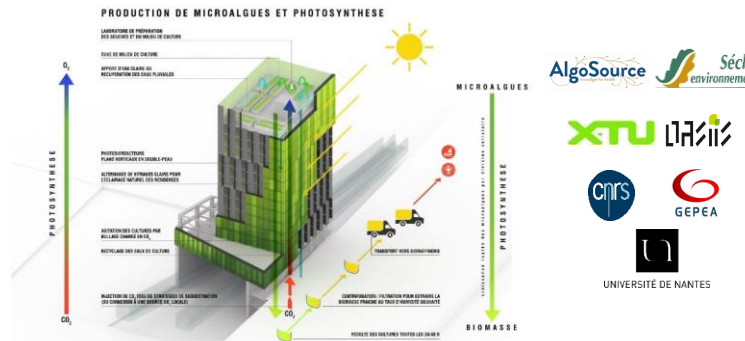
Santé-Cosmétique

Plus d'infos : www.algosolis.com
(aussi sur LinkedIn, Twitter)

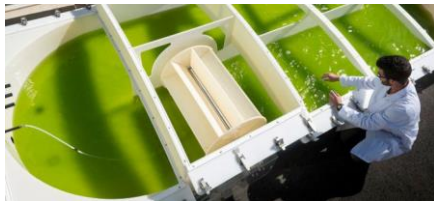
L'écologie industrielle et les microalgues : projets en cours



Projet Cimentalgie : Valorisation du CO₂ issu de cimenterie



Projet PIAN (PIA): Déploiement de la culture de microalgues en Guyane sur un site industriel de la SARA pour valorisation du CO₂ en biomatériaux et biocarburants 3G.



- Projet FUI Symbio2 : Photobioréacteurs de façades pour l'amélioration des performances thermiques de bâtiment
- Projet CNRS-CSTB « Bâtiments Durables » GREEN BUILDING : traitement de l'urine de bâtiments



Projet AlgoStep : Valorisation des effluents de STEP



Le GEPEA et AlgoSolis au cœur des projets majeurs du domaine

Conclusion

Les microalgues : une origine très ancienne, une jeune histoire scientifique, et un incroyable potentiel pour l'avenir car au cœur de solutions durables pour l'industrie de demain

Il y a 3 Milliards d'années : les microalgues apparaissent

Fin du 19^{ème} siècle : premières cultures en milieu artificiel de microalgues

Années 1980-1990 : premiers exemples d'exploitations industrielles (mais application ciblées)



20-30 ans de recherche et développement industriel

Années 2010: Emergence forte de la filière industrielle « Microalgues »

Emergence d'applications dans de nombreux domaines pour des enjeux majeurs de demain :

- Biocarburants
- Valorisation biologique d'effluents (écologie industrielle)
- Chimie verte (bioplastique, colles...)
- Vols spatiaux
-

Et l'histoire (et le travail) n'est pas finie !

Atlantic ocean

La Baule

Saint-Nazaire

GEPEA lab. (CRTT)



AlgoSolis R&D facility

Polytech'Nantes

Graduate school of the University of Nantes
Process and Bioprocess Engineering

 Nantes
Université



Merci pour votre
attention

www.gepea.fr
www.algosolis.com

Sources et liens utiles

Plus d'infos sur l'auteur (J.Pruvost) :

[Production scientifique \(base de données HAL – Archives ouvertes CNRS\) :](#)

[Liste de publications Google Scholar](#)

[Lien Research Gate](#)

[CV développé \(page personnelle - Université de Nantes\)](#)

Plus d'infos :

[Laboratoire GEPEA](#)

[Plateforme AlgoSolis](#)

Liens aux formations:

[Ecole d'Ingénieurs Polytech Nantes \(dept. Génie des Procédés et Bioprocédés\)](#)

[International Master Degree in Microalgae Bioprocess Engineering](#)

Suivre nos actualités:

- GEPEA : [Twitter](#) et [LinkedIn](#)
- Plateforme AlgoSolis : [LinkedIn](#)
- J.Pruvost : [Twitter](#) et [LinkedIn](#)

