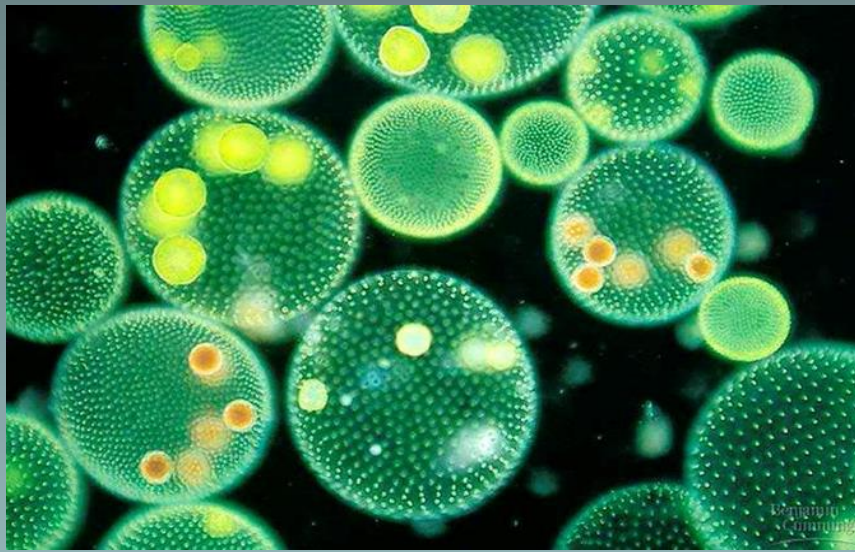


Les microalgues dans la filière aquacole française: ressources actuelles et perspectives

Catherine DUPRE, Dominique GRIZEAU, Jack LEGRAND*
GEPEA - UMR 6144 CNRS/Université de Nantes/IMT
Atlantique/ONIRIS

Gholamreza DJELVEH, Philippe MICHAUD
Institut Pascal - UMR CNRS 6602 – Université de Clermont
Auvergne



Microalgues, Cyanobacteries

Croissance par photosynthèse :

Milieu entièrement minéral (organismes autotrophes),
par absorption en milieu aqueux des minéraux
nécessaires et du **carbone inorganique** environnant
grâce à la **lumière captée** .

Photosynthèse

- Grande diversité (longue évolution)
- Biochimie très variée
- Vitesse de croissance élevée

- Teneur élevée en **protéines**
- **Carbohydrates** : amidon, sucres, glucose, polysaccharides
- **Lipides** : Glycérols, acides gras saturés ou pas (w_3 , w_6) (de 1 à 70% de la matière sèche)
- **Pigments** : caroténoïdes, phycobiliprotéines

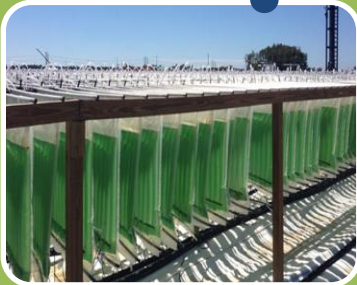
Culture: les diverses voies

Open bond (OP)



- Infrastructure peu chère et en général pas d'usage de terre agricole
- système plutôt robuste, possibilité d'utiliser des zones de types carrières, lagunes
- Mais ouvert aux attaques/pollutions externes. Impact si déversé à l'extérieur (à priori les algues optimisées survivent mal en milieu naturel. Risque OGM?)
- surface importante et plane (pente max 5%)
- Sensible aux variations de T (varier les cultures au fil de l'année est peu envisageable, Bâche (serre) pour tenir la T)
- Sensible à l'évaporation ($1 \text{ to } 3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} / \text{an}$ et variable selon le lieu)

Photobioréacteur (PBR)



- Place limitée; pas de terre agricole; risque perte souche OGM limité
- Possibilité de source lumineuse artificielle (financement) ;
- Meilleur contrôle de l'injection de CO₂ et des conditions d'échange (turbulences, injections des gaz et nutriments)
- Productivité volumique plus grande
- Mais infrastructure/ investissement et opérationnel + cher
- Refroidissement nécessaire (Solix par ex immerge des sacs pour maintenir T)
- Accumulation d'oxygène

Fermenteur (hétérotrophe)



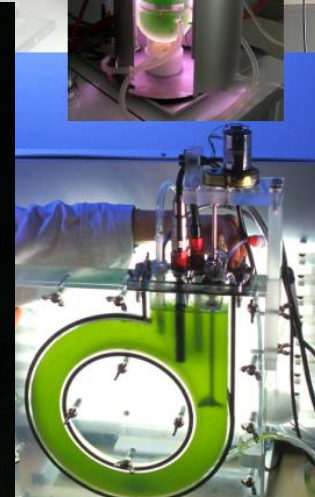
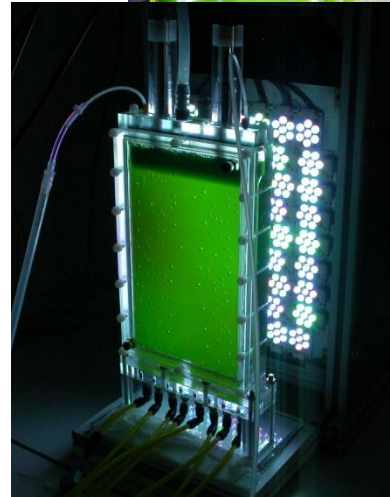
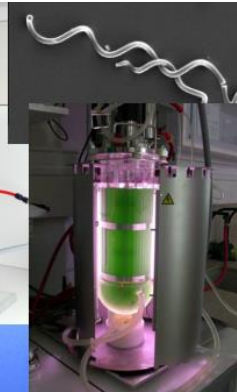
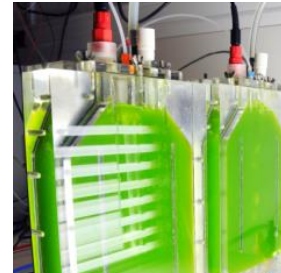
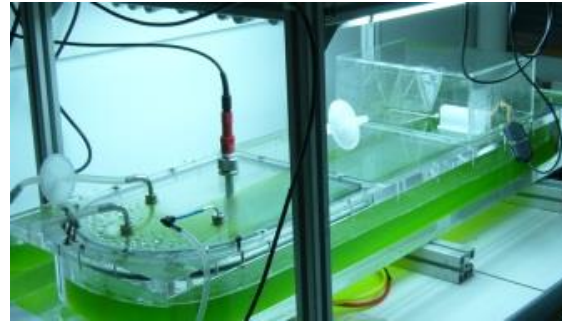
- Moins de risque de contamination et très haute productivité volumique
- Plus d'usage du CO₂ (cycle de vie du biofuel moins bénéfique)
- Possibilité de mixer les approches (fermenteur avec flash lumineux)
- Mais moins de souches disponibles

Photobioréacteurs : croissance limitée par la lumière

Classification:

- Lumière artificielle ou solaire
- Systèmes fermés ou continus
- Cuve cylindrique, système plan ou tubulaire
- Cellules libres ou immobilisées
- Agitation mécanique ou airlift

Pour une souche et une géométrie donnée, l'efficacité d'un PBR is totalement dépendente de la lumière reçue



Formes de distribution

- **Aquaculture : Pates**

Généralement entre 5 et 15% de matière sèche dans différentes formulations

- **Alimentation animale et humaine : Produits secs**

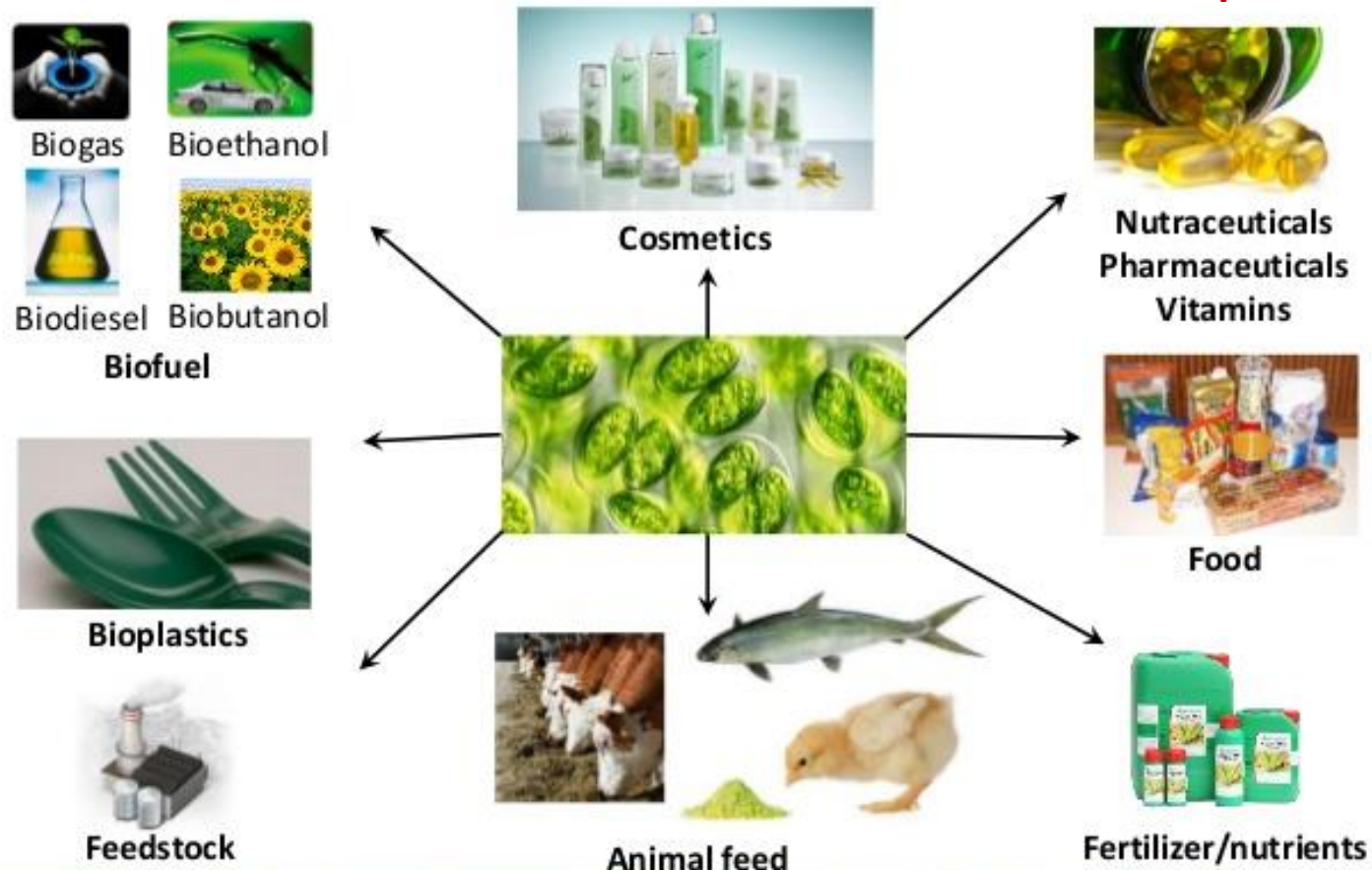
Séchage par spray ou congélation

- **Cosmétique - Neutraceutique : Extraction**

Solvants – Extraction supercritique – Extraction mécanique

Commercial Uses of Algae

30 000 tonnes de microalgues sont commercialisées par an

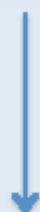


**Marché
annuel 3
millions \$**



APPLICATIONS

**Current
applications**



**Emerging
applications**

Food	Feed	Health	Cosmetics
Food ingredients	Premix feeds	Nutraceuticals	Cosmeceuticals
Healthfoods	Specialty feeds	Pharmaceuticals	Thalassotherapy
Fuels	Fertilizers	Wastewater	Chemicals
Biofuels	Biofertilizer	N&P removal	Biofibers
CO ₂ mitigation	Soil microalgae	Bioremediation	Chemical industry



Microalgae for Feeds

Market Sector	Microalgae Species / Examples	Active Compounds	Process
AQUACULTURE	Bivalve molluscs: <i>Isochrysis sp.</i>, clone T-Iso; <i>C. gracilis</i>; <i>C. calcitrans</i>; <i>T. suecica</i>; <i>T. pseudonana</i>, clone 3H; <i>P. lutheri</i>; <i>I. galbana</i>; <i>S. costatum</i> Penaid Shrimp: <i>Tetraselmis chui</i>, <i>Chaetoceros gracilis</i>, and <i>Skeletonema costatum</i> Fish Feeds, <i>Hypneacervicornis</i> and <i>Cryptonemia crenulata</i> Marine fish larvae "Green Water": <i>Chlorella sp.</i>, <i>Isochrysis galbana</i>, <i>Tetraselmis chui</i>, (adults): <i>Chlorella sp.</i> & <i>Spirulina sp.</i> Salmonids: <i>Haematococcus</i> (astaxanthin)	Aminoacids, Lipids (PUFAs), Vitamins, Minerals	Microalgae meal and cake introduced in the organisms' diet (daily feed, specific physiological stages or stress). Algae can be added during the non-feeding nauplius stage so that algae are available immediately upon molting into the protozoa stage.
ORNAMENTAL FISH	<i>Spirulina sp.</i> , <i>Dunaliella sp.</i> <i>Chlorella vulgaris</i>	Pigments (phycocyanin, beta-carotene and other carotenoids)	Carotenoids improve and intensify the coloration in fish



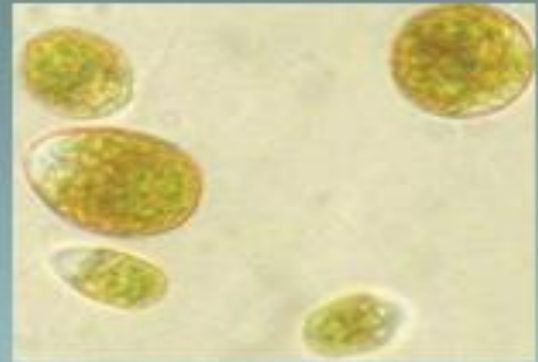
Microalgae for Feeds

Market Sector	Microalgae Species / Examples	Active Compounds	Process
FARM ANIMALS	Poultry: <i>Arthrospira sp.</i> , <i>Chlorella sp.</i> , <i>Porphyridium sp.</i> , Astaxanthin from <i>Haematococcus sp.</i>	Proteins	Partial (5-10%) replacement for conventional proteins, resulting in 10% less consumed food and lower cholesterol levels. Egg yolk have reduced cholesterol levels, increased linoleic and arachidonic acid levels, and higher Carotenoid production.
	Swine: <i>Schizochytrium sp.</i> (sold as algae...)	DHA	DHA-rich microalgae from <i>Schizochytrium sp.</i> . Administered in the diet results in a higher weight gain and feed conversion efficiency.
PETS	Pets: <i>Arthrospira sp.</i> and <i>Chlorella sp.</i> Competition animals: <i>Arthrospira sp.</i> , Astaxanthin from <i>Haematococcus sp.</i>	Proteins, Fatty Acids & Carotenoids	Proteins and Fatty Acids as ingredients for petfood industry, have health-promoting effects as external appearance effects (shinny hair, beautiful feathers). Benefits associated to microalgae are associated to an enhanced resistance and recovery of muscle electrolyte balance, its overall antioxidant role, prevention of myocardial (heart) lesions and joint health. High levels of chlorophyll in blue green algae have also been associated to an enhanced blood detoxifying capacity after strenuous exercise.

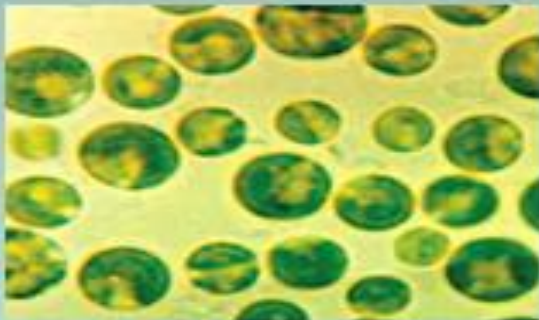
Les espèces les plus cultivées



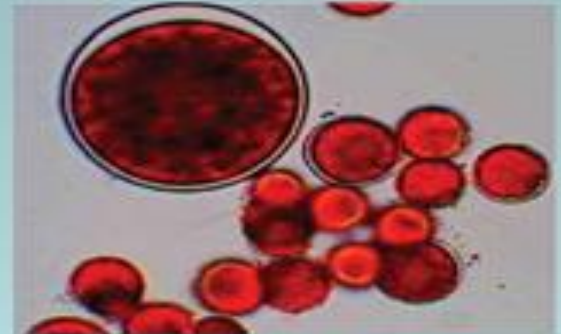
Arthrospira platensis



Dunaliella salina

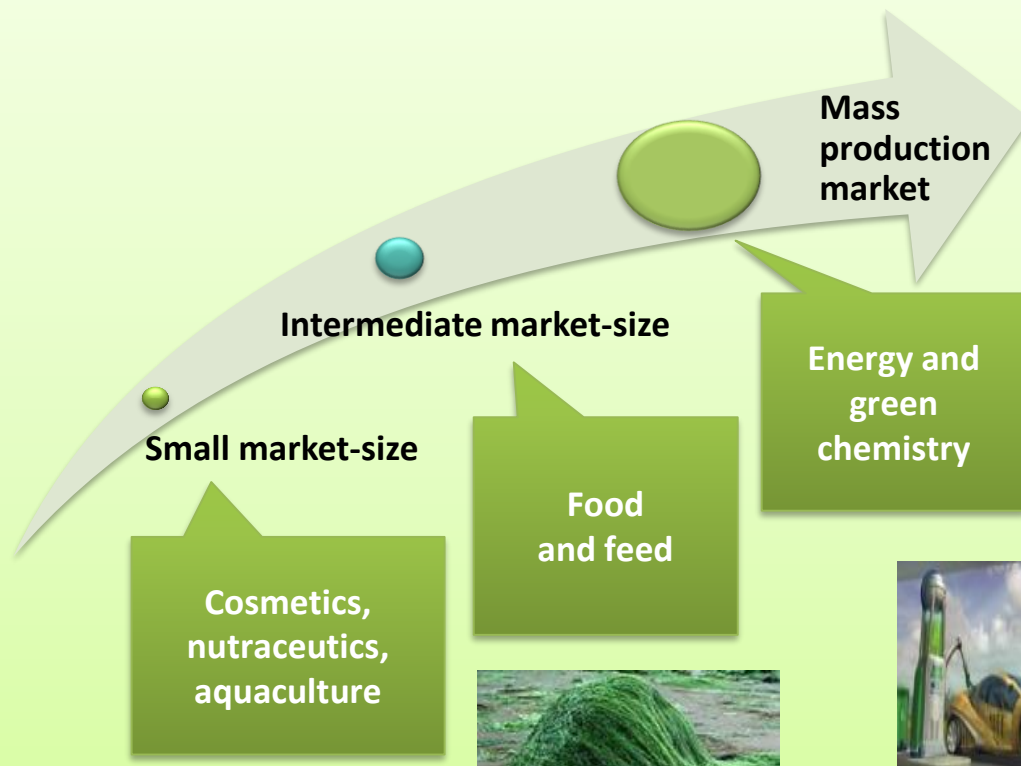


Chlorella vulgaris



Haematococcus pluvialis

Exploitation industrielle des microalgues

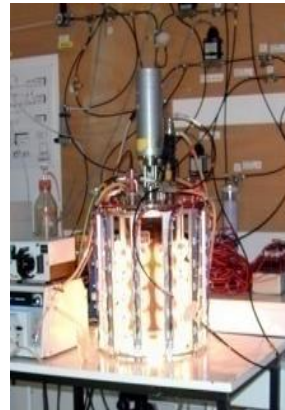
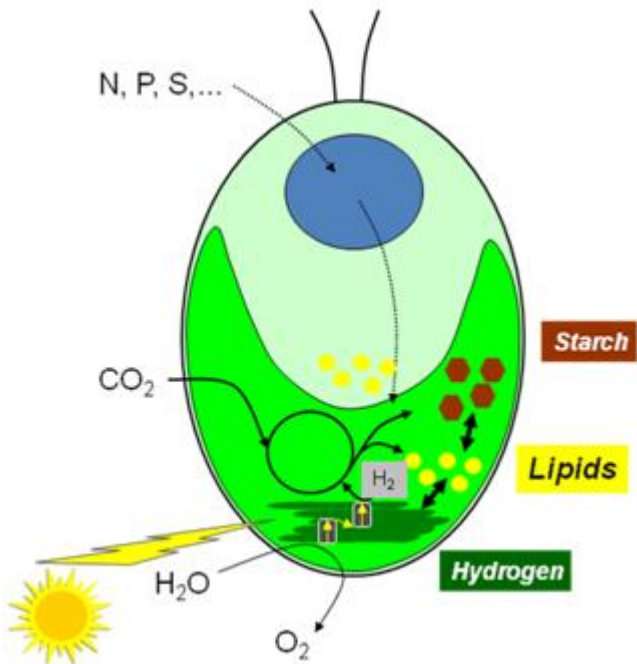


Composition of *C. vulgaris*

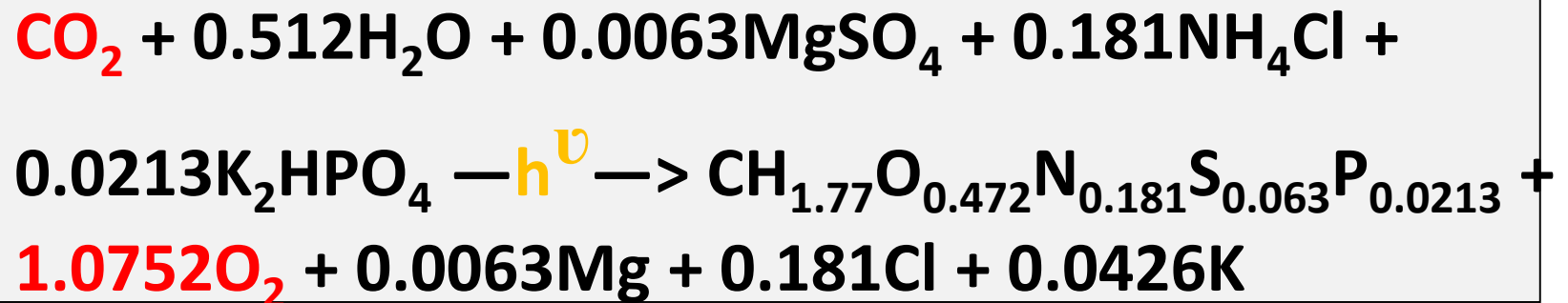
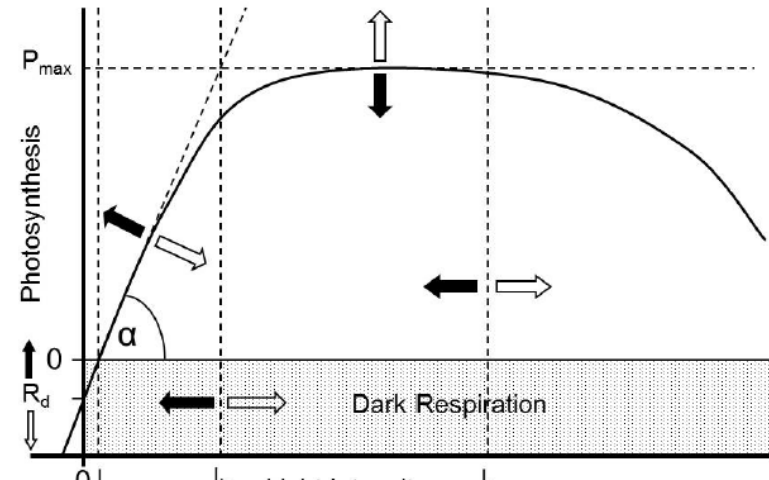
Element	Content (%)
Proteins	45-55
Carbohydrates	15-20
Lipids	10-13
Minerals	6-9
Water	3-6
Chlorophyll	2.6-3.6



Le contrôle de la culture et de l'orientation métabolique est nécessaire pour explorer le potentiel des microalgues.

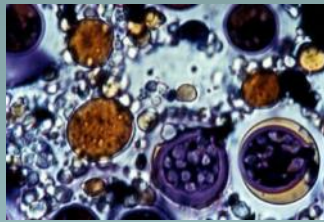


Une tonne de CO₂ donne 600 Kg de biomasse et 750 kg d'O₂.

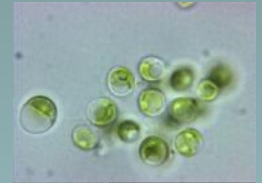


Valorisation industrielle des microalgues

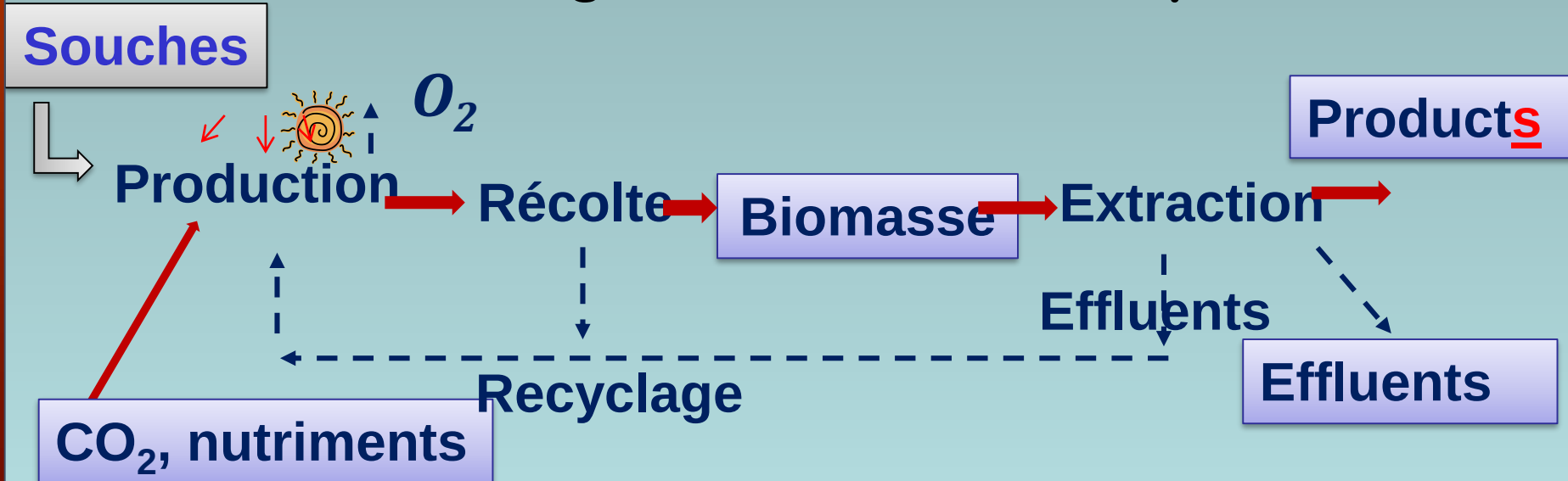
- Biomasse spécifique : milieux aqueux



Nouvelle ressource



- Nécessité d'intégrer les différentes étapes



Composition

Les microalgues présentent une grande diversité de métabolites dont les protéines

Alga	Protein	Carbohydrates	Lipids
<i>Anabaena cylindrica</i>	43–56	25–30	4–7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39–61	14–18	14–20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28–39	40–57	9–14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Spirogyra</i> sp.	6–20	33–64	11–21
<i>Arthrospira maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Spirulina platensis</i>	46–63	8–14	4–9
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11

Les protéines
représentent entre 20
et 70 % de la biomasse
sèche.

Profils des acides aminés de certaines microalgues (*recommandation FAO, 2007)

Source	Ile	Leu	Val	Lys	Phe	Tyr	Met	Cys	Try	Thr	Ala	Arg	Asp	Glu	Gly	His	Pro	Ser
WHO/FAO	4.0	7.0	5.0	5.5	6.0		3.5		1.0									
Egg	6.6	8.8	7.2	5.3	5.8	4.2	3.2	2.3	1.7	5.0	—	6.2	11.0	12.6	4.2	2.4	4.2	6.9
Soybean	5.3	7.7	5.3	6.4	5.0	3.7	1.3	1.9	1.4	4.0	5.0	7.4	1.3	19.0	4.5	2.6	5.3	5.8
<i>Chlorella vulgaris</i>	3.8	8.8	5.5	8.4	5.0	3.4	2.2	1.4	2.1	4.8	7.9	6.4	9.0	11.6	5.8	2.0	4.8	4.1
<i>Dunaliella bardawil</i>	4.2	11.0	5.8	7.0	5.8	3.7	2.3	1.2	0.7	5.4	7.3	7.3	10.4	12.7	5.5	1.8	3.3	4.6
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3.6	7.3	6.0	5.6	4.8	3.2	1.5	0.6	0.3	5.1	9.0	7.1	8.4	10.7	7.1	2.1	3.9	3.8
<i>Arthrospira maxima</i>	6.0	8.0	6.5	4.6	4.9	3.9	1.4	0.4	1.4	4.6	6.8	6.5	8.6	12.6	4.8	1.8	3.9	4.2
<i>Spirulina platensis</i>	6.7	9.8	7.1	4.8	5.3	5.3	2.5	0.9	0.3	6.2	9.5	7.3	11.8	10.3	5.7	2.2	4.2	5.1
<i>Aphanizomenon</i> sp.	2.9	5.2	3.2	3.5	2.5	—	0.7	0.2	0.7	3.3	4.7	3.8	4.7	7.8	2.9	0.9	2.9	2.9

Alga	Processing	BV	DC	NPU	PER
Casein		87.8	95.1	83.4	2.50
Egg		94.7	94.2	89.1	—
<i>Scenedesmus obliquus</i>	DD	75.0	88.0	67.3	1.99
<i>Scenedesmus obliquus</i>	SD	72.1	72.5	52.0	1.14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Cooked-SD	71.9	77.1	55.5	1.20
<i>Chlorella</i> sp.	AD	52.9	59.4	31.4	0.84
<i>Chlorella</i> sp.	DD	76.6	89.0	68.0	2.00
<i>Coelastrum proboscideum</i>	DD	76.0	88.0	68.0	2.10
<i>Spirulina</i> sp.	SD	77.6	83.9	65.0	1.78
<i>Spirulina</i> sp.	DD	68.0	75.5	52.7	2.10

AD: air dried; DD: drum dried; SD: sun dried.

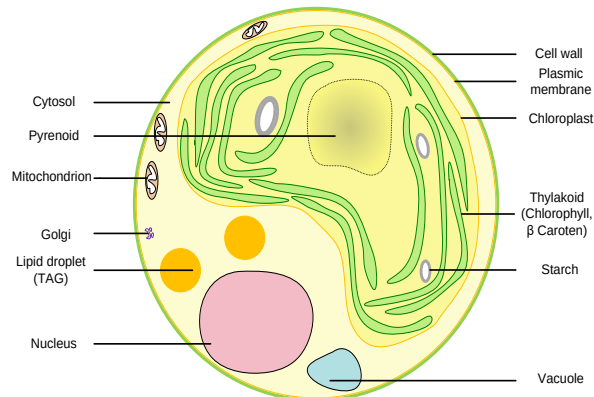
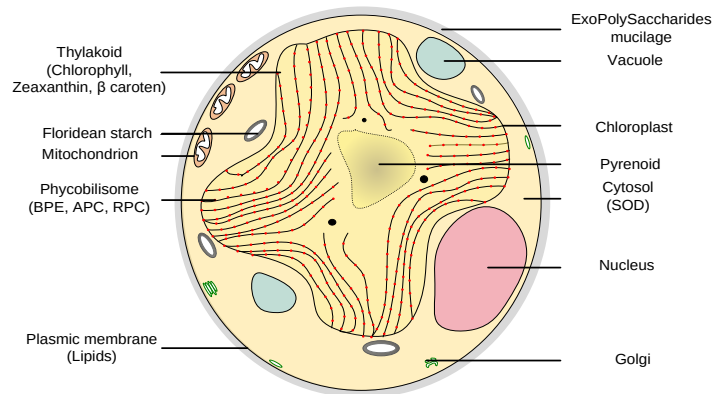
BV: Biological value

DC: Digestibility Coefficient

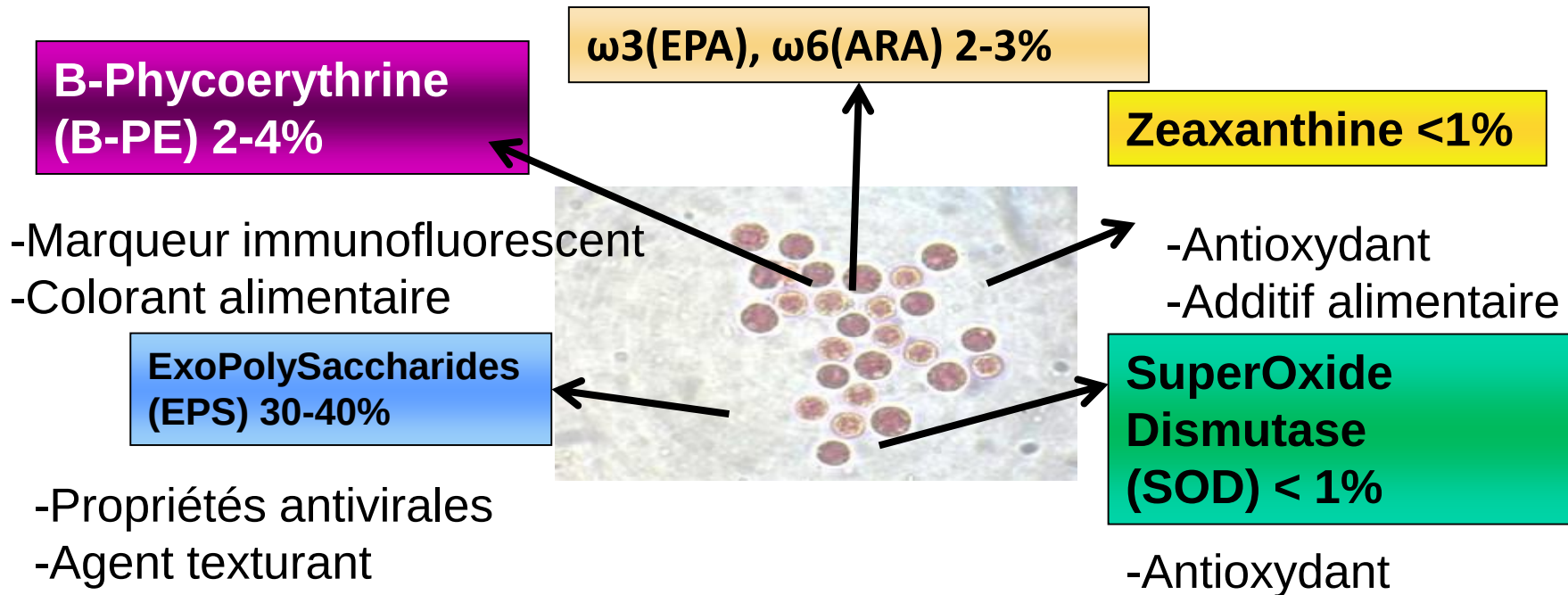
NPU: Net Protein Utilization

PER: Protein Efficiency Ratio

Bioraffinage de deux microalgues : une espèce productrice de protéines, *Chlorella vulgaris*, et une espèce productrice de polysaccharides et pigments *Porphyridium cruentum*.

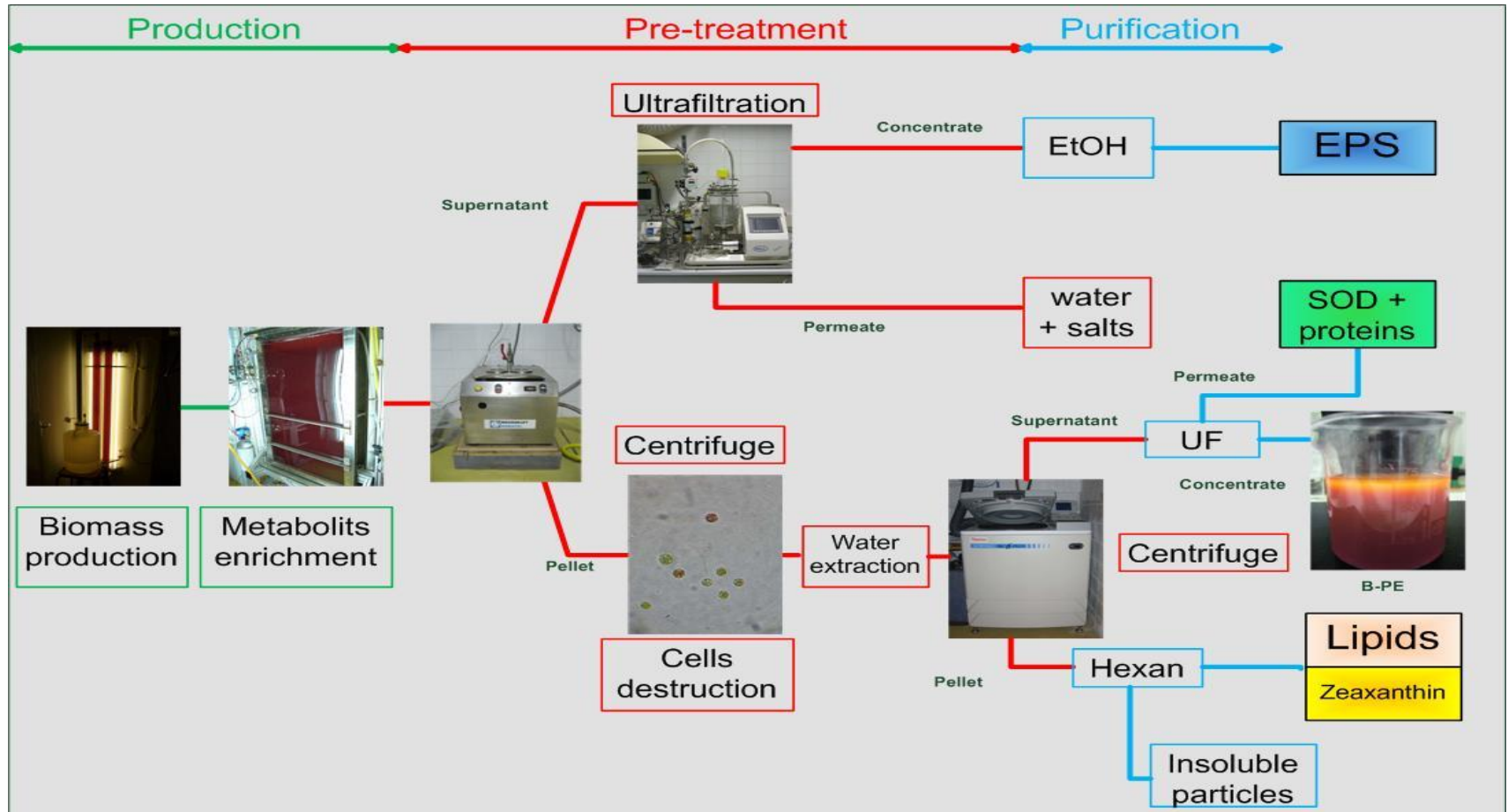


Algoraffinerie : *Porphyridium cruentum*

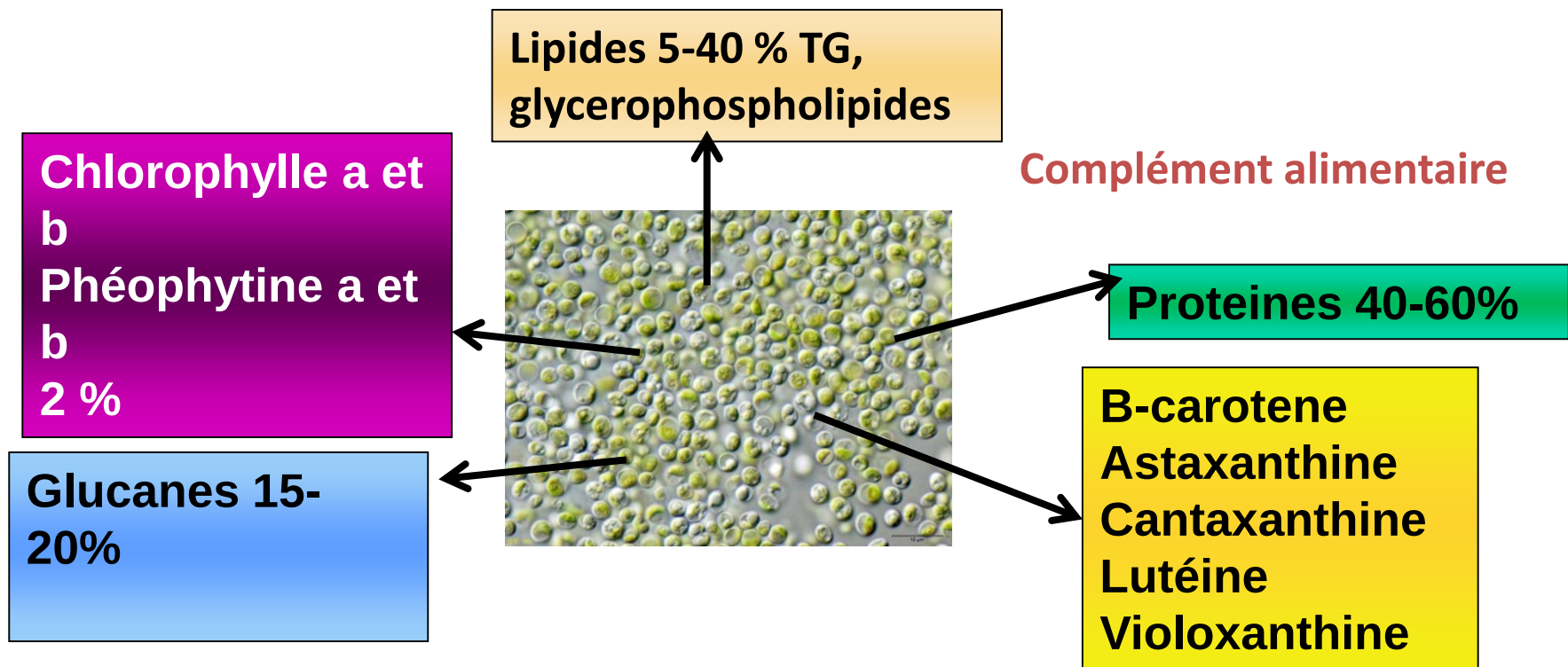


Objectif : trouver une suite de procédés pour extraire sélectivement chacun des composés sans altérer les autres constituants

Algoraffinerie - Schéma de principe



Algoraffinerie : *Chlorella vulgaris*



Objectif : trouver une suite de procédés pour extraire sélectivement les protéines

Chlorella vulgaris est la principale microalgue exploitée pour l'alimentation humaine.

Table 1

Total amino acids and ammonia of microalgae initial biomass.

Amino acid composition	Initial biomass
Aspartic acid	8.6
Threonine*	5.5
Serine	4.4
Glutamic acid	10.3
Proline	5.0
Glycine	7.0
Alanine	10.7
Valine*	6.7
Methionine*	2.6
Cysteine	1.3
Isoleucine*	3.4
Leucine*	8.2
Tyrosine	4.4
Phenylalanine*	6.0
Histidine	1.6
Lysine*	5.4
Arginine	7.4
Tryptophan*	0.2
Ammonia	1.3

* Essential amino acids.



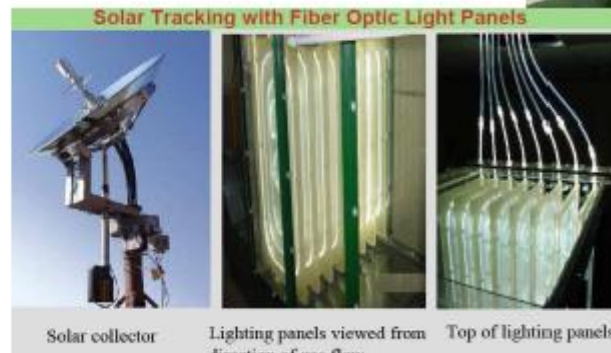
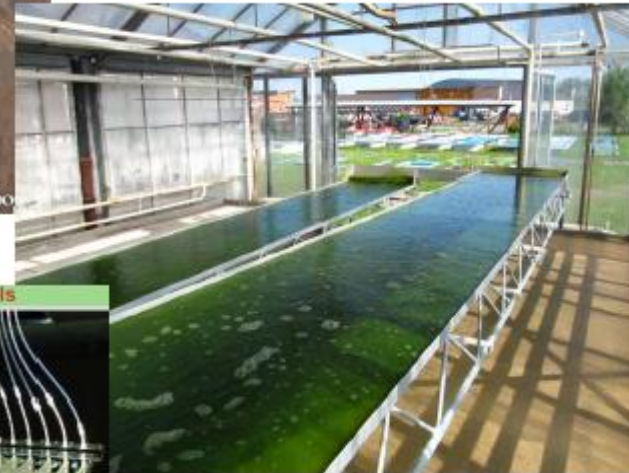
L'extraction sélective des protéines implique une lyse cellulaire

Production industrielle de microalgues en 2015



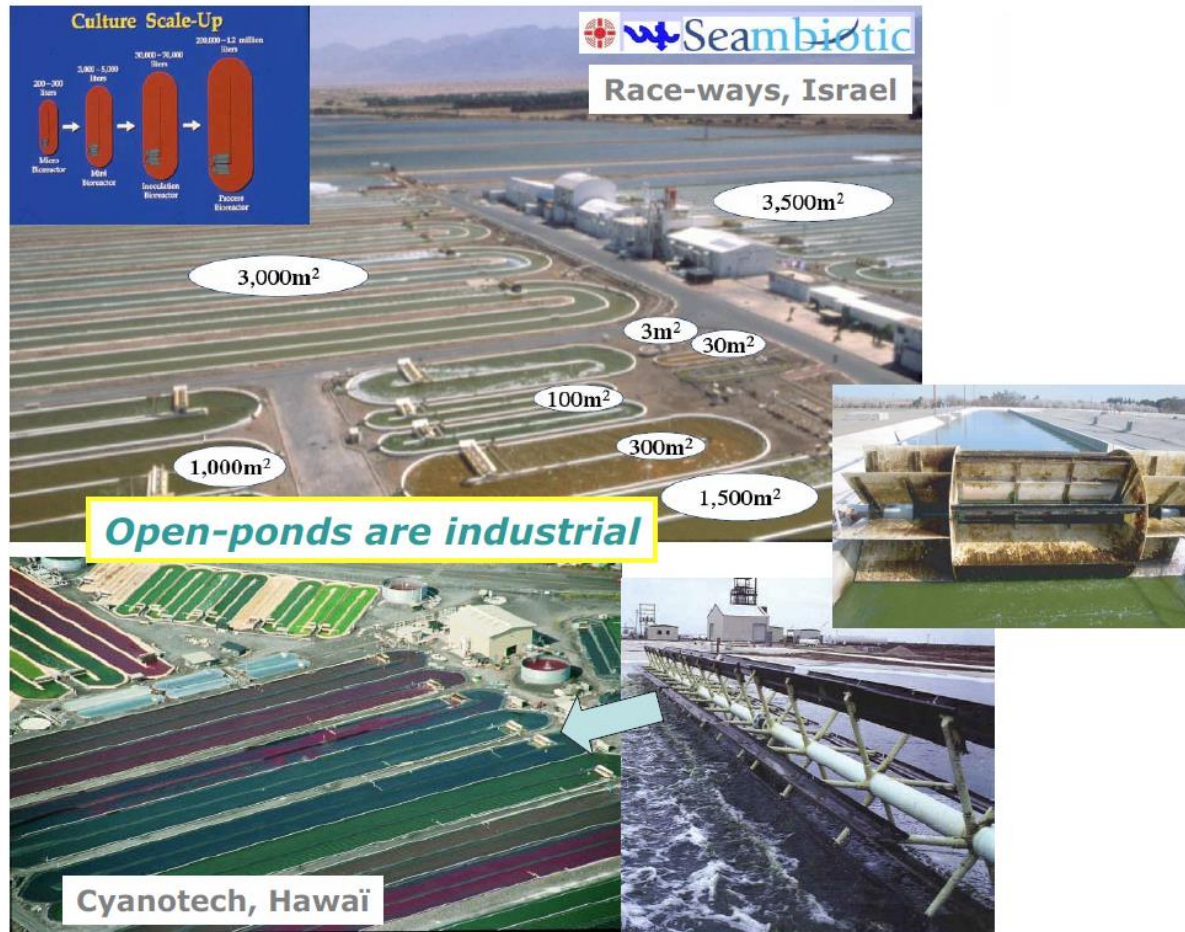
Dunaliella salina,
Hutt Lagoon, Western Australia

Thin film photobioreactor (Trebon,
Czech Republic)



Production en photobioreacteurs : bassins ouverts et intensification de procédés

Production industrielle de microalgues en 2015



Production en photobioreacteurs: bassins ouverts et intensification de procédés

Panorama sociétés françaises (2014)

Au moins 35 sociétés actives en France dans le domaine des algues

dont 21 sociétés actives dans le domaine des microalgues,

Acta Alga – Algenics – Algu'innov – Algosource Technologies – Alpha Biotech – BioAlgostral – Codif International – Eco-Solution – ESETA – Fermentalg – Greensea – Innov'alg – Metabolium – Microphyt – Naskéo Environnement – Phycosource – Pronovalg – Roquettes Frères – Scirsee – Setalg – Soliance

**EUROPEAN
MICROALGAE
BUSINESS**

number of companies with relevant business in the sector > **430**

workers across Europe in companies is estimated to be > **4.600**

total turnover in the sector is estimated in 2016 to be > **750 M€**

total biomass production in Europe dry weight > **500 ton.DW/year**

**EUROPEAN
MACROALGAE
/ SEAWEED
BUSINESS**

number of companies with relevant business in the sector > **132**

workers across Europe in companies is estimated to be > **2.600**

total turnover in the sector is estimated in 2016 to be > **700 M€**

total seaweed 'production' fresh weight > **100.000 ton.FW/year**

**the European Algae Biomass sector
represents an 'economical value' of more
than **1.69 b€/year****

= (macroalgae 700 M€ + microalgae 750 M€
+ equipments & engineering 180 M€ +
research & development 60 M€)

and provides more than **14.000 Jobs**

**> More than 80% of the 'economic value' is
the result of activity by several large
multinational companies with
headquarters in Europe.**