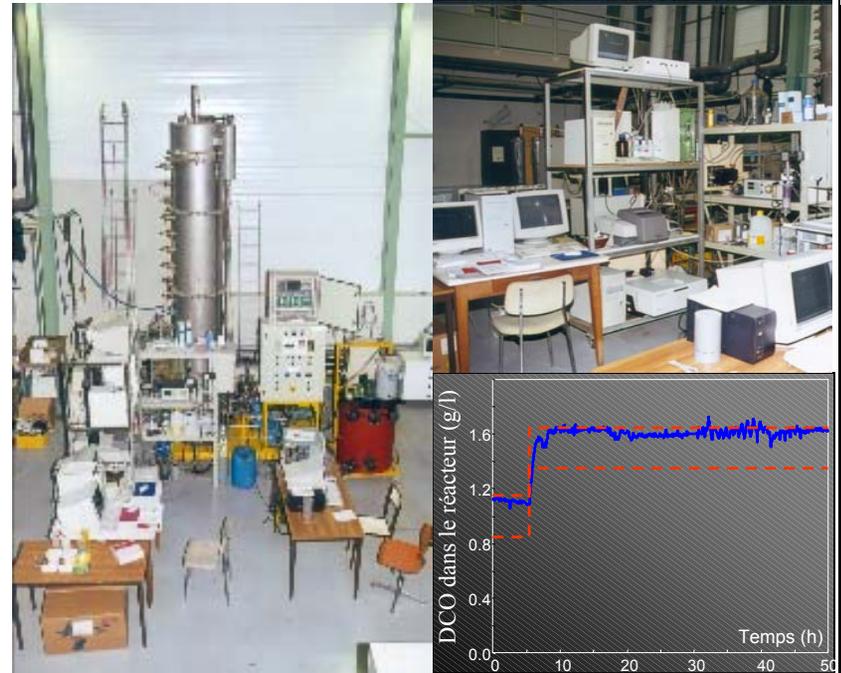


Instrumentation, Commande, Diagnostic en Traitement des Eaux

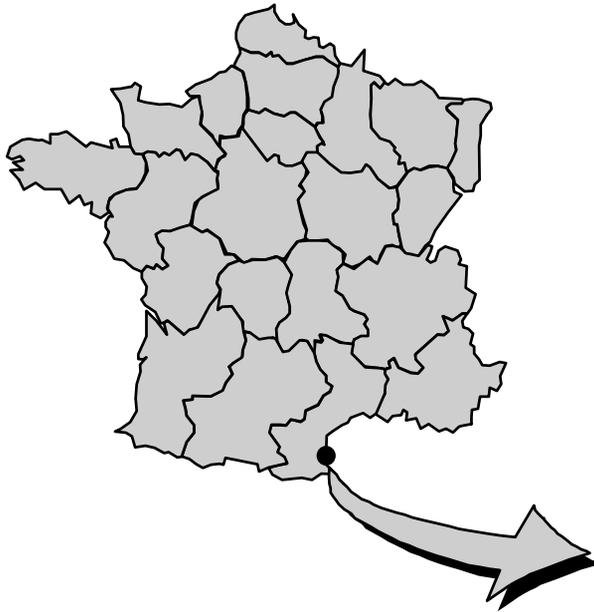
Quelques retours d'expérience
de 12 ans de recherche

Jean-Philippe Steyer
LBE-INRA, Narbonne



- ✓ *28 permanents (60 personnes avec les étudiants)*
- ✓ *5 équipes de recherche:*
 - ↪ Microbiologie
 - ↪ Génie Biologique
 - ↪ Génie Chimique
 - ↪ Automatique
 - ↪ Transfert Industriel

<http://www.montpellier.inra.fr/narbonne>



Plan de l'exposé

Analyse des besoins

Questionnement et résultats scientifiques

Instrumentation

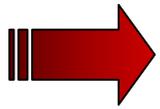
Commande

Aide à la décision

Bilan

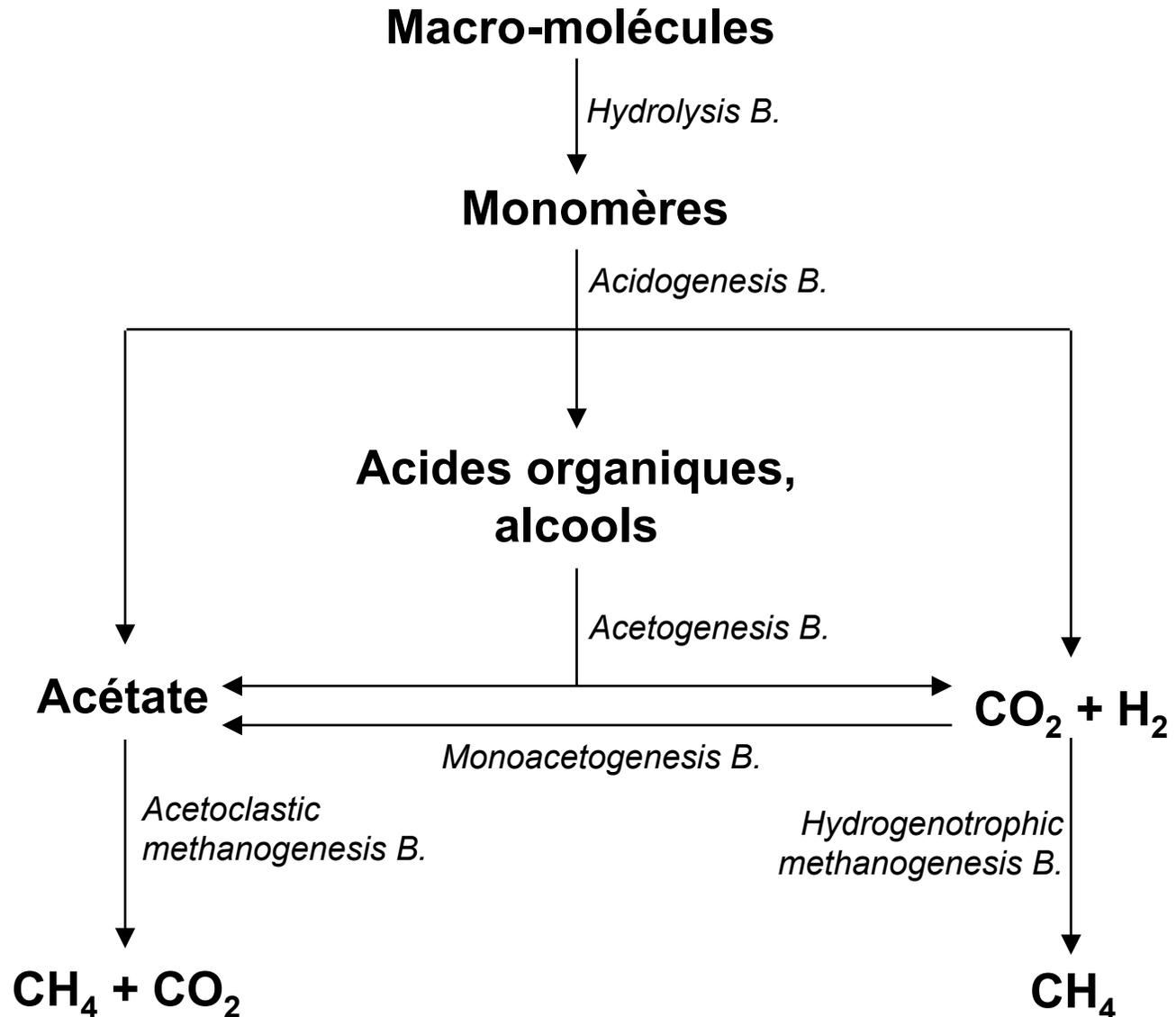
Perspectives

Plan de l'exposé

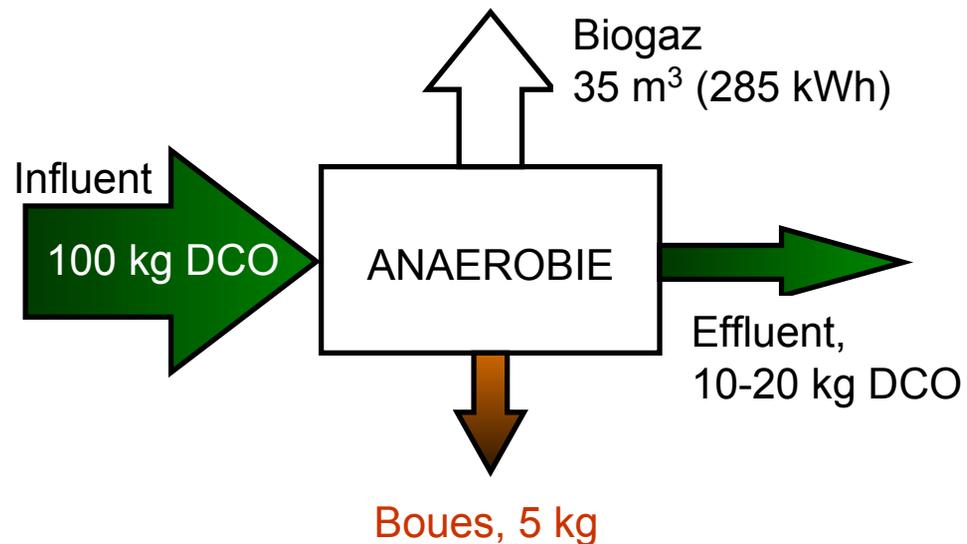
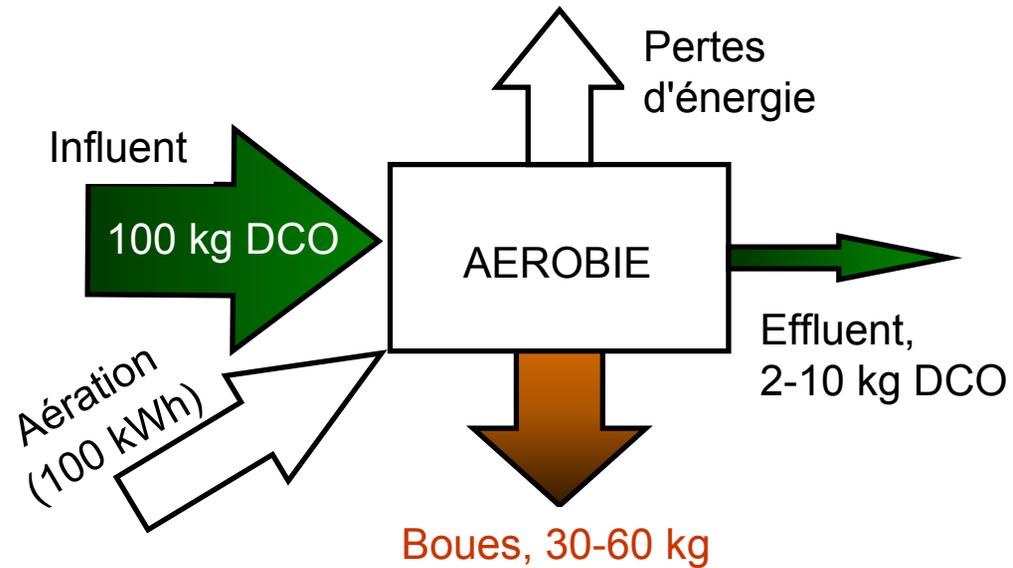


Analyse des besoins

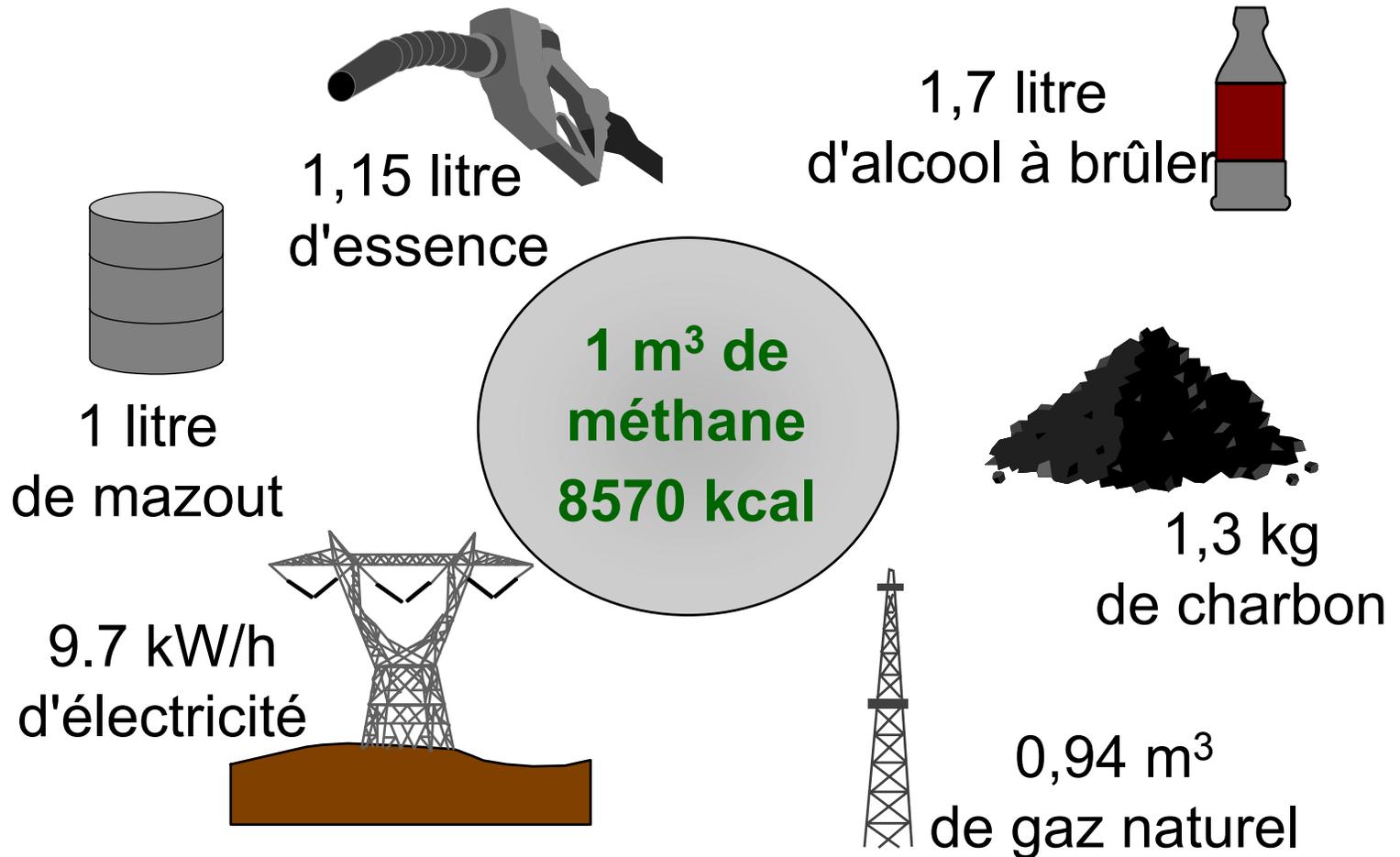
Schéma réactionnel de la digestion anaérobie



Pourquoi un traitement anaérobie ?

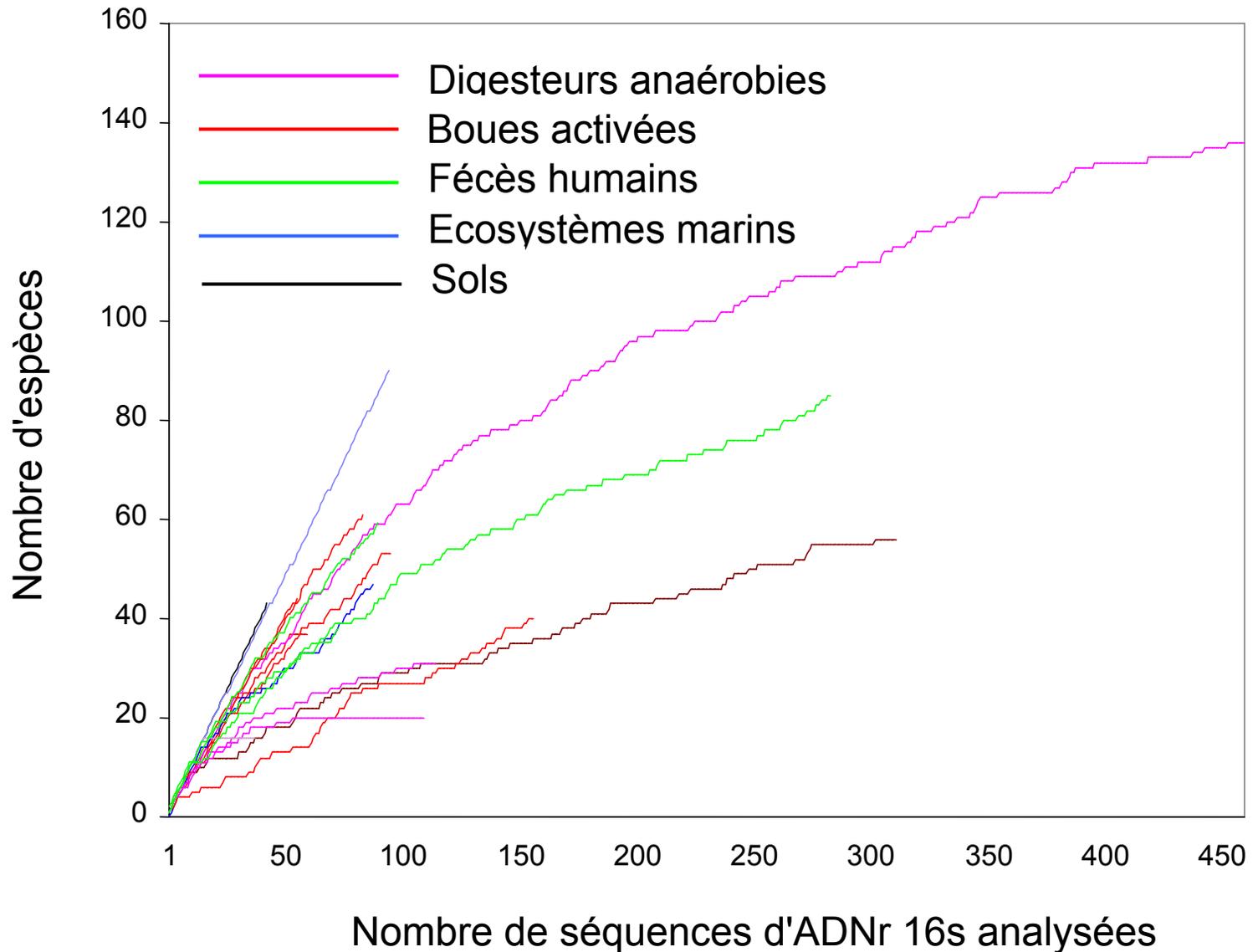


La valorisation du biogaz

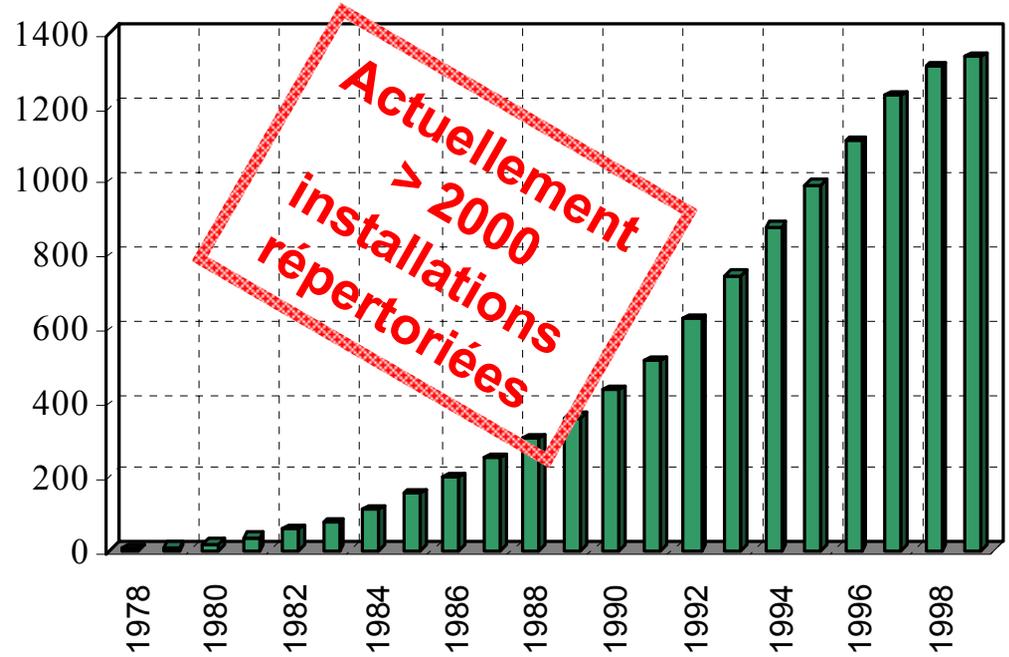
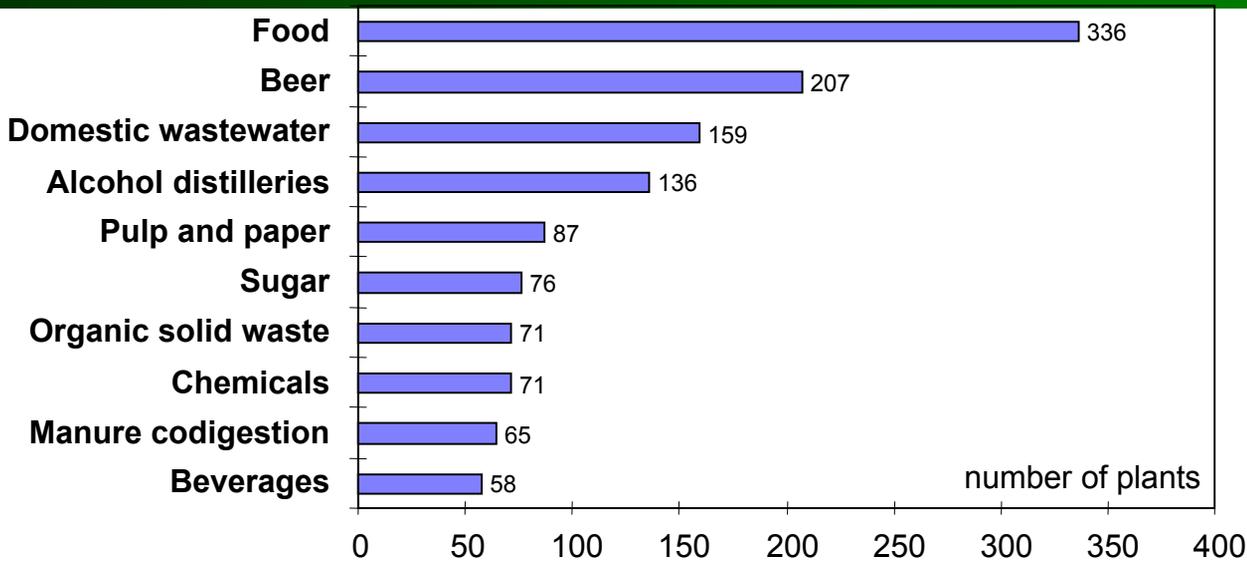


✓ Cogénération et bientôt les piles à combustible ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$)

Un procédé naturel mais complexe



Au niveau industriel

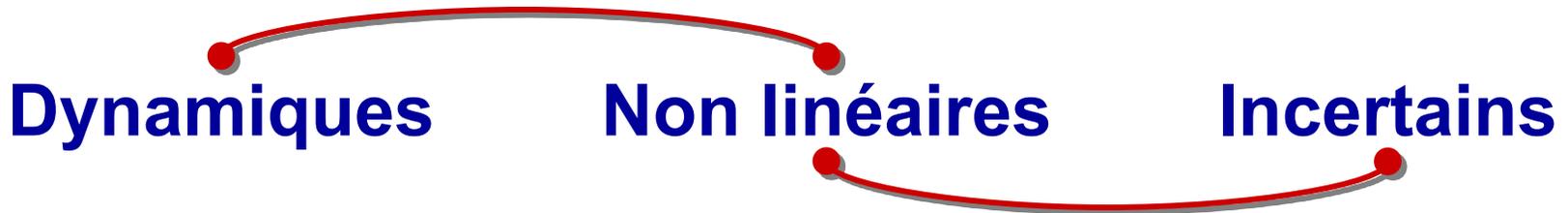


Quelques réticences à utiliser la digestion anaérobie:

- ↪ Instabilité du processus réactionnel
- ↪ Difficulté à maintenir le procédé à l'optimalité
- ↪ Manque de capteurs, d'actionneurs et d'algorithmes de commande adaptés.

**Cela devrait changer dans un proche avenir
(importance des STICs) !**

Les procédés biologiques du point de vue de l'Automatique :



1) Instrumentation

"From data poor to data rich"

2) Modèles et capteurs logiciels

"From information poor to information rich"

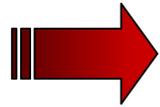
3) Contrôleurs

Utilisation des données

4) Diagnostic

Utilisation de l'information

Plan de l'exposé



Questionnement et résultats scientifiques

Instrumentation

Commande

Aide à la décision

Questionnement

- ↪ Quelle **technologie de mesure** mettre en œuvre pour quelles variables et pour quels **processus réactionnels** ?
- ↪ Avec quelle **exactitude** et quels **efforts de maintenance** ?
- ↪ Quel **modèle d'information** est nécessaire ?
- ↪ Comment gérer des **flux d'information de nature hétérogène** ?

Démarche

1) Evaluation de l'existant

⇒ Réaction chimique automatisée

2) Développement de solutions innovantes

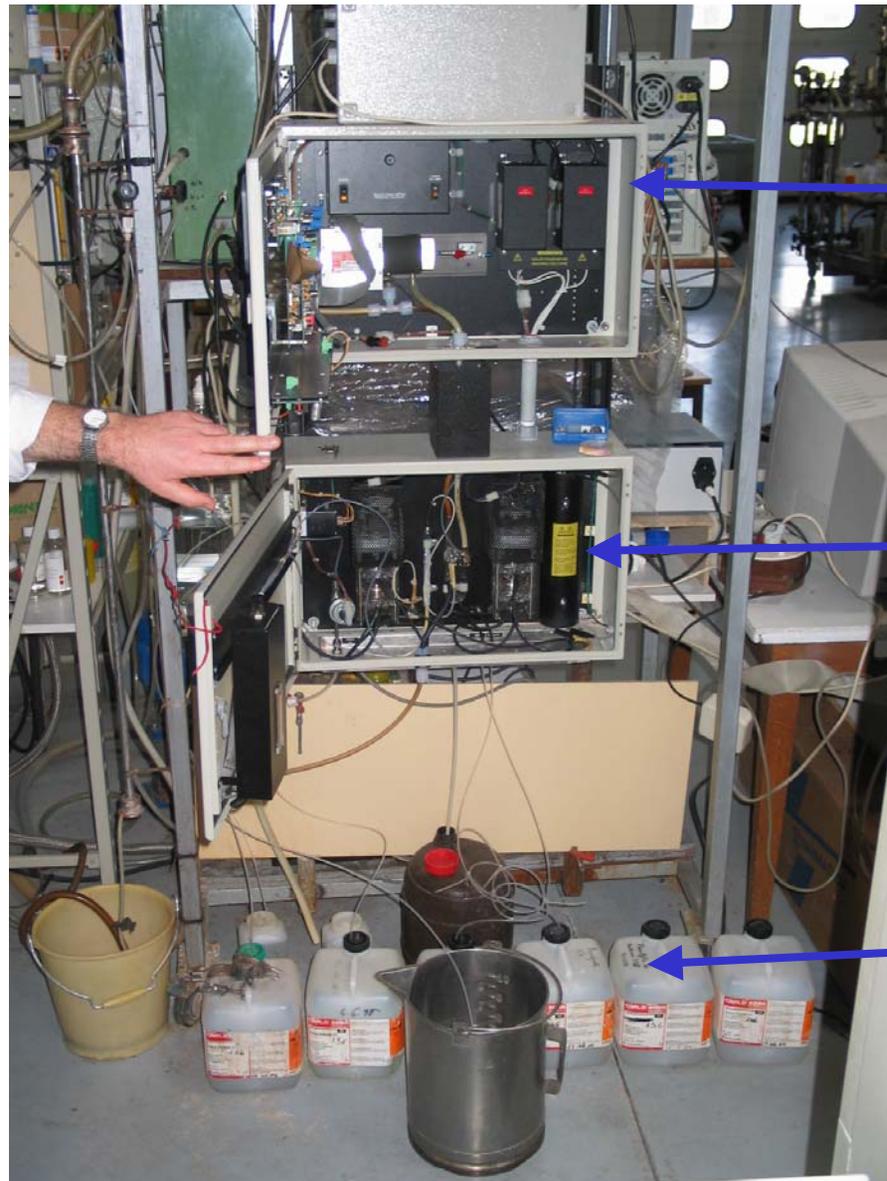
⇒ Réaction chimique automatisée et traitement mathématique

⇒ Mesures spectrales multiparamètres et traitement mathématique

3) Valorisation industrielle

⇒ 2 contrats de licence avec des sociétés internationales

Analyseur COT : Chimie automatisée

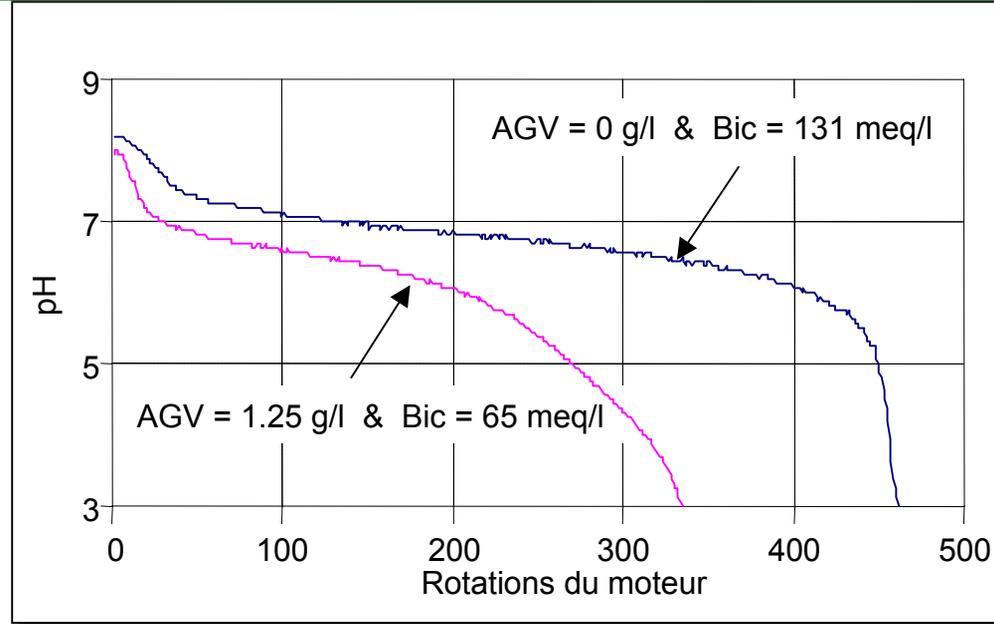


3) Le CO_2 gazeux produit est analysé par un capteur IR et est proportionnel à la concentration en COT

2) L'échantillon libre de CO_2 dissous est oxydé avec une lampe UV

1) Ajout de produits chimiques pour enlever le CO_2 dissous de la phase liquide

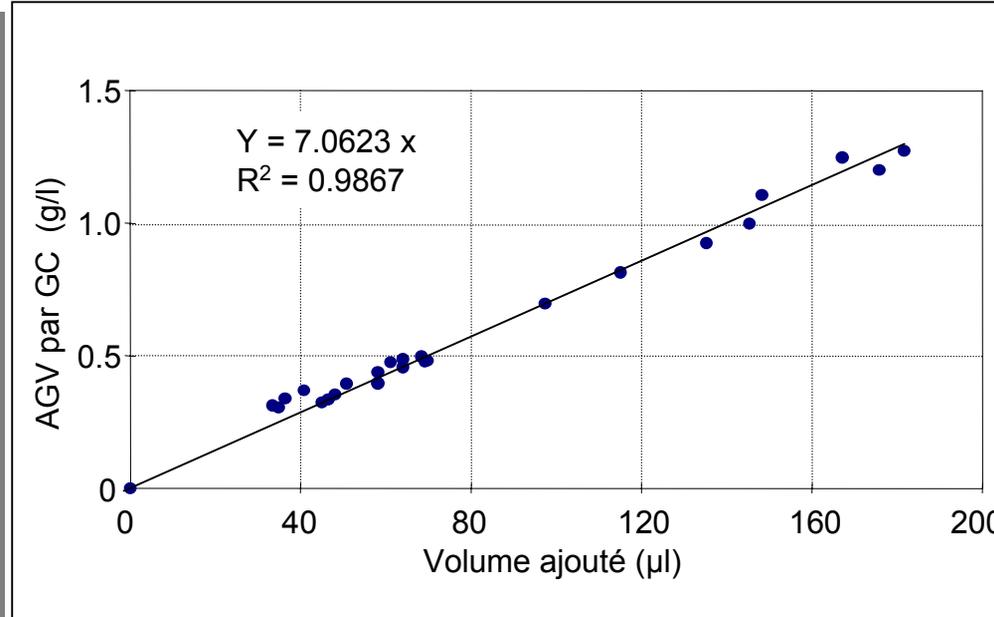
Capteur titrimétrique: chimie + maths simples



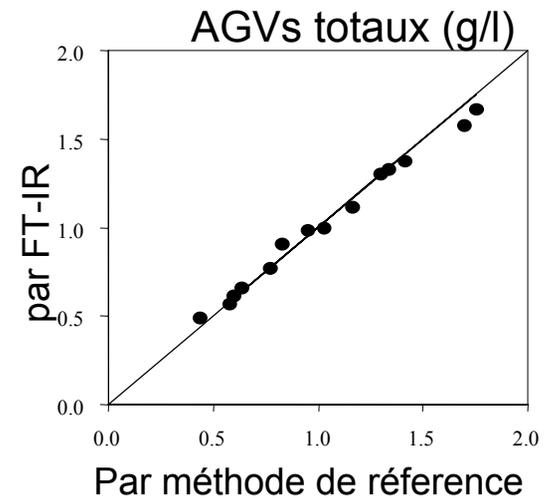
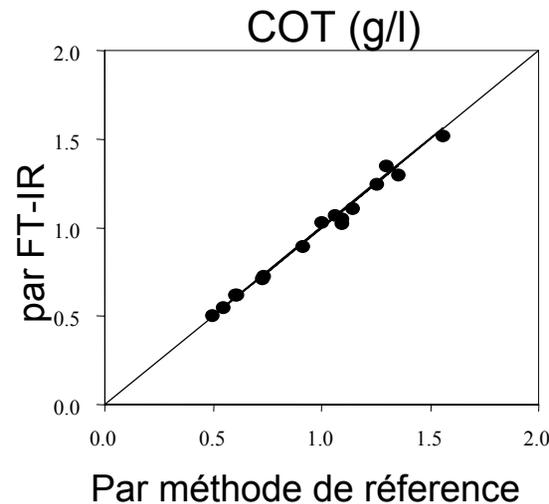
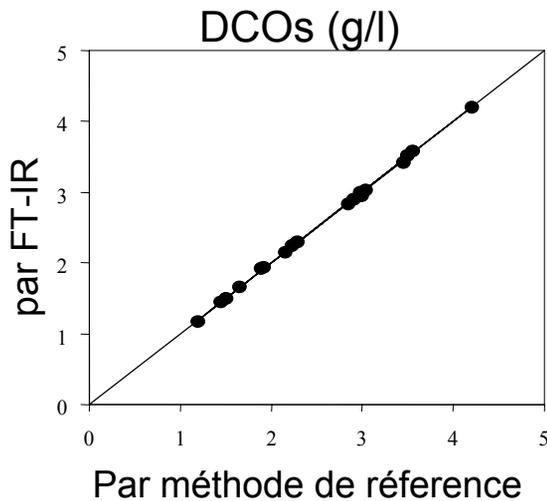
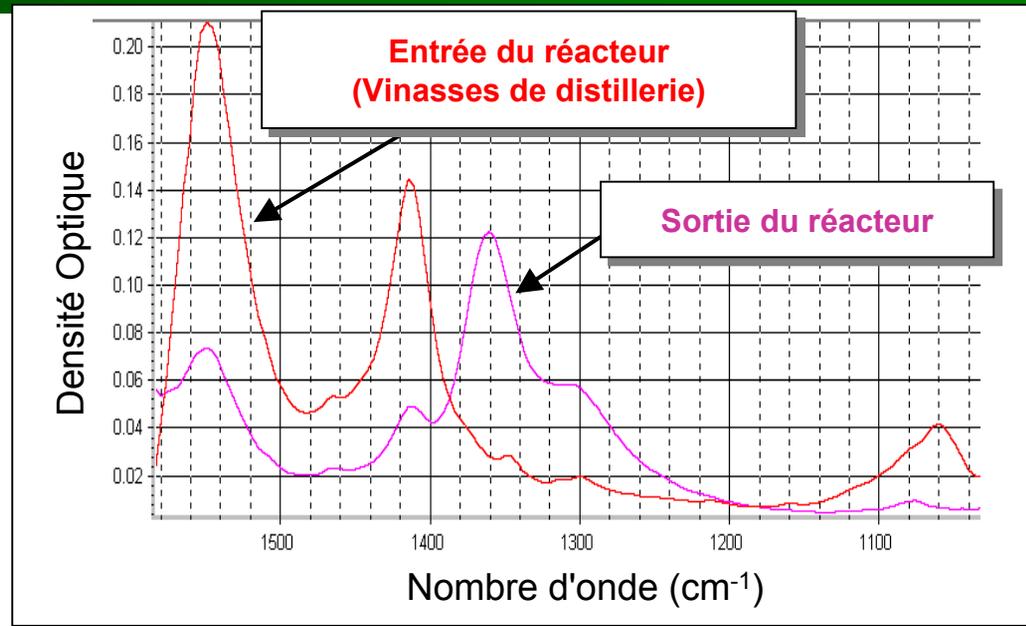
Mesures
des alcalinités totale et partielle

Estimation
des concentrations
en bicarbonate et AGV

(toutes les 3 minutes si besoin)

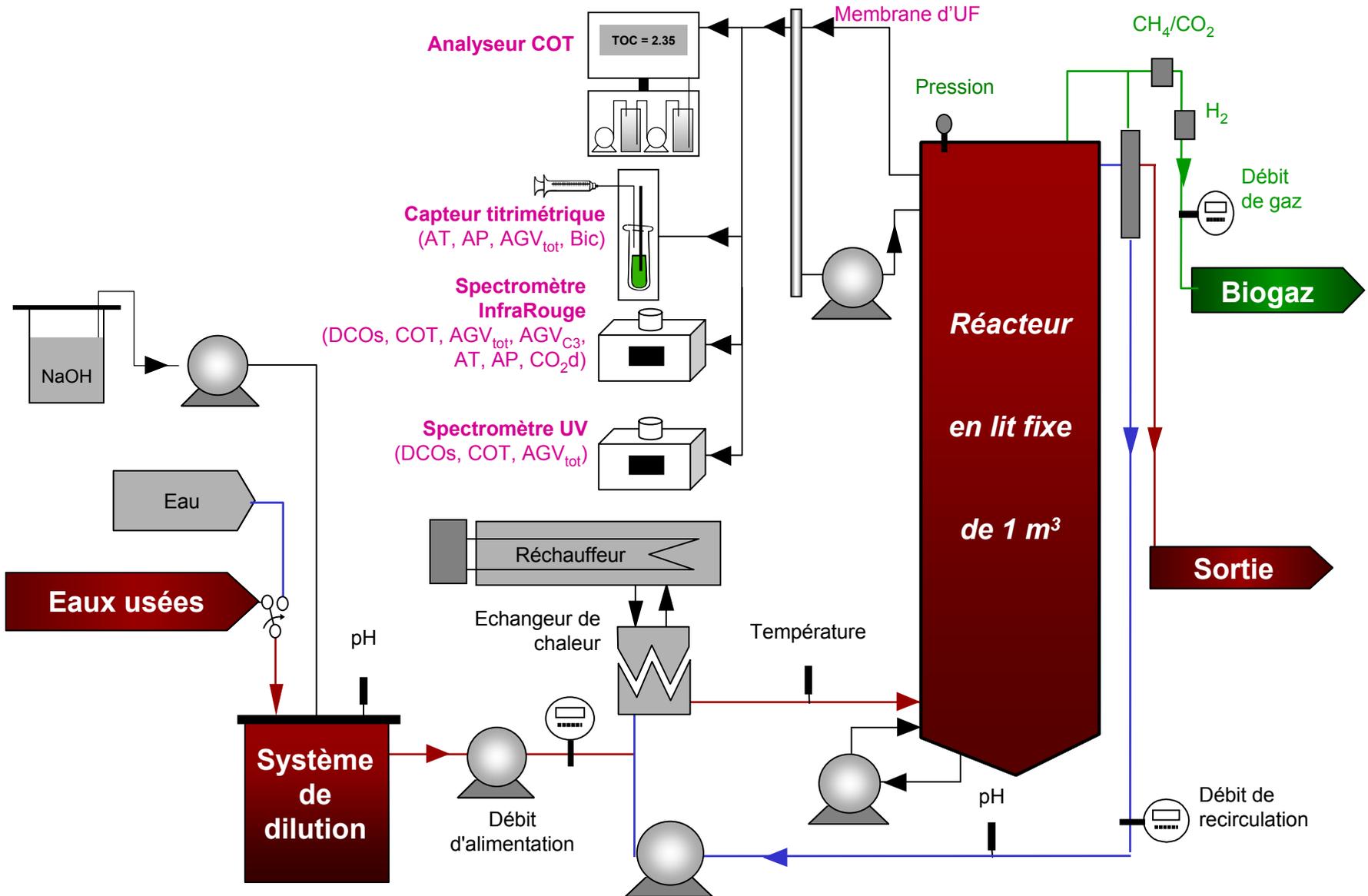


Spectromètre MIR : lumière + maths avancées



Résultats identiques sur les alcalinités partielle et totale, le CO₂ dissous, l'acétate, ...

Validation sur un procédé pilote



Le procédé utilisé

En 1997



Depuis 2000



Bilan sur l'instrumentation en ligne

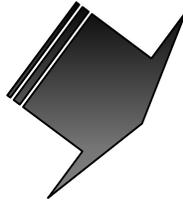
	Instrumentation classique (pH, T, Qgas, %CO2, P)	Analyseur COT	Capteur titrimétrique	Spectromètre UV	Spectromètre MIR
Alcalinité partielle			✓		✓
Alcalinité totale			✓		✓
Bicarbonate	✓		✓		✓
CO2 dissous	✓				✓
COT		✓		✓	✓
DCO soluble				✓	✓
AGVs totaux			✓	✓	✓
Acétate					✓
Autres (eg., N, P)			✓	✓	✓

Mesures spectrales:

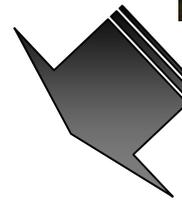
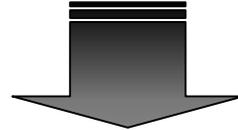
- ⇒ **Multiparamètres**
(coût moindre à l'achat)
- ⇒ **Pas de réactifs chimiques**
(coût opératoire moindre)
- ⇒ **Utilisation des STIC**
(calibration délocalisée)
- ⇒ **Traçabilité**
(mesure + qualité de la mesure)

Bilan sur l'instrumentation en ligne

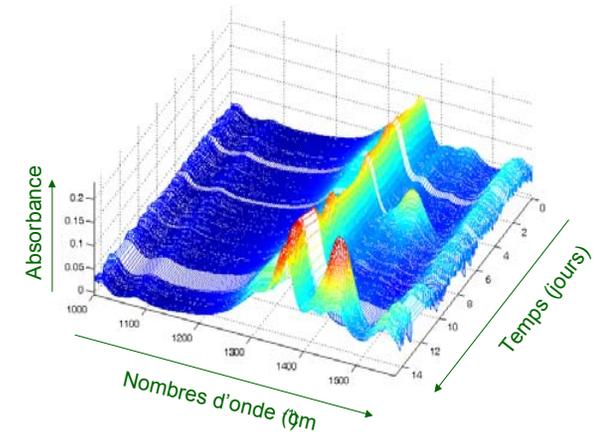
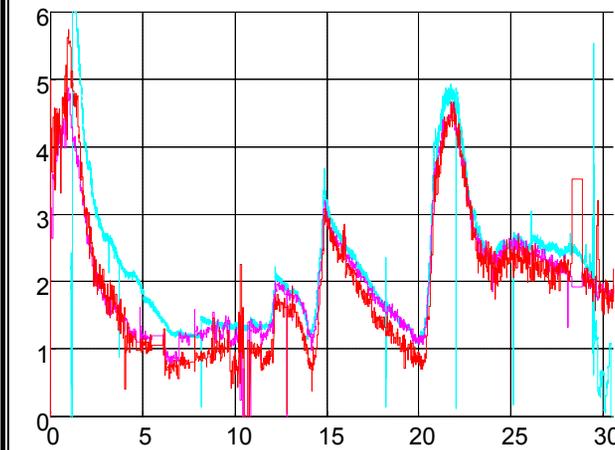
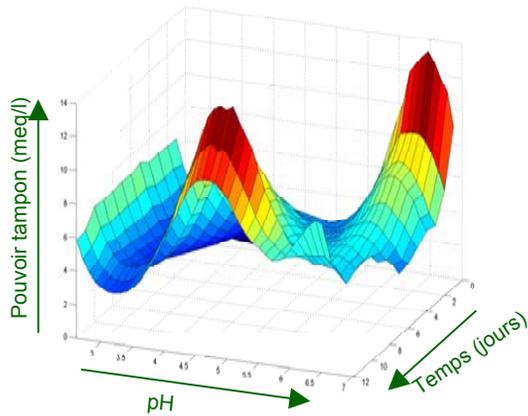
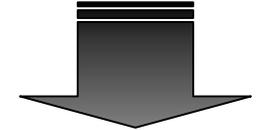
Anasense®



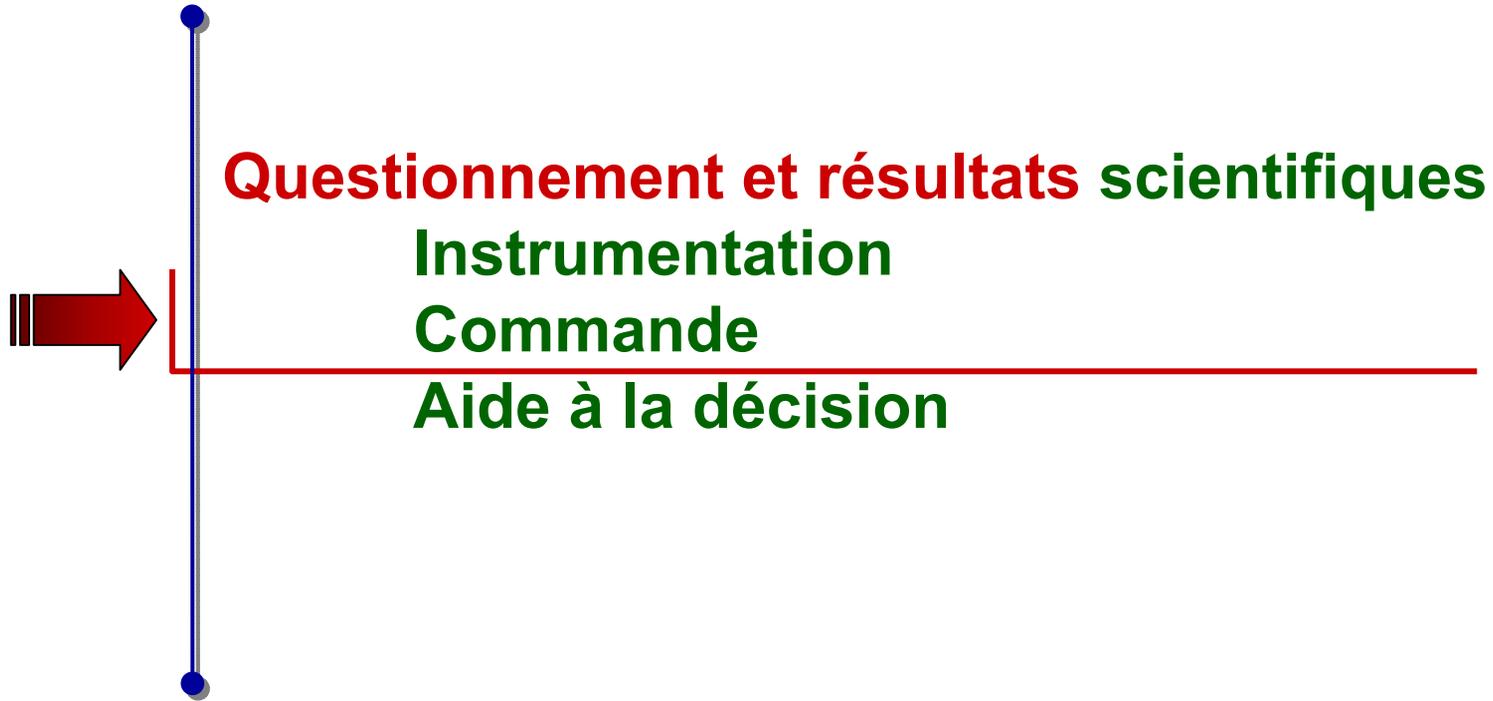
COTmètre



FT-IR sur site industriel



Plan de l'exposé



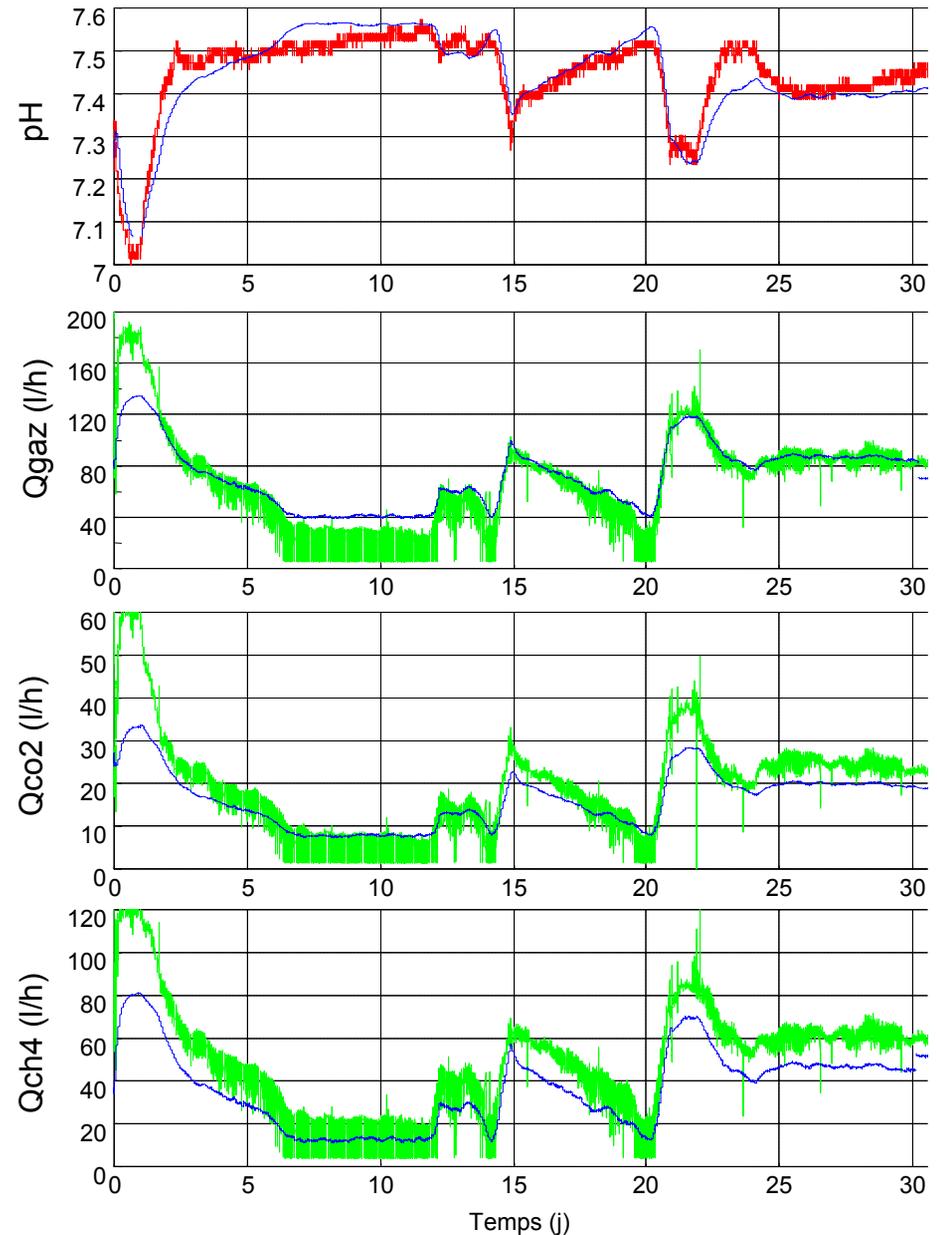
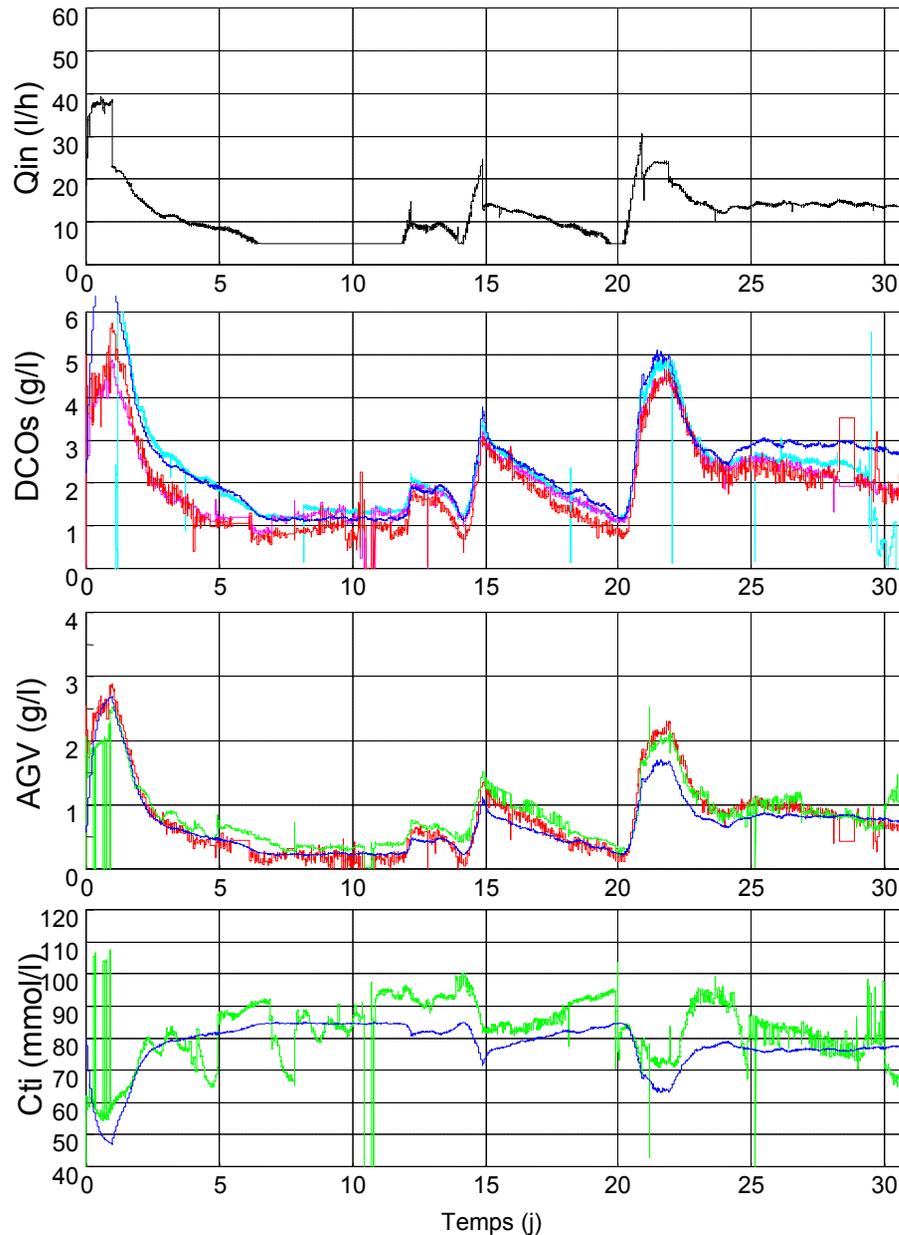
Longue expérience et expertise de l'équipe

Choix d'une *méthodologie en fonction des objectifs recherchés*

- Modélisation dynamique par *équations différentielles ordinaires*,
par *logique floue*,
par *réseaux de neurones artificiels*,
- Modélisation spatio-temporelle par *équations différentielles partielles*,
par *systèmes multi-agents*,
- Modélisation algébrique et *invariants réactionnels*,
- Modélisation qualitative par *graphe causal*,
- Modélisation hybride et *automates temporisés*.

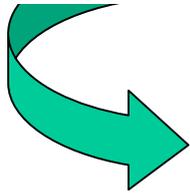
Résultats en Septembre 2001

(modèle développé en 1997)

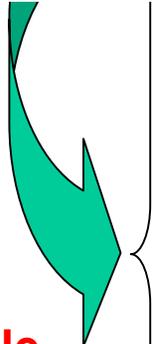


Le besoin de gestion de l'incertitude

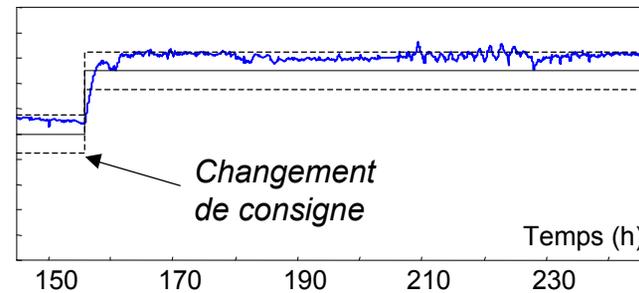
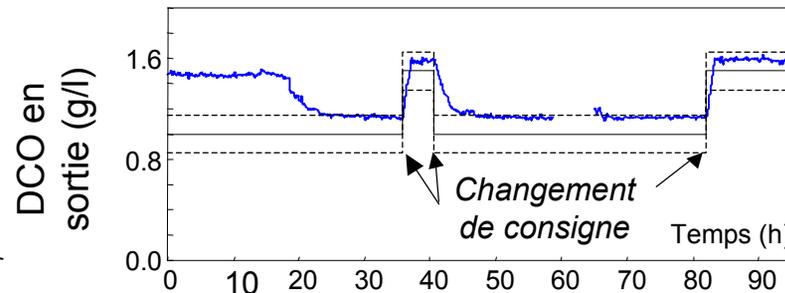
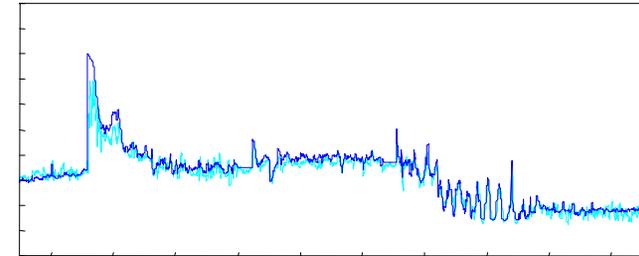
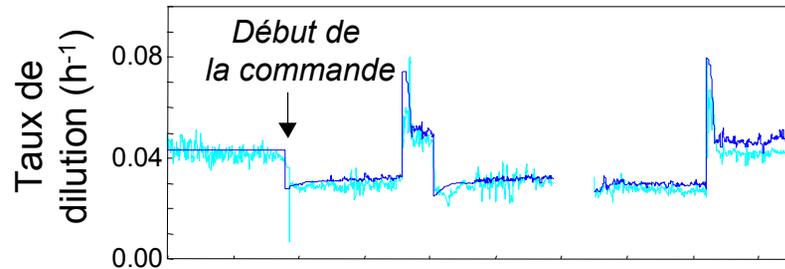
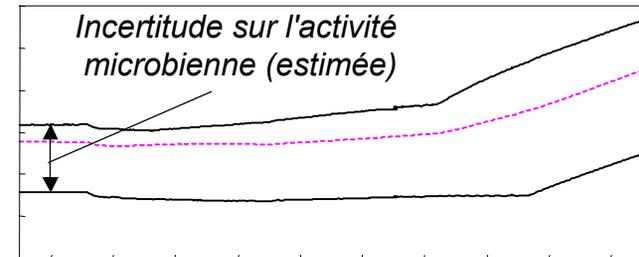
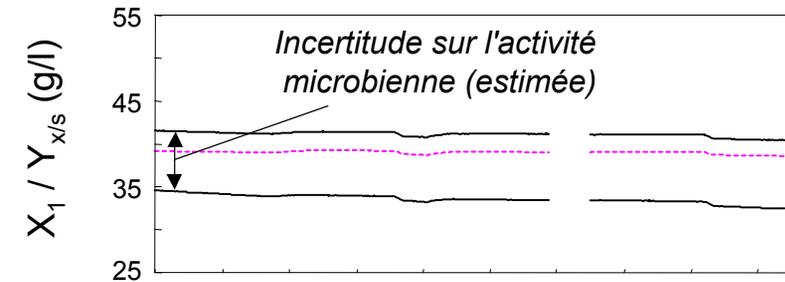
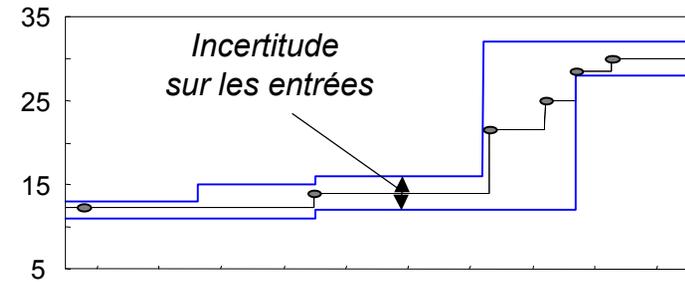
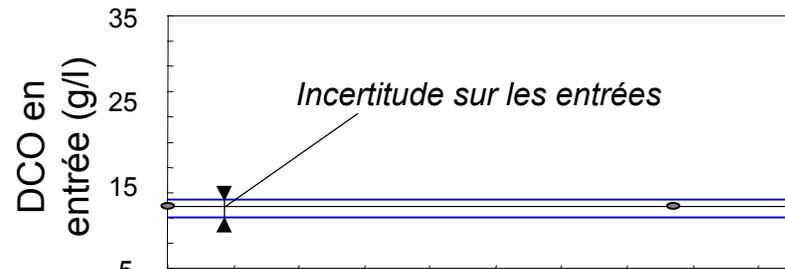
**Hypothèses
 (connaissance
 a priori)**



**Estimation
 des variables
 clés**



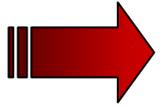
**Contrôle
 robuste
 non-
 linéaire**



Développement et mise en œuvre expérimentale de multiples approches de commande

	Performances	Complexité
PID	☹️	😊
Logique Floue	😊😊😊	😊
Réseaux de neurones	😐😐	😐😐
Commande adaptative	😊😊😊	😐😐
Commande linéaire optimale	😐😐	😐😐
Commande robuste non lineaire	😊😊😊	☹️☹️☹️

Plan de l'exposé



Questionnement et résultats scientifiques
Instrumentation
Commande
Aide à la décision

Comment prendre en compte
des **sources d'informations hétérogènes**
(*i.e.*, capteurs, modèles, avis d'experts,...),
imprécises et incomplètes,

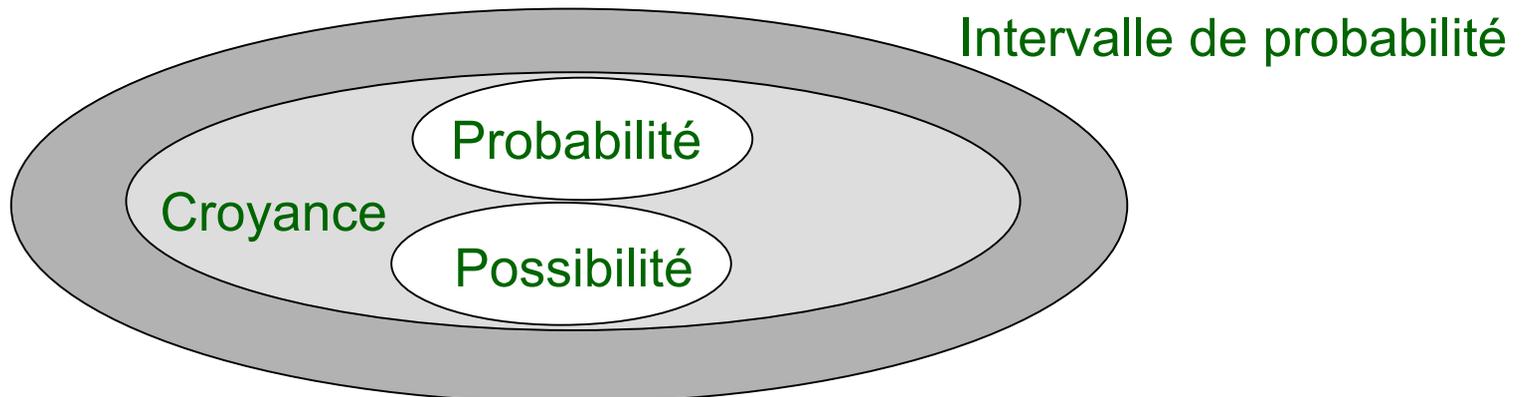
pour concevoir un système de **diagnostic**
performant, modulaire, portable et évolutif ?

Comment représenter l'incertitude ?

Probabilité: ✓ Approche intuitive et la plus utilisée,
✓ Basée sur la fréquence d'occurrence d'un évènement.

Possibilité: ✓ Approche liée à la logique floue,
✓ Notions de plausibilité et de nécessité d'un évènement.

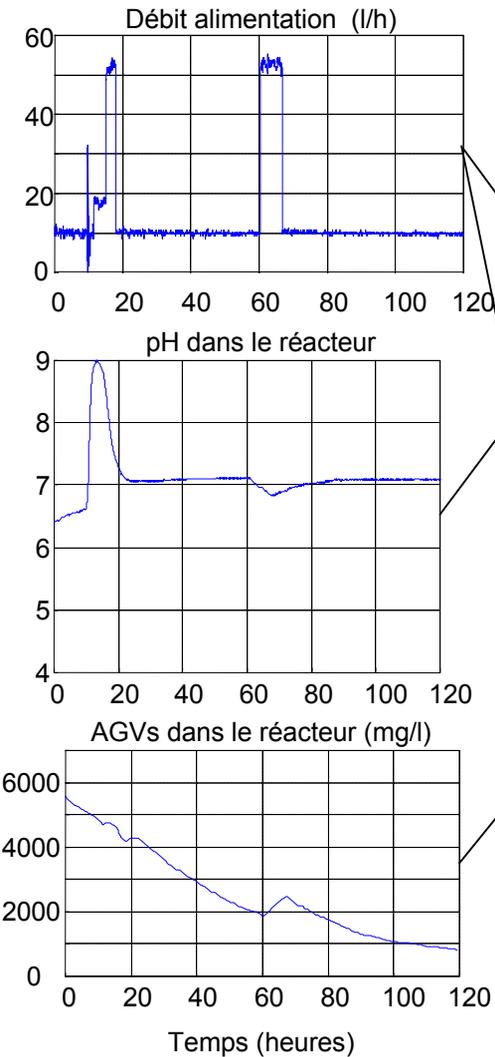
Croyance: ✓ Généralise la notion de probabilité,
✓ Permet de manipuler des **évènements non exclusifs**,
✓ Permet de gérer les informations incertaines.



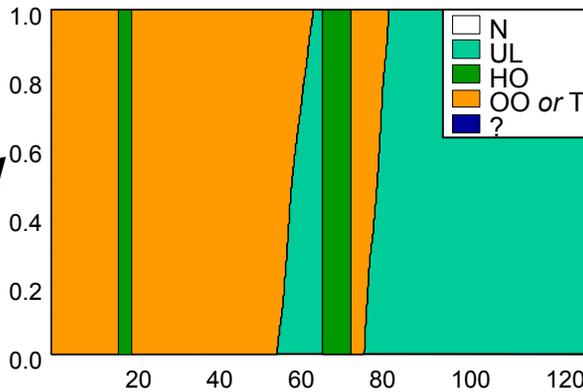
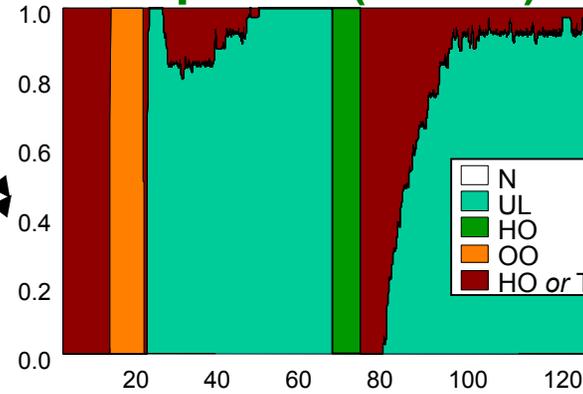
Analyse de la typologie des états du procédé

Normal:	Conditions nominales de fonctionnement;
Sous-charge:	Charge organique insuffisante, sous optimalité;
Surcharge organique:	Concentration de l'effluent à traiter trop forte, risque d'inhibition;
Surcharge hydraulique:	Taux de dilution trop élevé, risque de lessivage;
Toxicité:	Présence d'éléments toxiques dans l'alimentation.

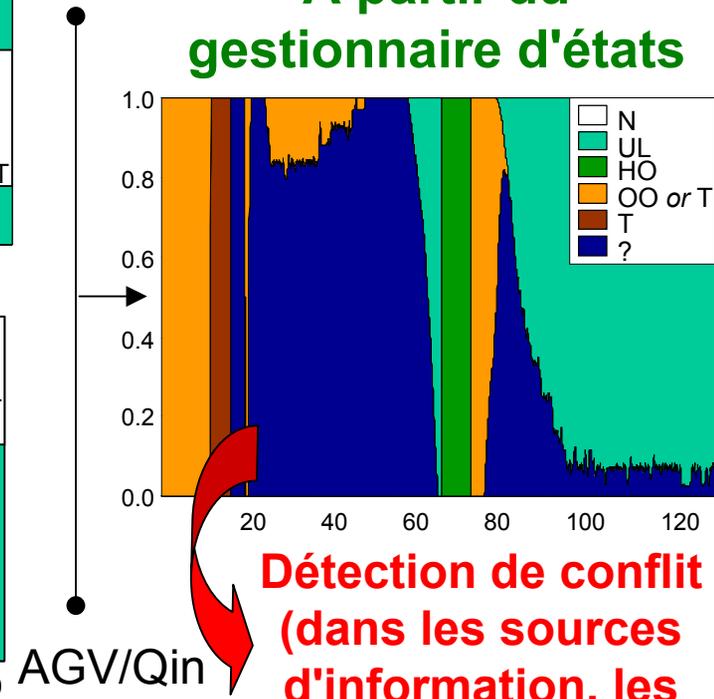
Détection de l'état du procédé



**A partir de règles
 expertes (floues)**



**A partir du
 gestionnaire d'états**

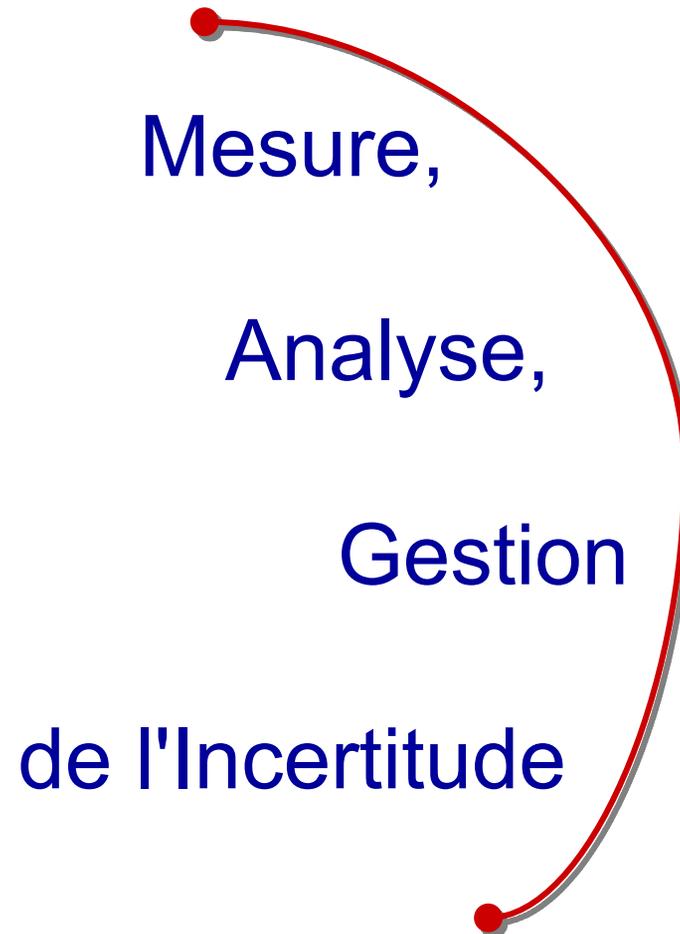


**Détection de conflit
 (dans les sources
 d'information, les
 modèles, les règles
 expertes, ...) et appel
 d'un expert distant**

Plan de l'exposé



Bilan

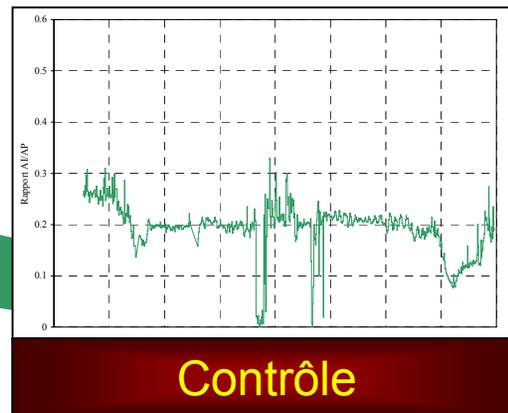
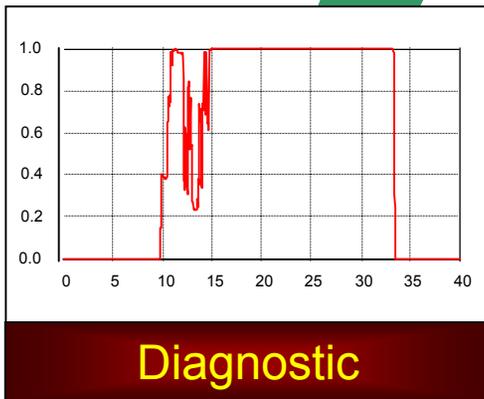
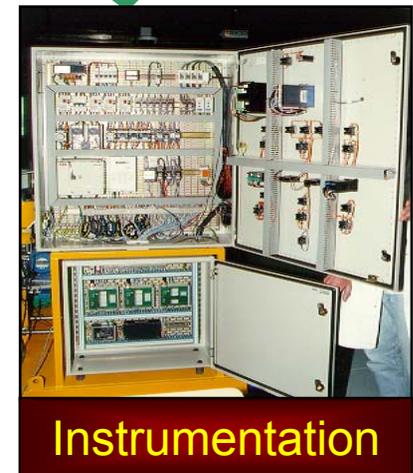


Conclusions

"A" est très efficace
ssi toutes les étapes
sont intégrées



"I" est nécessaire



"D" impose modularite et
gestion de l'incertitude

"C" peut être facile
si "I" est disponible
(difficile sinon)

Plan de l'exposé

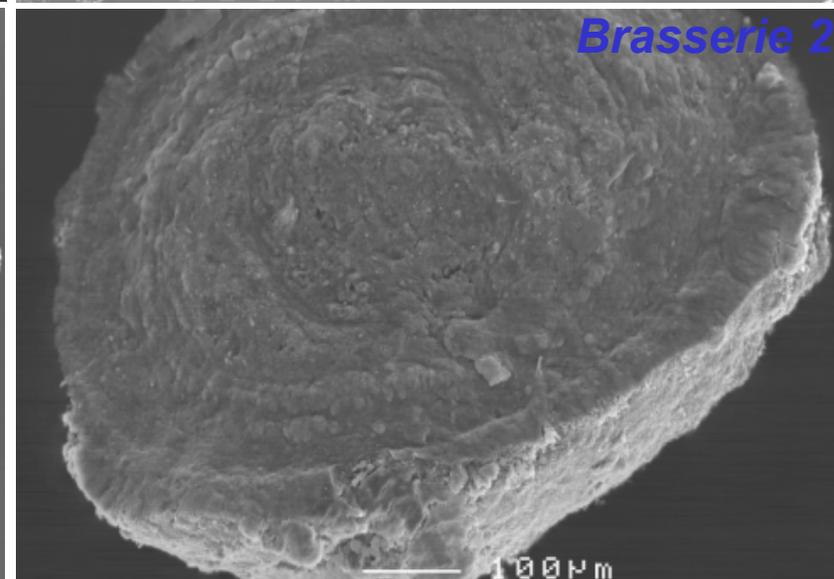
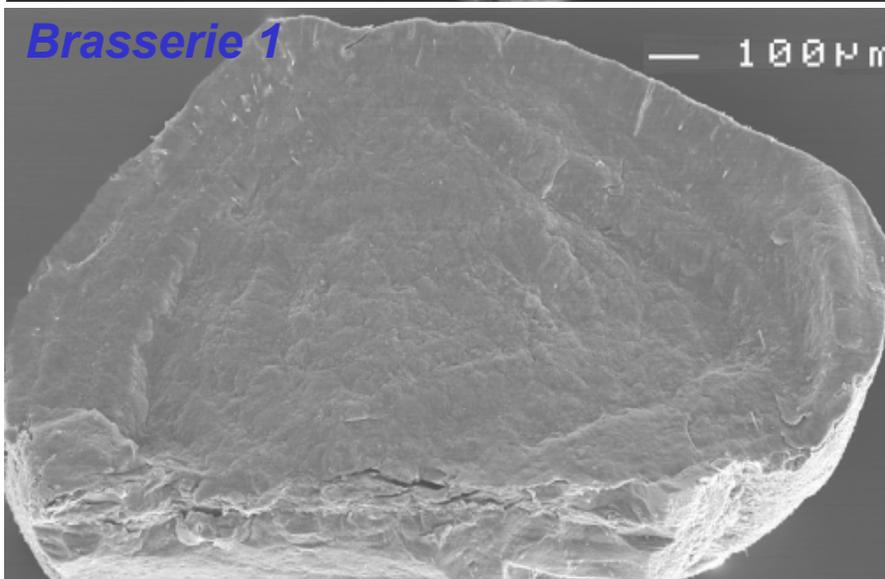
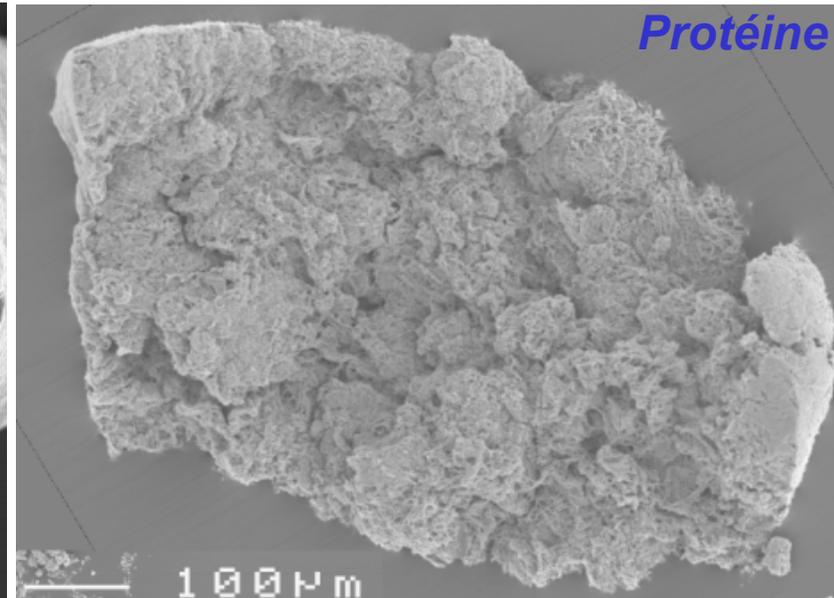
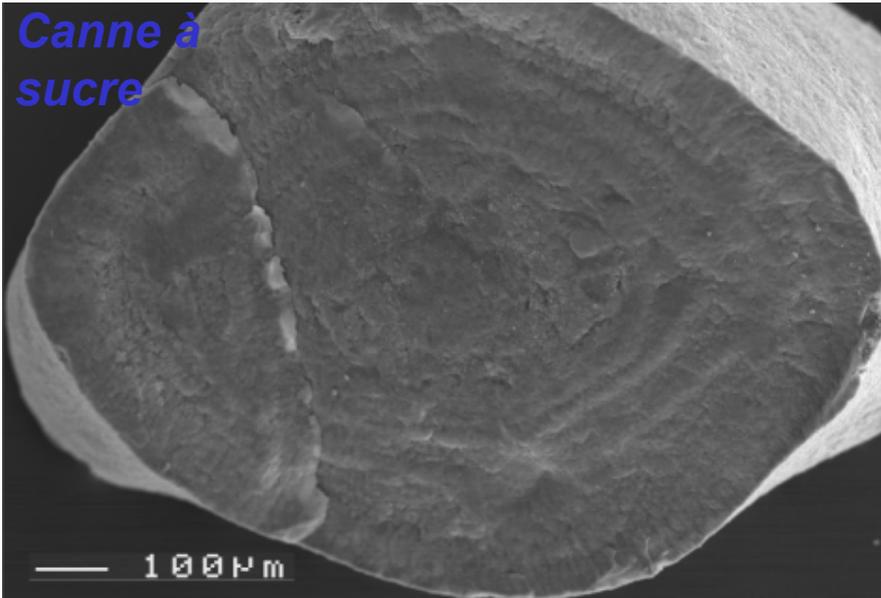


↪ Se rapprocher de la réalité biologique

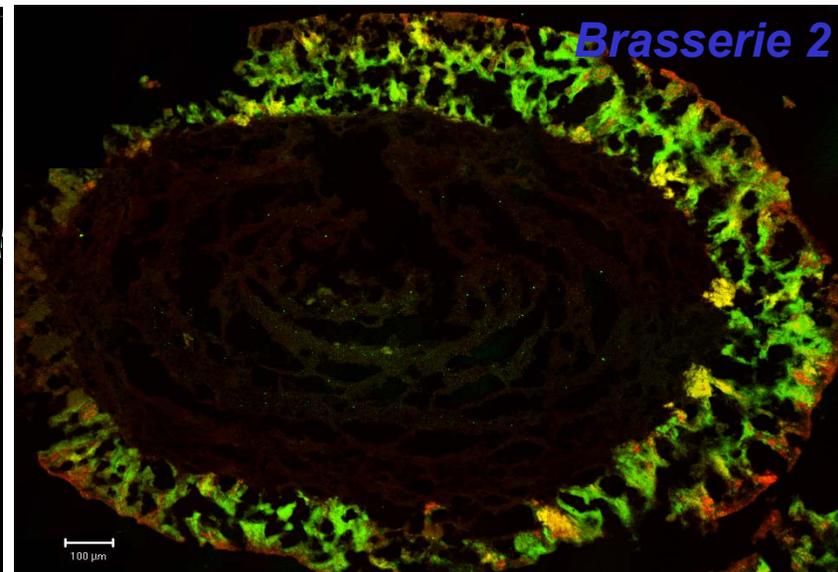
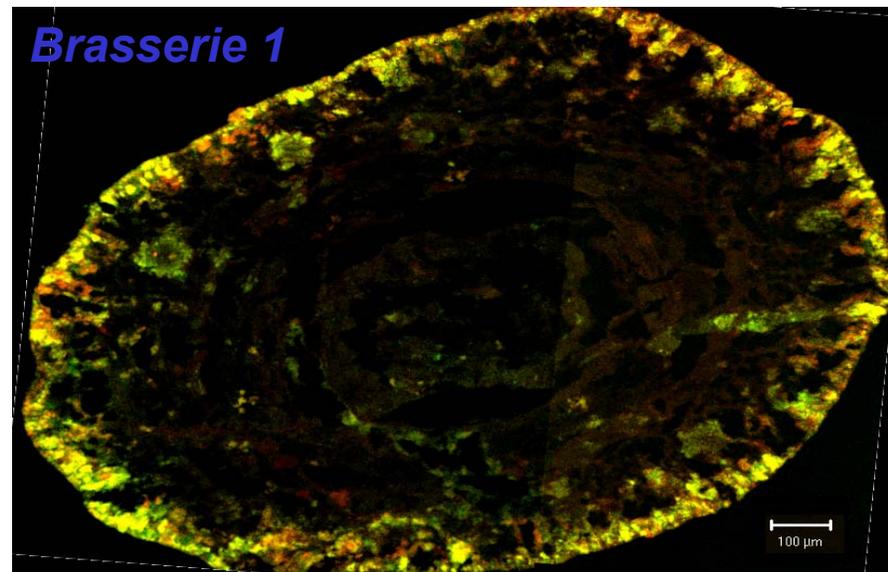
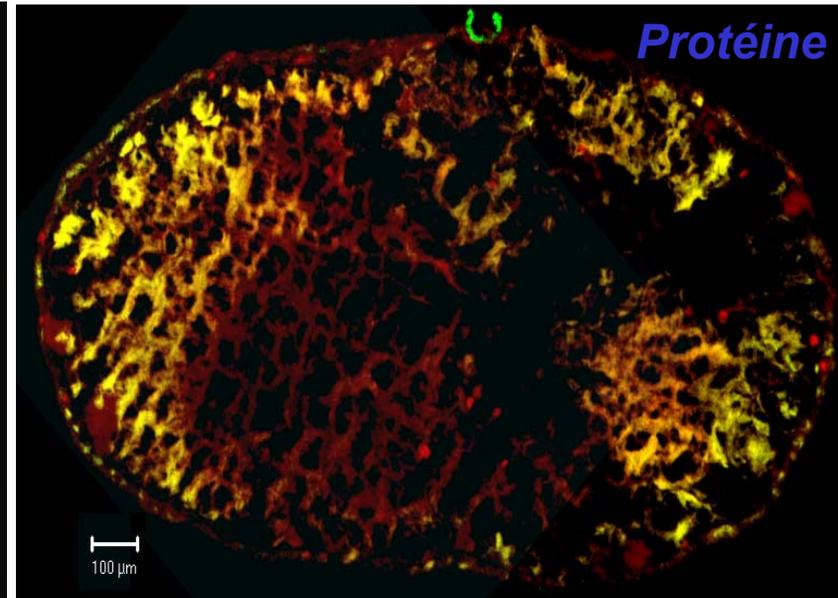
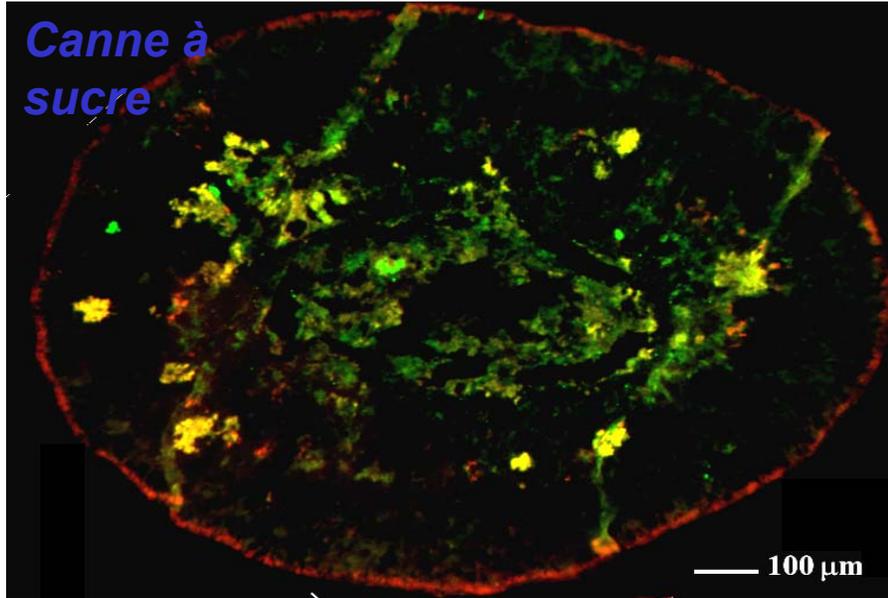
↪ Quel degré de complexité nécessaire et suffisant pour suivre/comprendre/analyser/gérer ?

- ✓ Instrumentation
- ✓ Analyse/optimisation
- ✓ Diagnostic

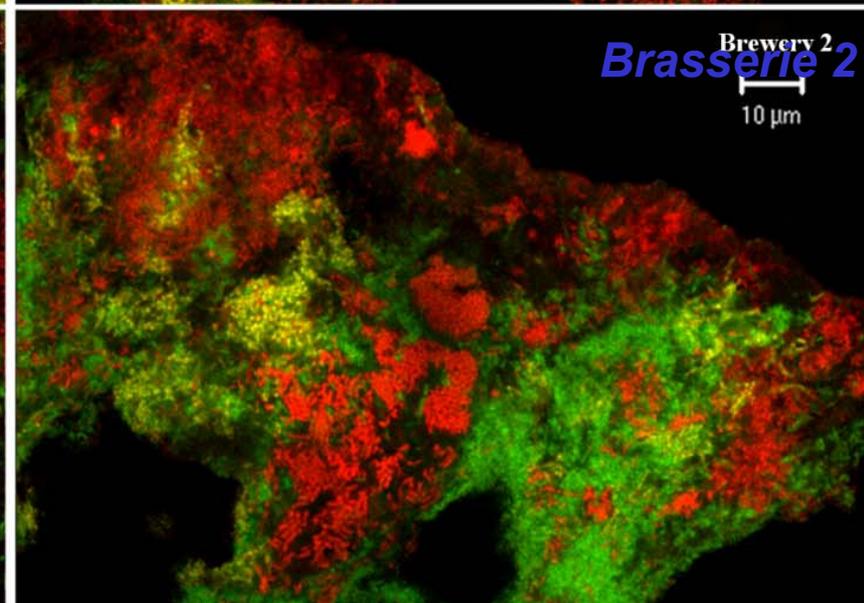
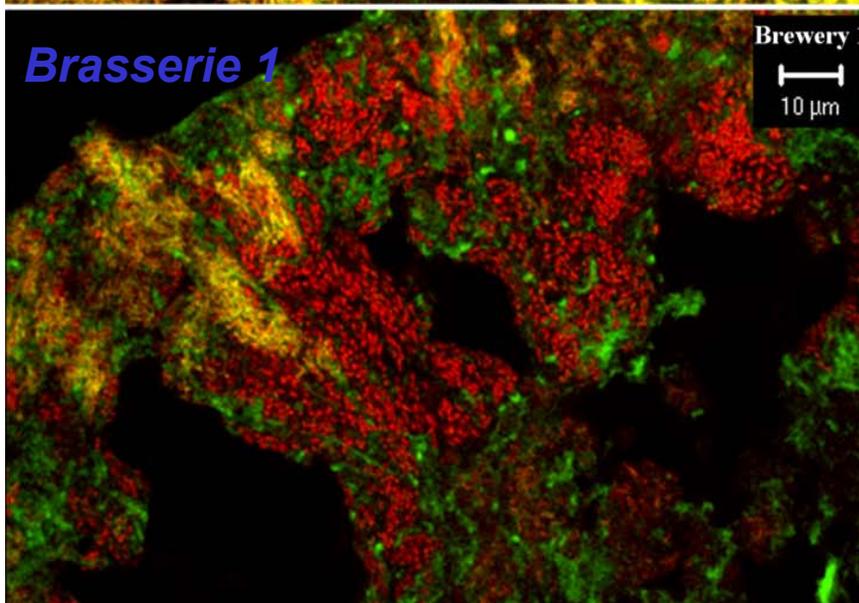
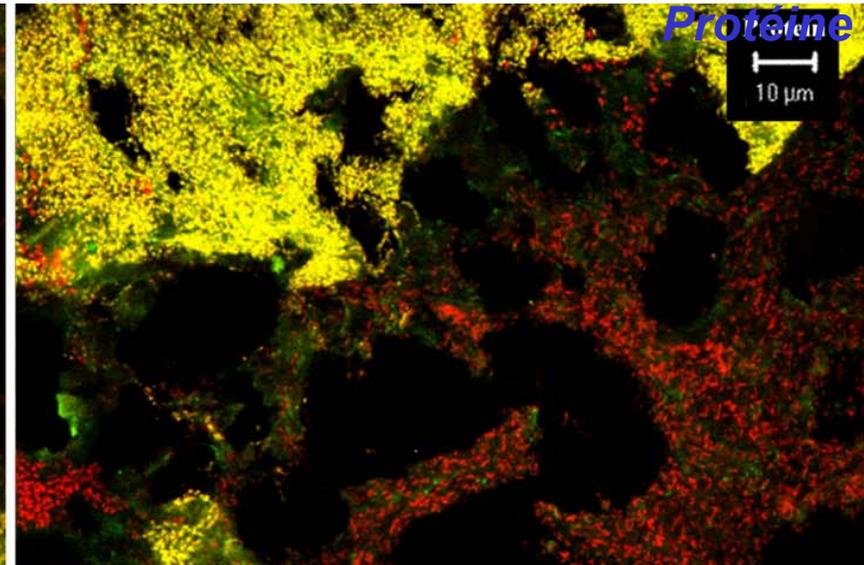
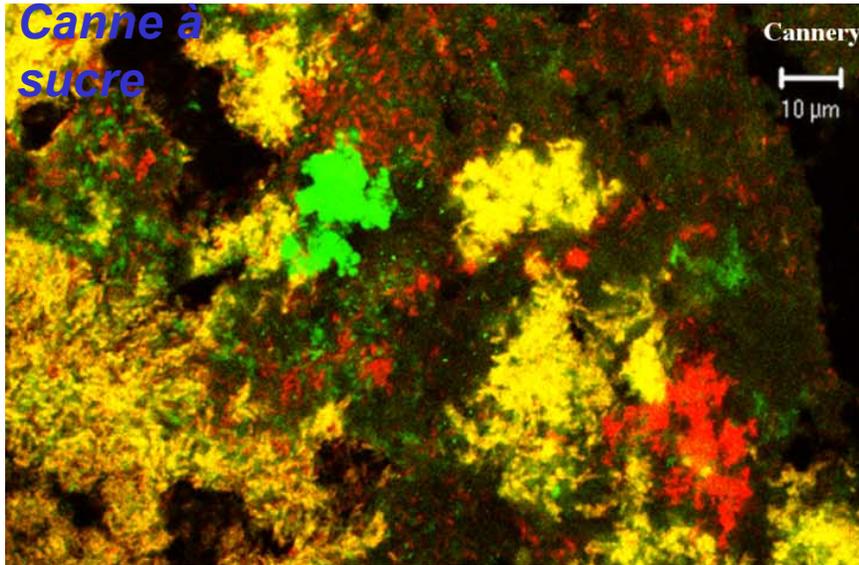
Vues de granules au microscope



Vues au microscope + FISH



Vues au microscope + FISH



Conclusions

L'Automatique :

- ▶ une science à part entière ayant sa place à l'INRA
- ▶ vient en appui d'autres thématiques scientifiques
- ▶ offre un cadre mathématique rigoureux pour l'analyse des systèmes dynamiques

$$\frac{d}{dt} \left[\text{Image of Earth} \right] = F \left(\left[\text{Image of Microbiology} \right], \left[\text{Image of Bioreactor} \right], \left[\text{Image of Control Panel} \right], t \right)$$

Un grand merci à ...

Arnaud Hélias

Laurent Lardon

Djalel Mazzouni

Maya Ignatova

Maxime Estaben

Antoine Genovesi

Alexandre Trofino

Victor Alcaraz

Ana Punal

Cyrille Bronner

Luca Palazzotto

Martijn Devisscher

Marianne Dupla

James Lennox

Vincent Noby

François Miens

Jean-Baptiste Loos

Christophe Armaing

Damien Rolland

Hugo Mendez

Viviane Cadenat

Jorge Rodriguez

Christophe Bataille

Thierry Bort

Ivan de Andolenko

Noe Le Guerranic

Anne-Gaëlle Manh

Jean-Pierre Jouanny

Bérengère Vialelle

Amaya Franco

Michel Solatges

Magali Salas

Jérôme Demoutier

Ludivine Pacheco

Loïc Bonnet

Teddy Picanon

Mario Male

Didier Gleize

Damien Torrent

Olivier Roberge

Benjamin Bonnet

Emmanuel Morel

Erig Rospape

Cyrille Trzebowski

**et à tous nos collègues de l'INRA, de l'INRIA, du CNRS et de l'industrie
qui, à un moment ou à un autre, ont contribué à ces travaux !!!**

Et merci à vous pour votre attention !

