



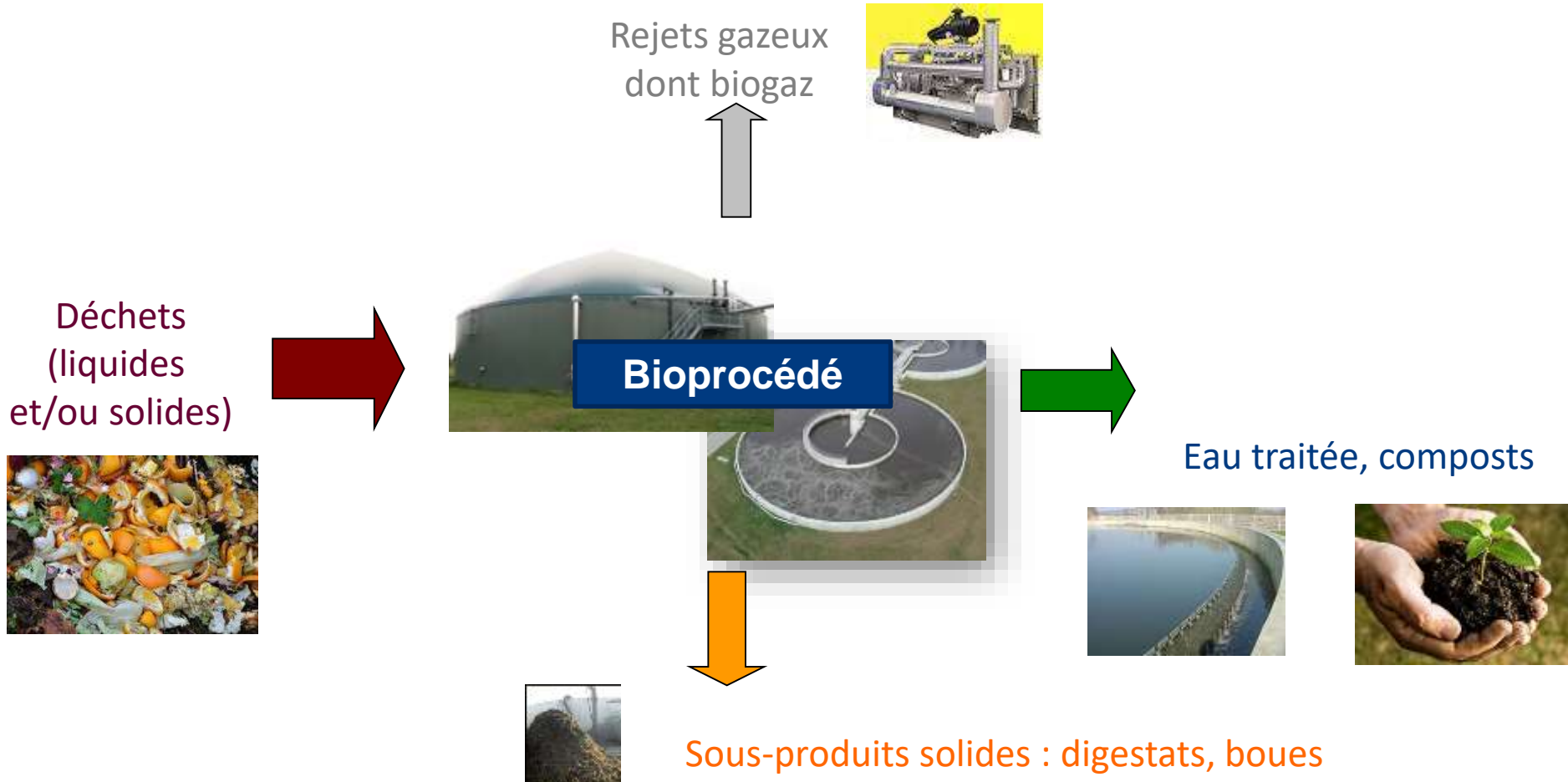
➤ **Nouvelles approches biotechnologiques pour optimiser la valorisation des déchets organiques et alimentaires : vers des bioraffineries environnementales urbaines ?**

Christian DUQUENNOI et Théodore BOUCHEZ

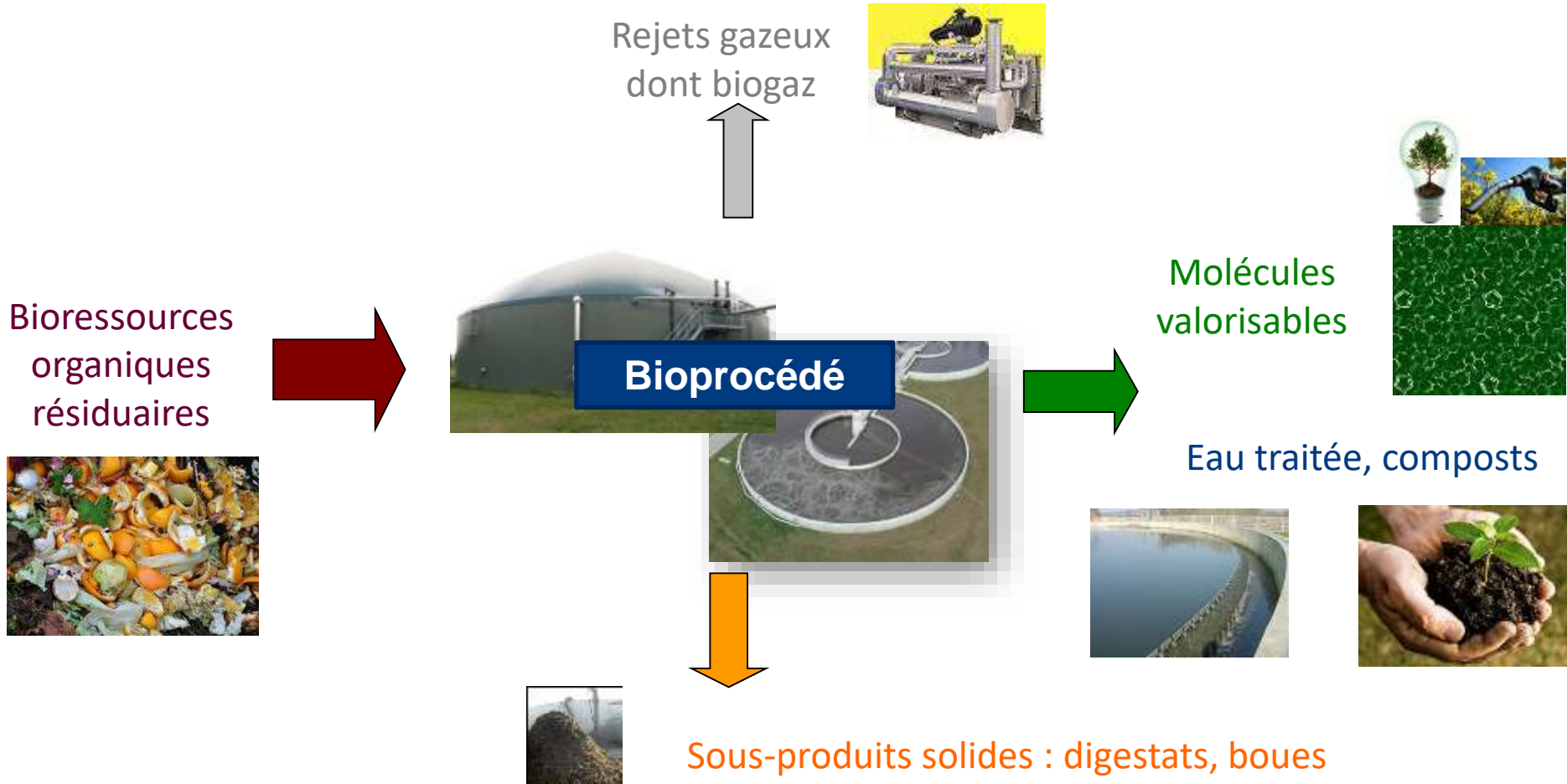


PROSe
PRocédés biOtechnologiques
au Service de l'Environnement

➤ Biotechnologies environnementales



➤ Biotechnologies environnementales



Comprendre et exploiter les **processus** de biotransformation pour accompagner la mutation des **procédés** et répondre aux enjeux de la **bioéconomie**

➤ Gisement de déchets organiques en France hors agriculture

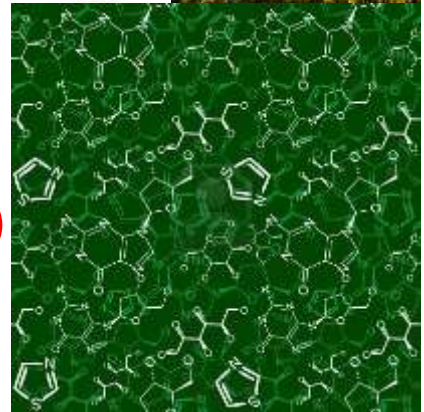
Figure 8. *Production des déchets organiques hors déchets de l'agriculture et de la sylviculture, en 2013*

Déchets organiques*	En millions de tonnes
Déchets collectés par le service public⁽¹⁾:	20,2
- Déchets de cuisine	7,1
- Papiers-cartons, textiles, sanitaires	7,2
- Déchets verts :	5,9
- dans les ordures ménagères (OM)	1,2
- en déchèterie	3,5
- collectés en porte-à-porte	1,2
Déchets organiques en gestion domestique⁽²⁾	5,1
Autres déchets organiques**⁽³⁾:	21,1
- Déchets verts des collectivités	1
- Boues de stations d'épuration (STEP)***	9
- Marchés	0,4
- Déchets verts des entreprises	3,2
- Commerces alimentaires	0,8
- Restauration	1,1
- Industries agroalimentaires (IAA)	3
- Papetiers	1,8
- Autres industries	0,8
Total	46,4

Déchets chiffres-clés
Édition 2020

BIORARE: towards environmental biorefineries!

Plant Biomass



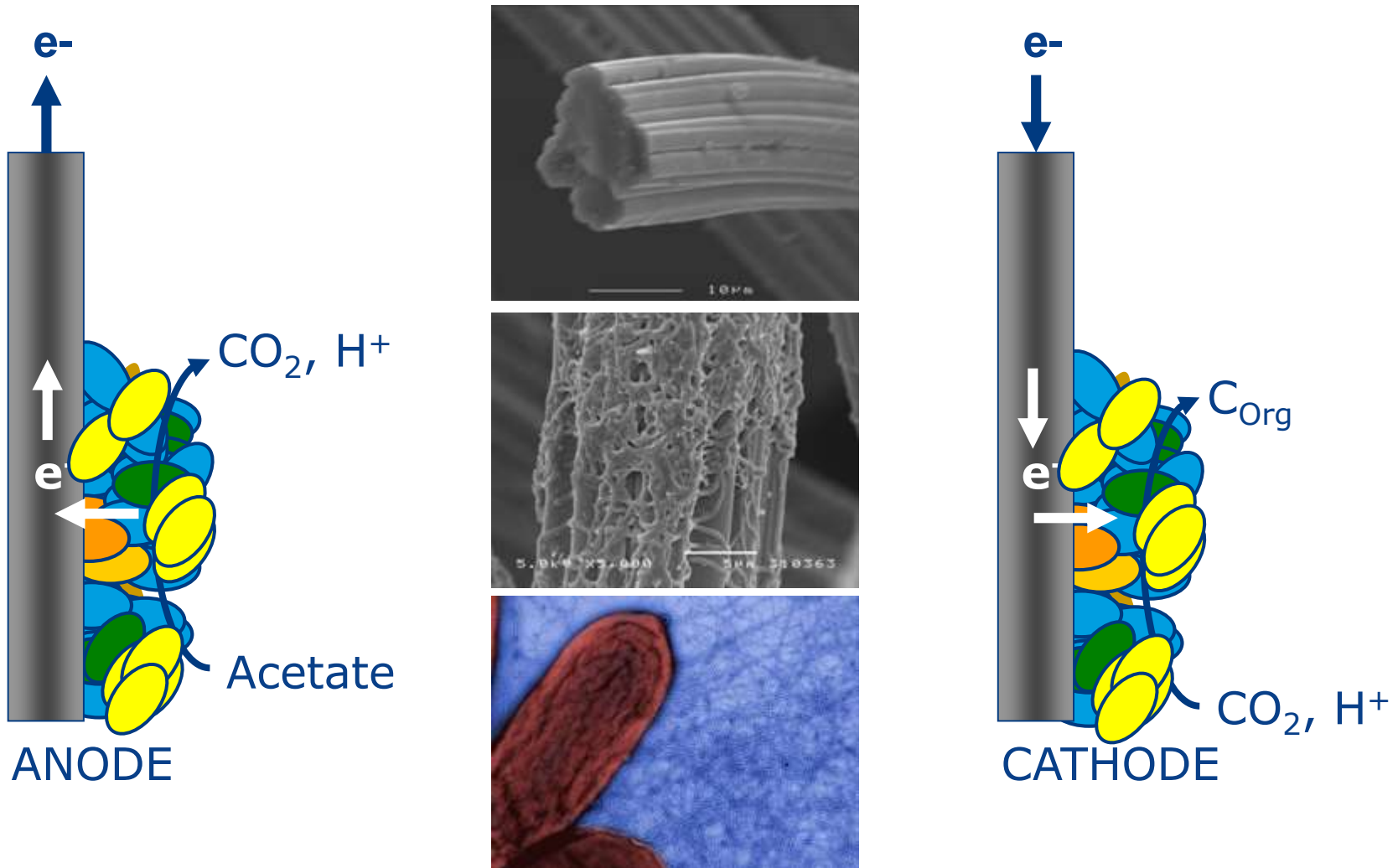
Bioelectrochemical
technologies?



Organic waste



Electroactive microbes at the anode and the cathode



Microbial electrosynthesis discovered in 2010

APPLIED AND INDUSTRIAL MICROBIOLOGY
Leading Microbes Electricity To Convert
Methane To Carbon Extracellular Organic
May/June 2010 Volume 1 Issue 2 e00103-10
Lovley

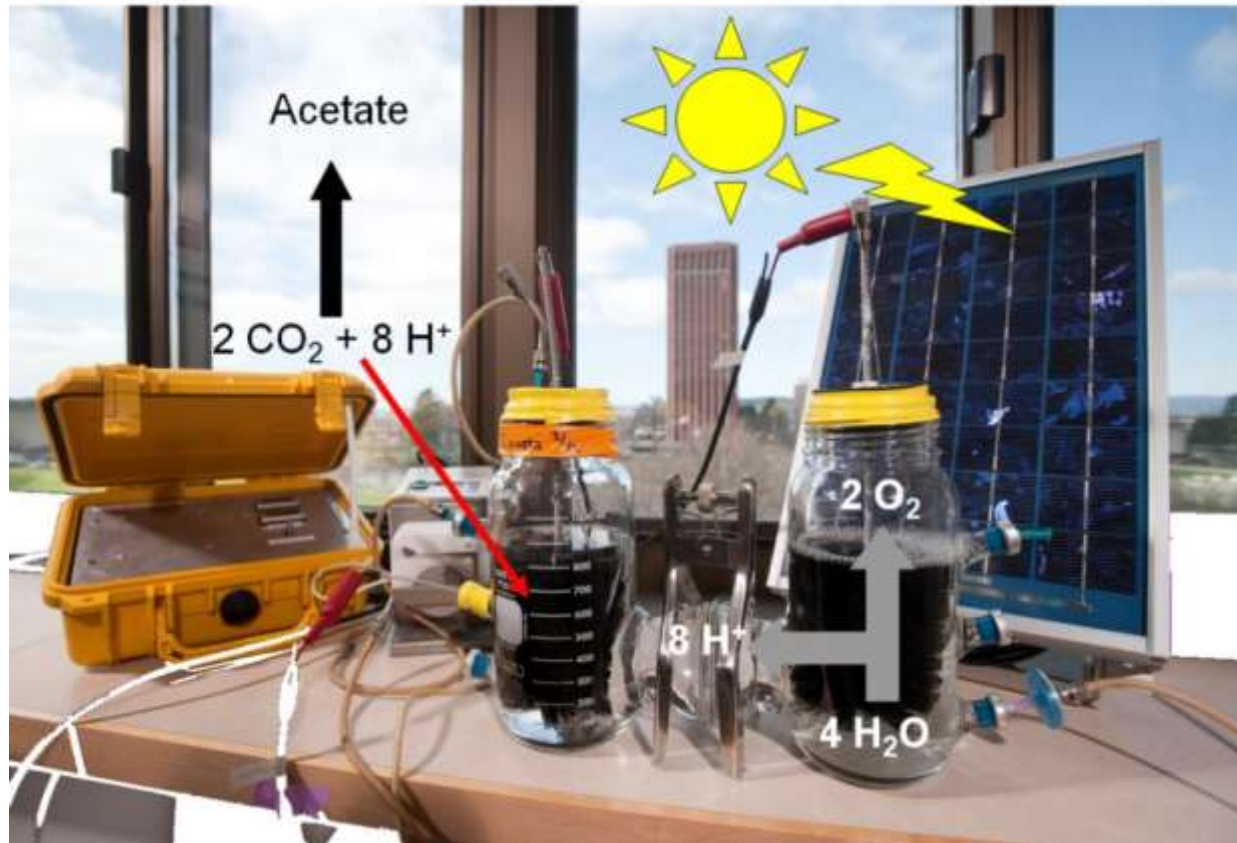
**Microbial electrosynthesis —
revisiting the electrical route for
microbial production**

Kelly P. Nevin, Trevor L. ...
Department of Microbiology, University
Korneel Rabaey and René A. Rozendal

706 | OCTOBER 2010 | VOLUME 8
www.nature.com/reviews/micro

Dept Of Energy (DoE) – ARPA-E : programme « Electrofuels » (100 M\$)

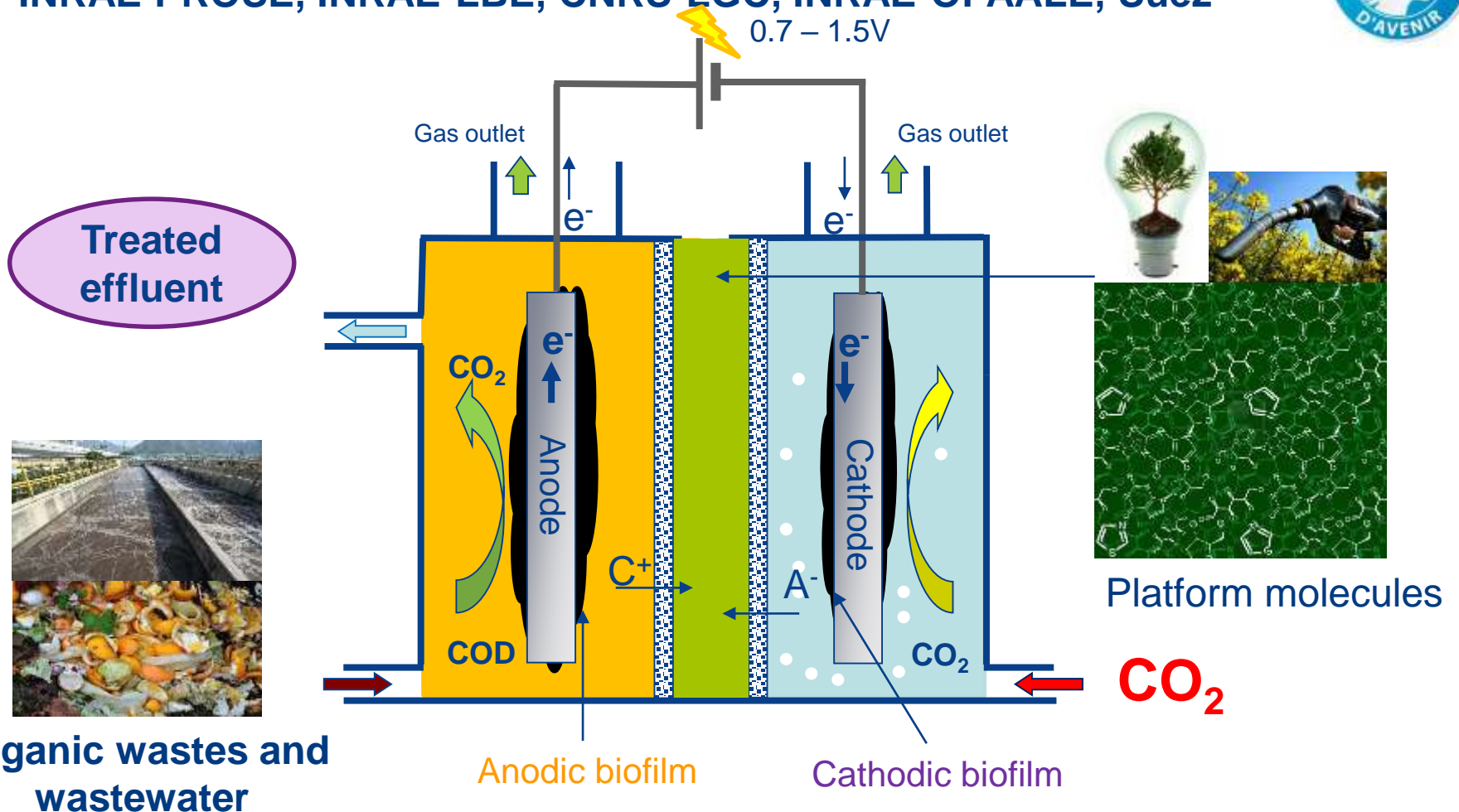
Photovoltaic-Driven System for Electrosynthesis



Gain de rendement surfacique > 2 logs vs procédés à production de biomasse

Le concept technologique BIORARE

INRAE PROSE, INRAE-LBE, CNRS-LGC, INRAE-OPAAL, Suez



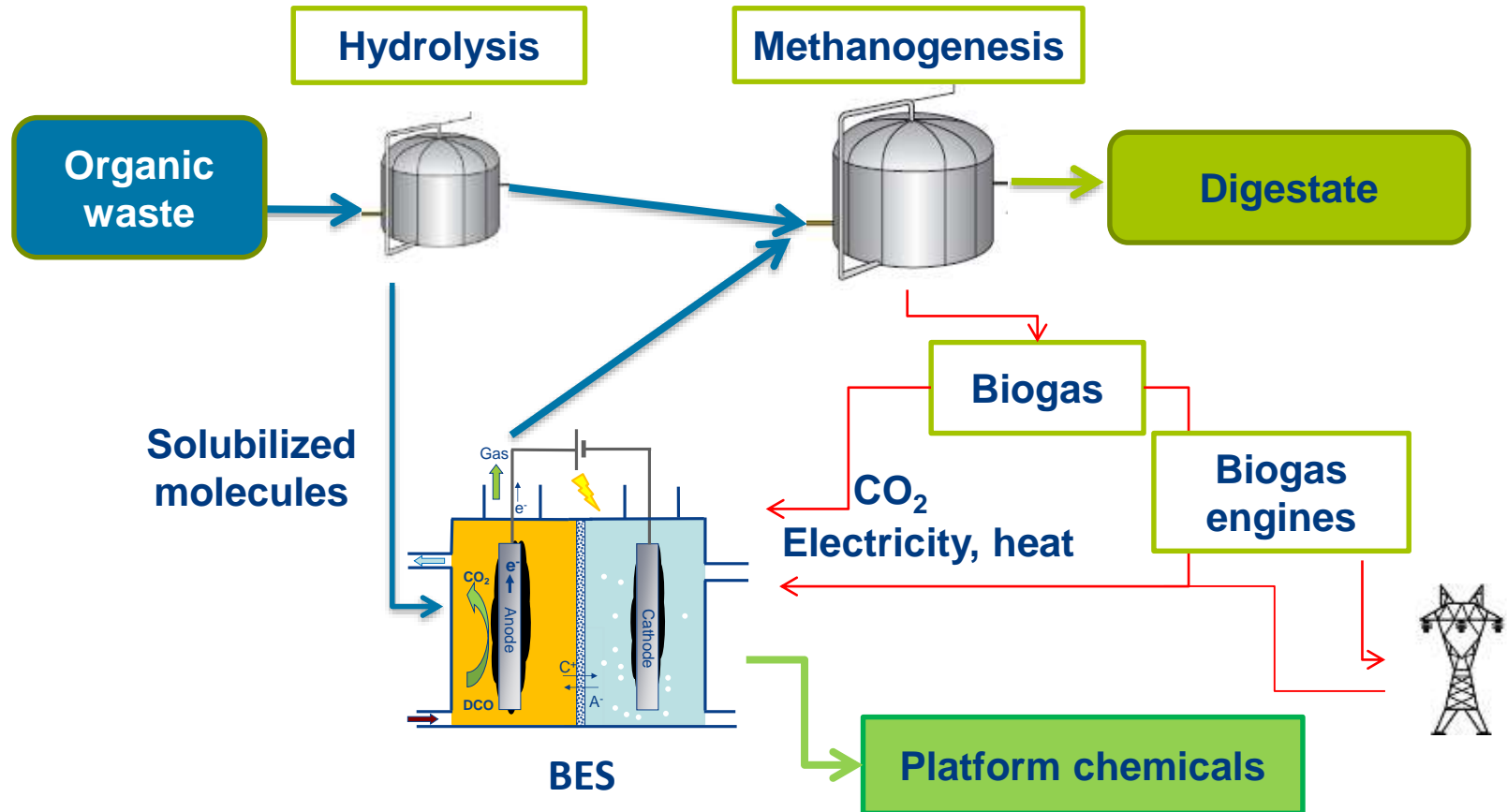
Organic wastes and wastewater

- Production de molécules organiques plate-forme à partir de déchets
- Séparation physique entre molécules produites et déchets contaminés
- Interfacer le métabolisme microbien à un circuit électrique

Platform molecules

CO₂

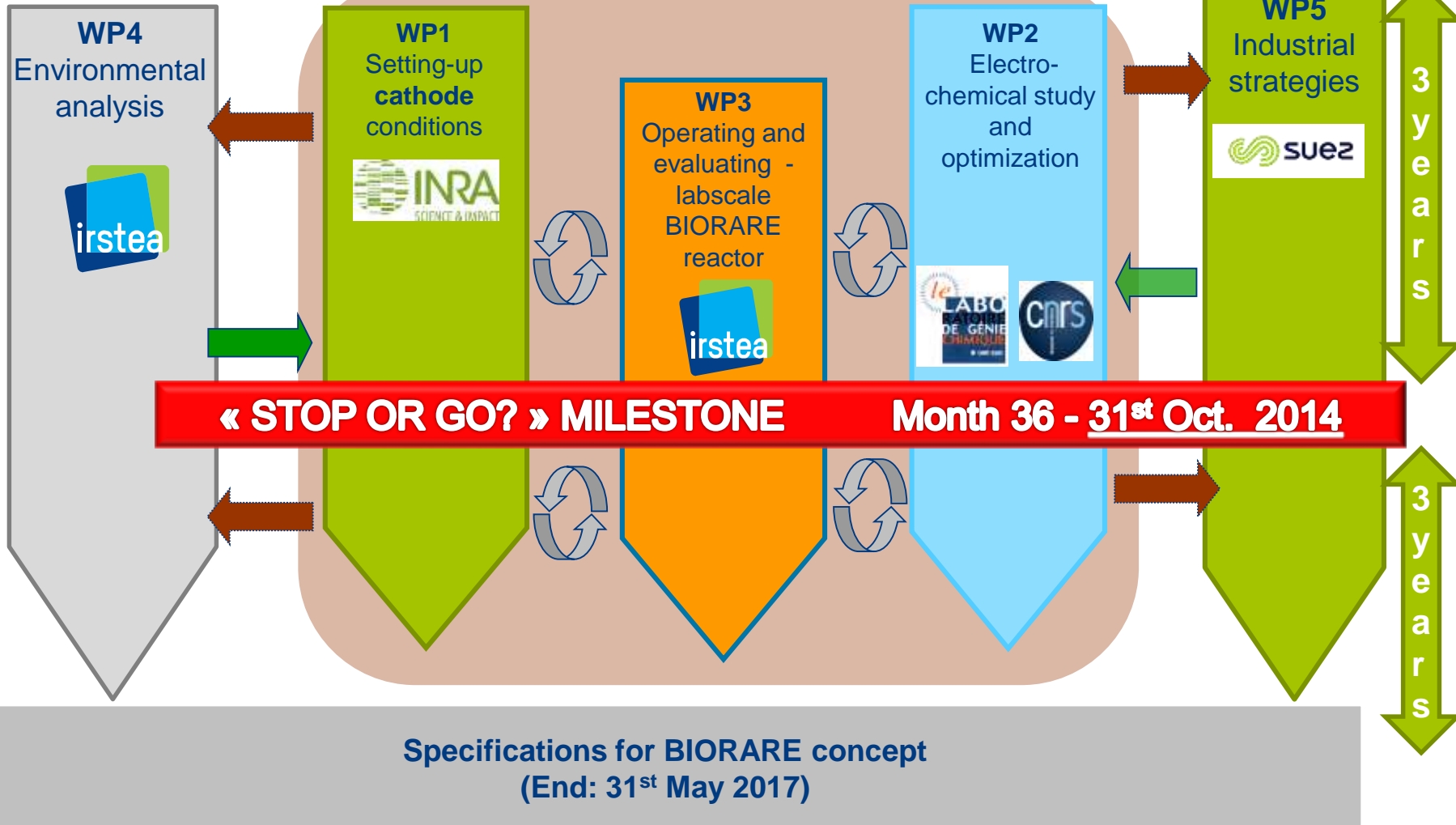
BIORARE working scheme



BIORARE PROJECT STRUCTURE

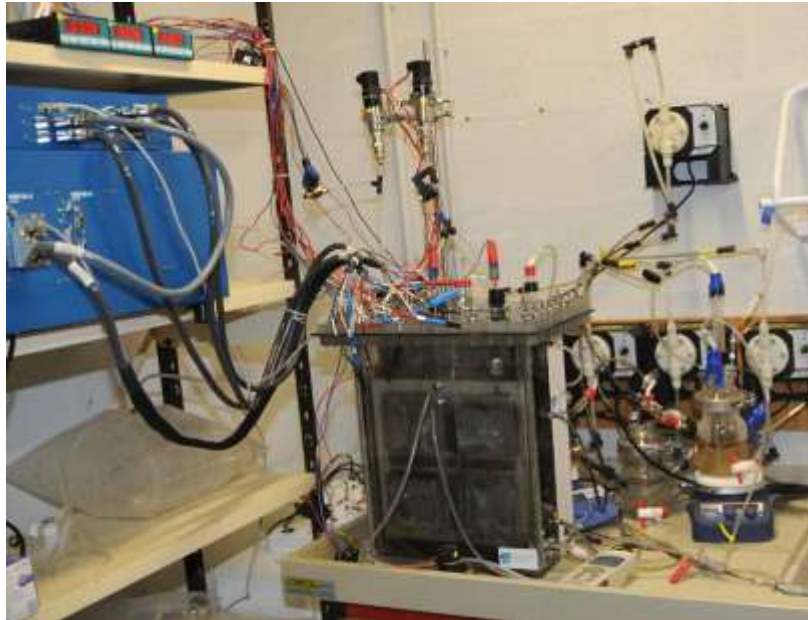
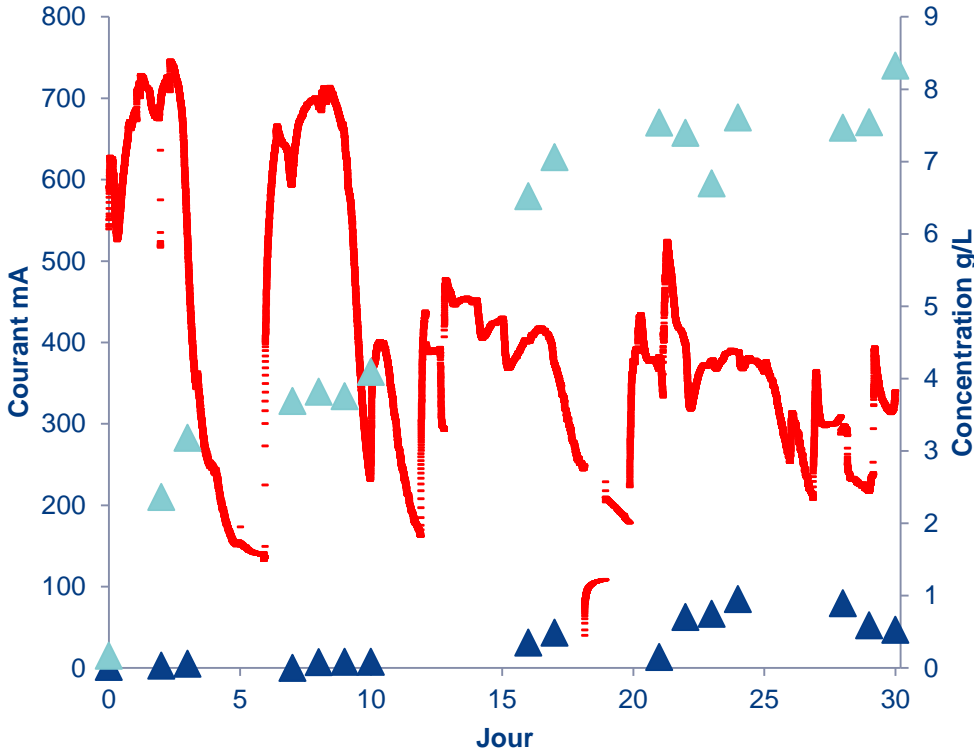
11

WP0: Sharing knowledge (Start: 1st Nov. 2011)



Development of a TRL4 15L pilot fed with real biowaste

Tian *et al.*, 2019 arXiv



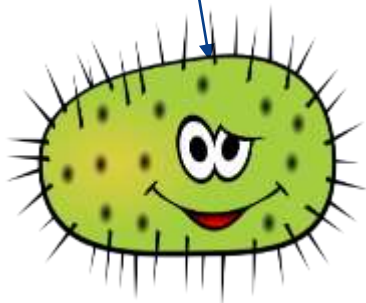
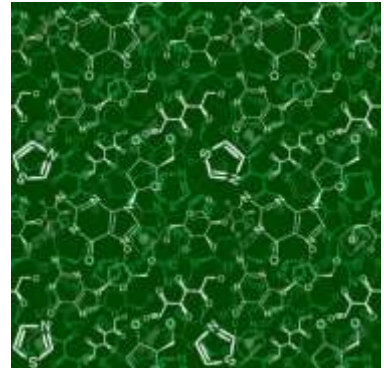
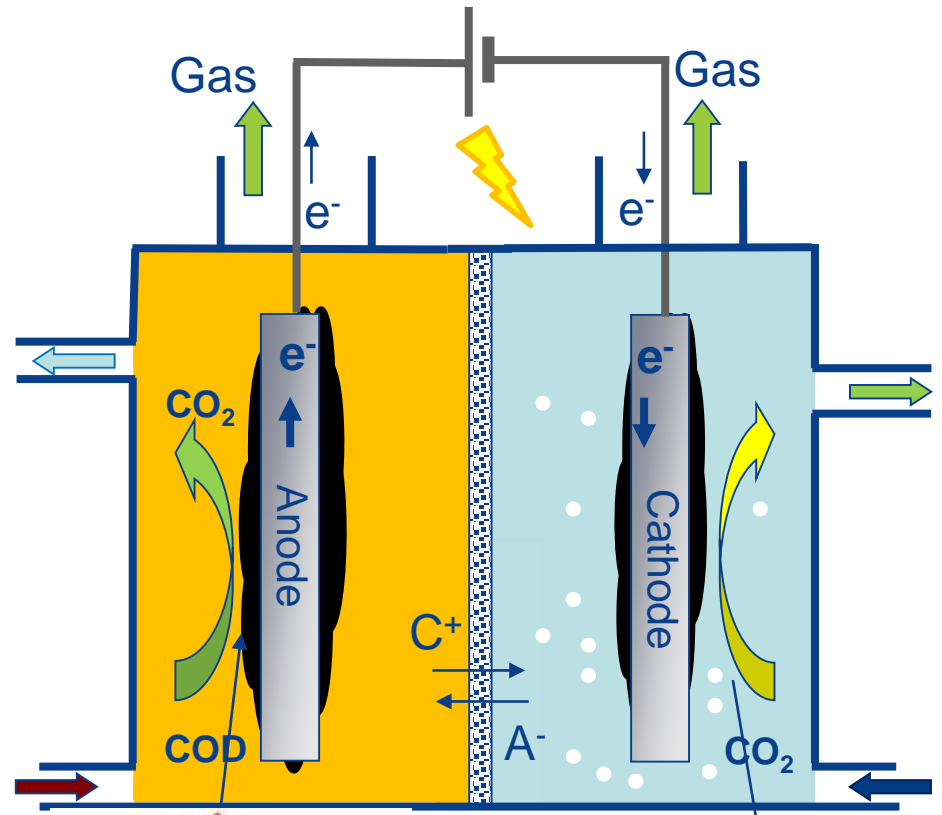
- Courant mA
- ▲ [Acide Formique] g/L
- ▲ [Acide acétique] g/L



Built by 6TMIC

Coulombic efficiency : approx 60%
Current loading rate: 0,8 gDCO/jour/L
Production capacity (acetate) : 0,5 g/d/L
Electric consumption: 0,85 W

Towards a technological platform bridging environmental and industrial biotechnologies

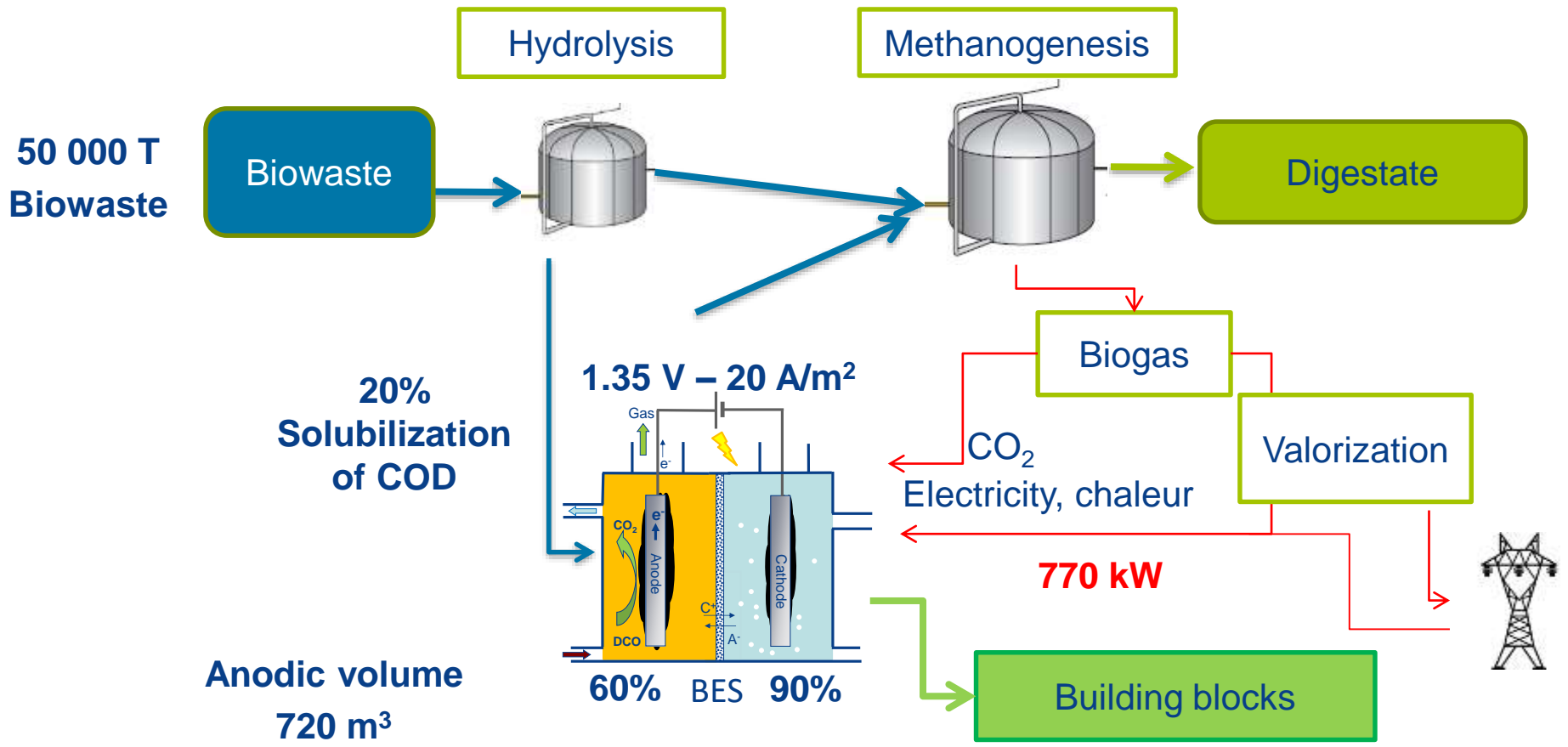


CO₂

Yeast cultures for high grade bioplastics production

Val20 project with INRAE-Micalis (2021 POC in labs, UPSaclay)

■ BIORARE current scenario fact sheet



Expected output:

- 3900 T of formic acid from CO₂ or
- 1300 T acetic acid from CO₂ or
- 1400 T succinic acid from CO₂

markets?
End-users?
specifications?

Table 3 Major cost components of electrofuels process

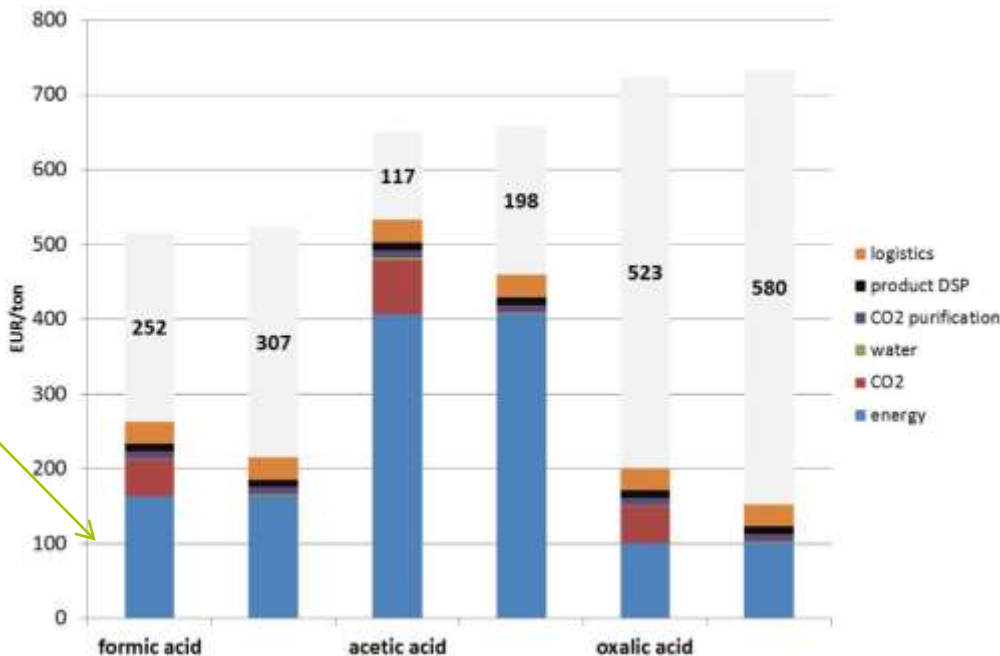
Item	Base Cost	Cost (\$/GGE)	Cost of Electrofuels (\$/GGE)			
			\$2	\$3	\$4	\$5
Electricity Feedstock	\$0.04/kWh	\$2.15	\$0.02	\$0.06		
Capital Cost	\$2/yearly GGE	\$0.45	\$1	\$6		
CO ₂ Feedstock	\$40/ton CO ₂	\$0.37	\$0	\$100		
O ₂ Co-product	\$20/ton O ₂	-\$0.20	\$30	\$0		
Labor and Overhead	\$0.15/GGE	\$0.15	\$0.07	\$0.30		
Maintenance and Taxes	4% of TPI	\$0.09	1%	5%		
Materials and Waste	\$0.08/GGE	\$0.08	\$0.04	\$0.16		
Water Feedstock	\$2/1000 gallons	\$0.01	\$0	\$3		
Total Cost	Supp Calc 8	\$3.09	Base Cost \$3.09/GGE			
Item	Base Value					
Cellular Energy Efficiency	100%		100% 50%			
e- Consumed per Butanol Produced	28 e-		25.3 52			
Delivered Voltage	1.5 V		1.23 2.0			

Cost components and base values are tabulated to determine the individual cost of specific components as well as the overall cost of fuel production through electrofuels. With each cost item, a sensitivity analysis is provided in the Tornado chart on the right to illustrate how the variation in a single parameter influences the overall cost. The top of the table/chart itemizes standard engineering parameters, whereas the bottom of the table/chart itemizes biological constraints, the latter which each of the Electrofuels projects address

BIORARE requires 3 times less electric power

+

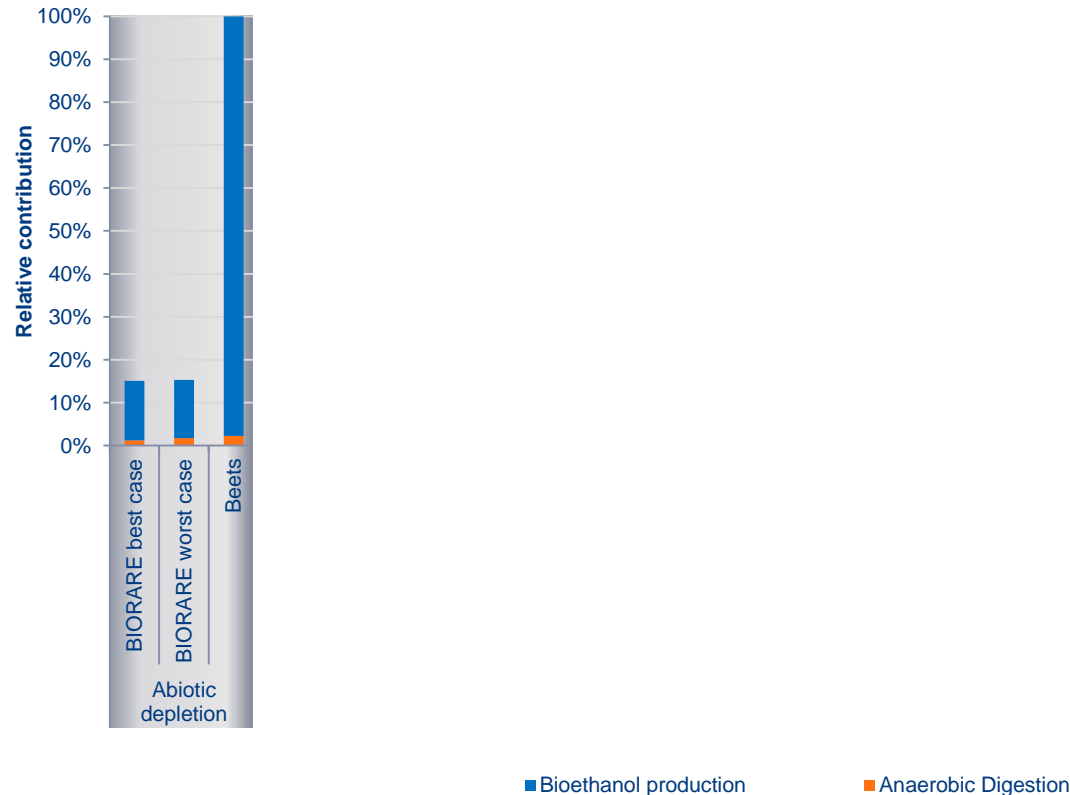
Benefits from the “negative cost” of the bioresource used



BIORARE prospective LCA

(Foulet *et al.*, 2018 *Env Sci. Pol. Res*; 2019 *J. Cleaner Prod.*)

Comparative LCA for the production of bioethanol:



**The best BIORARE scenario always shows lower burdens than BAU
(Business As Usual)**

BIORARE technology development



End of
Investissement d'avenir
BIORARE

BIORARE
2012-2014
Labscale feasibility
LCA model development
Market, reglementary and acceptability studies
Patents 1 and 2

BIORARE
2014-2017
Product diversification
LCA simulations
Engineering model
Patent 3

BIORARE PI+
Patents 4 to 7
BES'Step
Pilot design and operation
3-4 years

Demonstration & Industrialisation
5 years (estimate)

TRL 0 TRL 1

TRL 3

TRL 4/5

TRL 7/8

TRL 9

Lab pilot
Real biowaste test

Energy and matter balances

New patents
New pilots
First evaluation in industrial context
Exploitation robustness

Industrial scale



TRYON
Environnement

DES **BIODÉCHETS** AUX **BIO-RESSOURCES**

Méthanisation locale Tricube



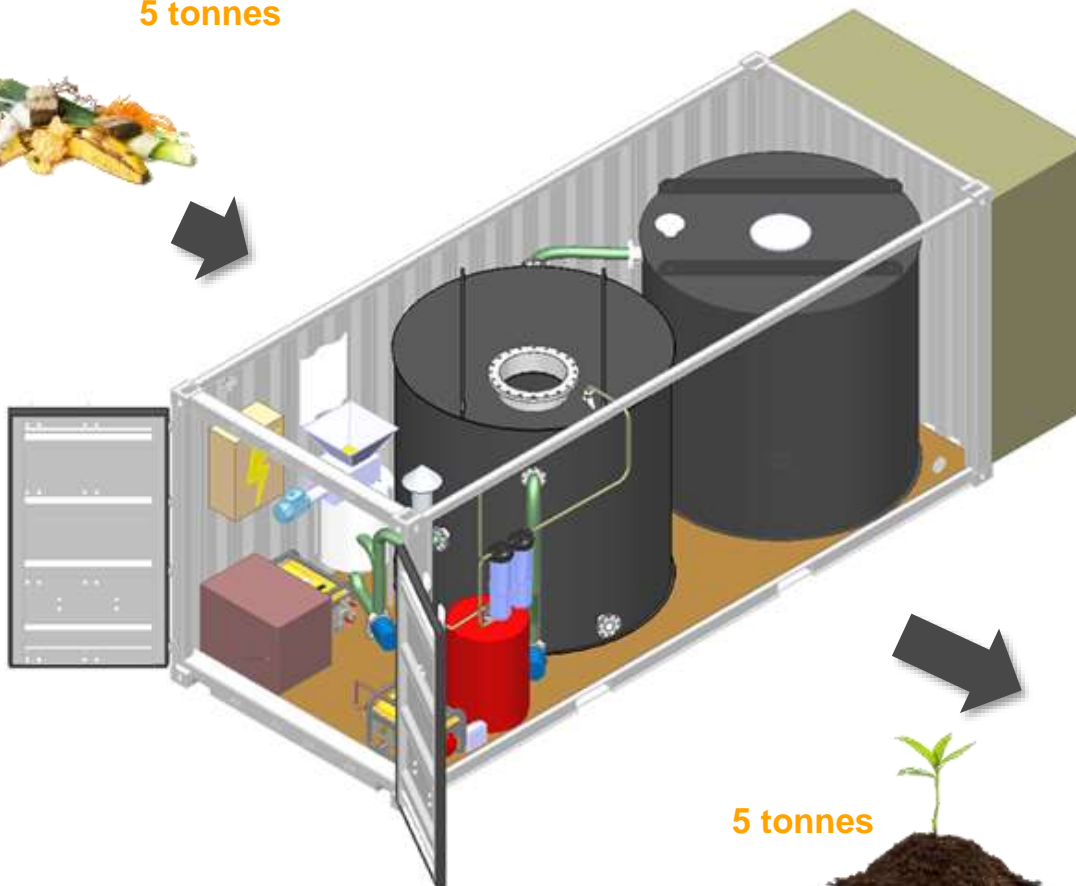


UNITÉ DE 1 À 20 TONNES / AN

5 tonnes



Biodéchets triés



600 m³
(~0,8 MWh)



Biogaz valorisé en chaleur



5 tonnes



Fertilisant



SOLUTION TRICUBE

À LA POINTE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

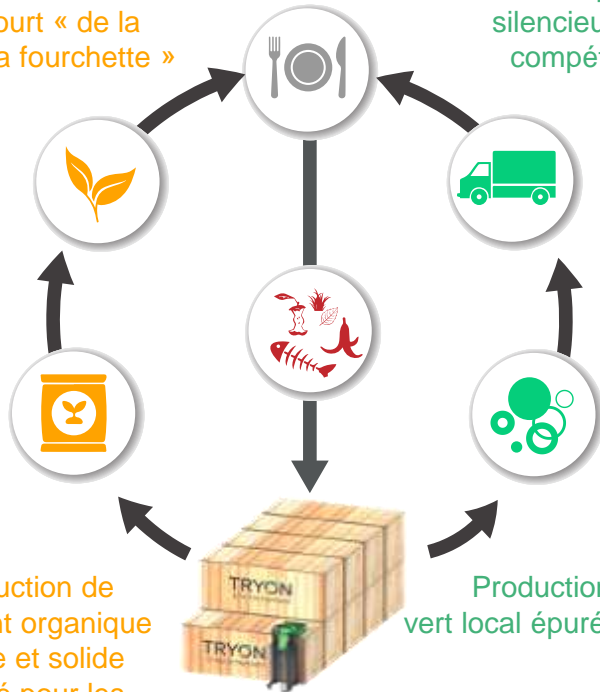
Un projet vitrine de l'innovation qui réduit les émissions de CO2 via la suppression des transports de collecte

20

Meilleure sensibilisation
et acceptation

Produits locaux en
circuit court « de la
fourche à la fourchette »

Carburant propre,
silencieux et
compétitif



Production de
fertilisant organique
liquide et solide
adapté pour les
partenaires locaux

Production de gaz
vert local épuré puis valorisé



UNE SOLUTION ADAPTÉE POUR LES IMMEUBLES, CANTINES D'ENTREPRISE, ETC.

- Echelle locale

Réduction des coûts et impacts de la logistique de collecte

- Rapidité de déploiement

Mise en service en 1 an VS 3 à 8 ans

- Acceptabilité

Unité à taille humaine avec peu de nuisances

- Service clé en main

Montage projet et prestation d'exploitation & maintenance

Couplage BIORARE/Tricube : production locale de produits ménagers pour le nettoyage des surfaces. Quelles perspectives pour de micro bioraffineries environnementales urbaines ?

➤ Vers une bioraffinerie environnementale urbaine ?

Consortium RÉBUS (RÉseau de recherche pour une Bioraffinerie Urbaine Soutenable)



Coordination :

Christian Duquennoi (INRAE PROSE)

- Ingénierie, procédés
- Déchets
- Modélisation
- Approches systémiques



Co-coordination :

Sandrine Costa (INRAE MOISA)

- Economie, marketing
- Comportement des consommateurs :
Achat, conservation, consommation,
déchets alimentaires

➤ Le concept de bioraffinerie environnementale urbaine

- **Bioraffinerie** (installation de « transformation durable de biomasse en énergie et en une gamme de produits »¹),
- sourcée en **matières organiques résiduelles urbaines** (biodéchets et sous-produits, par exemple de l'agriculture urbaine) et
- dont les produits pourront être **valorisés au sein du territoire**.

Concept innovant, encore très peu investigué (microméthanisation urbaine)

¹ Définition de l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE) pour le bioraffinage, « pilier central de la bioéconomie » selon l'IAE.

➤ Principaux enjeux d'une insertion urbaine / péri-urbaine de la bioraffinerie environnementale

- Réduire le transport de matières
- Améliorer le potentiel de valorisation des matières résiduairees produites en territoire urbain
- Contribuer à la dynamisation de systèmes bioéconomiques circulaires urbains (lien avec agriculture urbaine, urban mining, ESS,...)
- Sans constituer un obstacle à la réduction des déchets
- Par des technologies et organisations adaptables à de possibles nouvelles trajectoires socio-économiques



➤ Objectifs du consortium

- « Semer la graine » d'une réflexion interdisciplinaire autour du concept de **bioraffinerie environnementale urbaine**,
- En s'appuyant sur la **diversité thématique et disciplinaire** des chercheurs INRAE,
- Pour co-construire des **projets de recherche**



➤ Verrous scientifiques envisagés



➤ Questions spécifiques autour de la conception

1) Apport de la conception à

- Réorganisation/re-conception de systèmes productifs locaux
- ...

2) Questions posées à la conception (des procédés)

- « Miniaturisation » des procédés
- Adaptabilité des procédés
 - à la variabilité quali et quanti des intrants
 - à la demande en produits
- ...

> Le consortium

TRANSFORM

ECOSOCIO

ACT

AGROECOSYSTEM

21 chercheurs INRAE, 11 unités, 4 départements + 1 partenaire extérieur

PROSe
Processus Biotechnologiques
au Service de l'Environnement

Christian Duquennoi (coord.)
Théodore Bouchez

OPAALÉ
INRAE

Lynda Aïssani
Anne Trémier

Laboratoire de
Biotechnologie de
l'Environnement

Nicolas Bernet
Jean-Philippe Delgenès
Renaud Escudié
Dominique Patureau

UR-0370
QUALITÉ DES PRODUITS ANIMAUX (QUIPA)

Vincenza Ferraro

FARE

Caroline Rémond

UR 1268
bia
Biopolymères
Interactions
Assemblages

Bénédicte Bakan
Kamal Kansou
Bernard Cathala

Unité Mixte de Recherche
MOISA
Marchés Organisation
Institutions Stratégies d'Acteurs

Sandrine Costa (co-coord.)
Mechthild Donner
Zouhair Bouhsina

BETA
Bureau
d'économie
théorique
et appliquée

Sylvain Caurla

Unité Mixte de Recherche
ITAP
Technologies & méthodes
pour les agricultures
de demain
INRAE - Montpellier SupAgro

Eléonore Loiseau

PAUL
INSTITUT
BOCUSE

Maxime Sebbane

SADAPT

Caroline Petit
Jacques Méry

lae
laboratoire
agronomie et
environnement

Julie Wohlfahrt

Principales contributions thématiques et
disciplinaires :

- Economie
- Evaluation environnementale
- Procédés
- Filières
- Gestion
- Transition écologique des territoires
- Marketing

➤ Actions

- Séminaire de lancement janv/fév 2021
- Revue biblio, novembre 2020 – mai 2021
- Identification des chercheurs INRAE mobilisables, fin 2020-début 2021
- Organisation d'une école-chercheurs → automne 2021

