



# CARBIOS

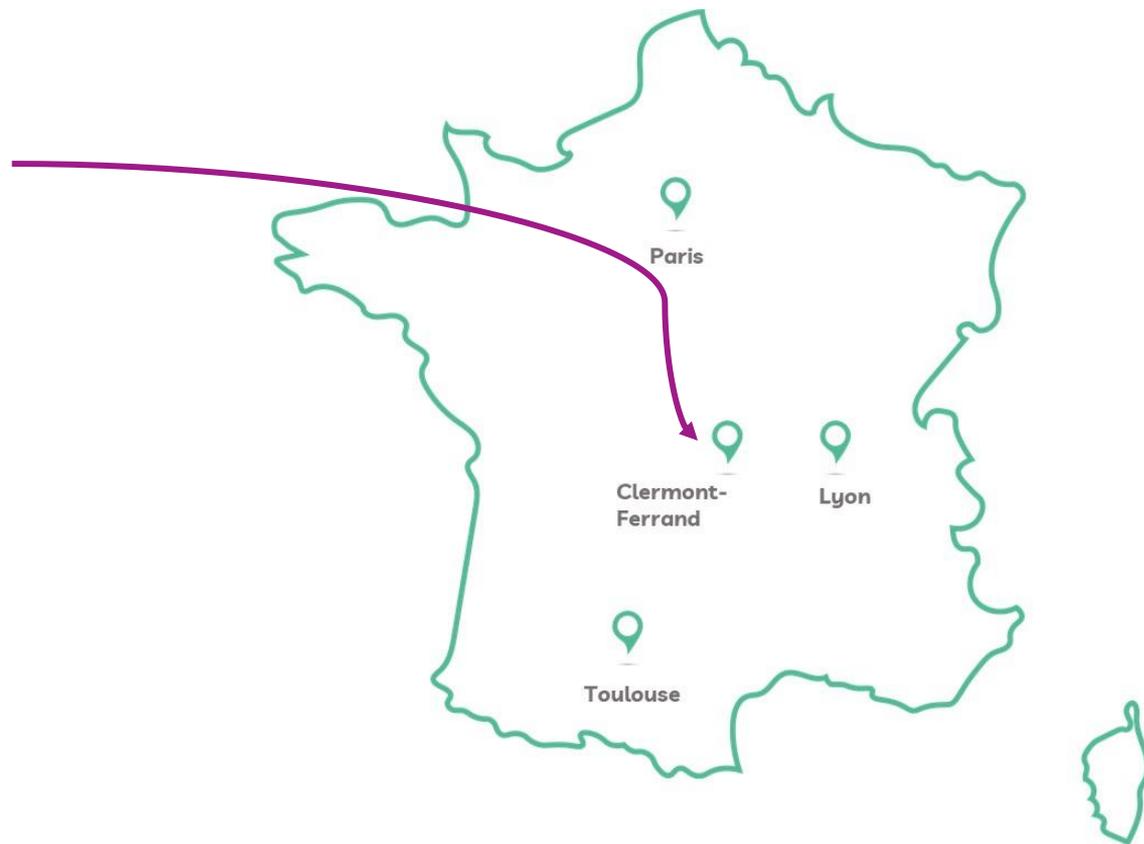
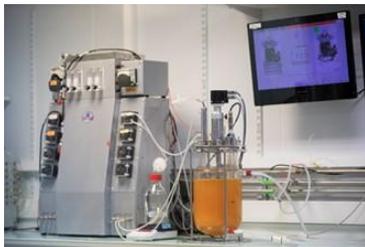
Enzymes powering the Circular Economy

Prof. Alain Marty

**Société**  
**d'Encouragement**  
**pour l'industrie**  
**nationale** FONDÉE EN 1801

# Notre mission: améliorer le cycle de vie des plastiques

Créée en Avril 2011  
Staff: 40 (24 en R&D)



Notre credo:

LE PLASTIQUE EST UN BIEN, C'EST LE DÉCHET PLASTIQUE LE PROBLÈME



1,3 milliard de tonnes de nourriture gâchée chaque année dans le monde



30% d'une voiture en plastique, soit 200 kgs d'économie



Le Polyester 40 Mt / an 1<sup>ère</sup> fibre



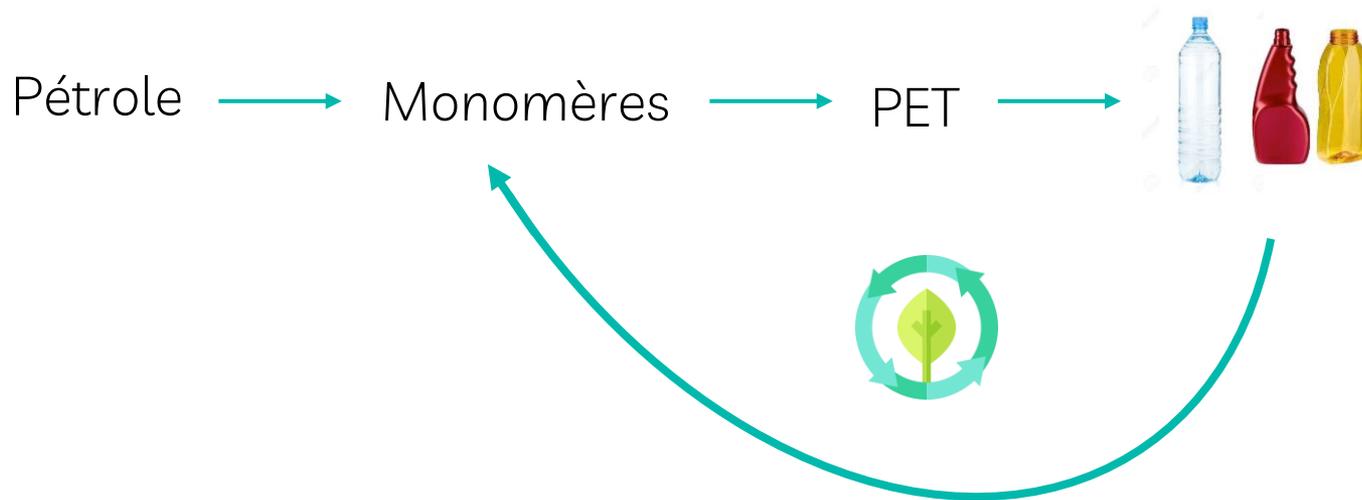
# C'est le déchet plastique le problème

DEPUIS 1950, L'HOMME A FABRIQUÉ 8,3 MILLIARDS DE TONNES DE PLASTIQUE  
SANS SE SOUCIER DE SA FIN DE VIE

Une économie linéaire



# La solution : une économie circulaire



# Notre mission: améliorer le cycle de vie des plastiques

2 compétences

→ Science des Polymères

→ Enzymologie

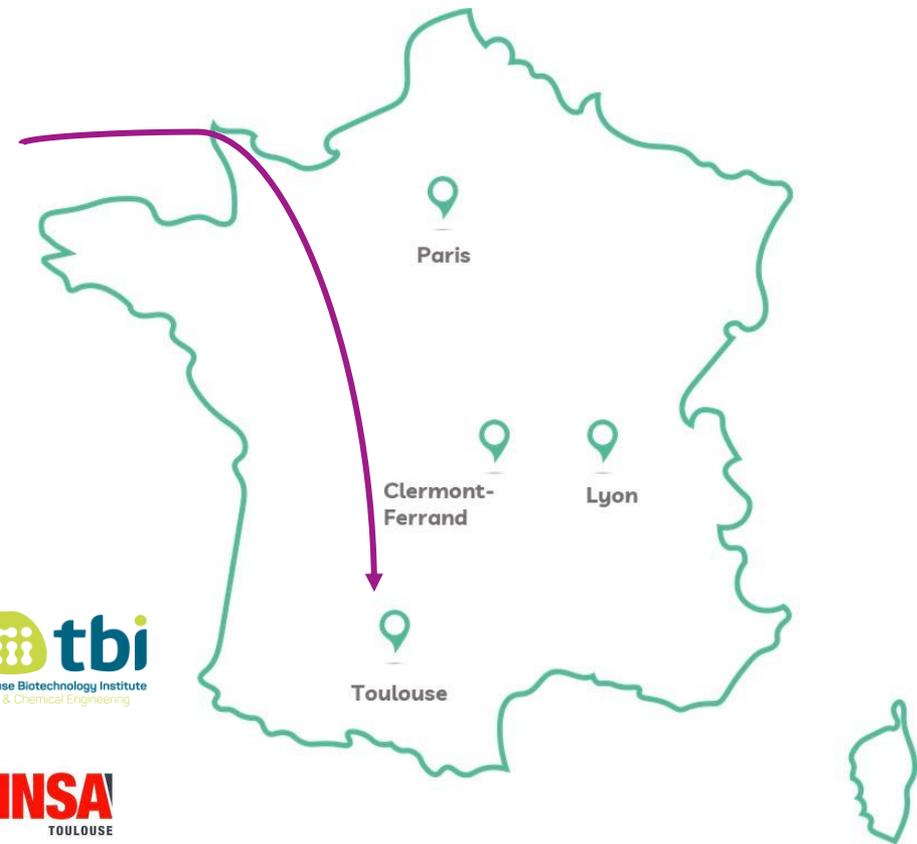
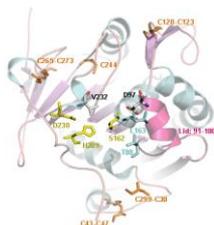
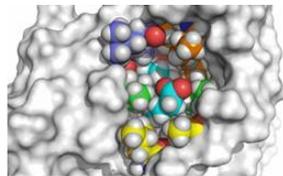
- Réacteur enzymatique (0.5L-1 m<sup>3</sup>)
- Procédés de purification (échelle pilote)



# Notre mission: améliorer le cycle de vie des plastiques

CENTRE COLLABORATIF DE RECHERCHE

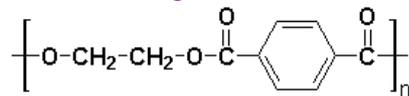
→ Ingénierie enzymatique



# Des Enzymes pour le recyclage à l'infini du PET



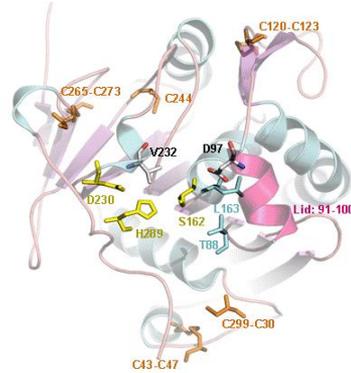
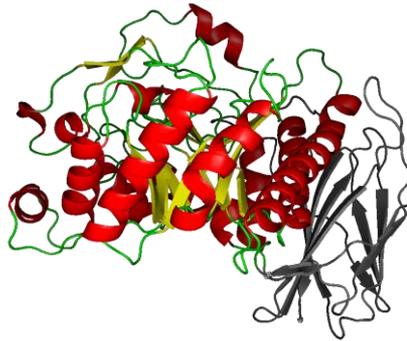
**VIRGIN QUALITY PET**



70 Mt/an



# Une enzyme : Quésaco ? !



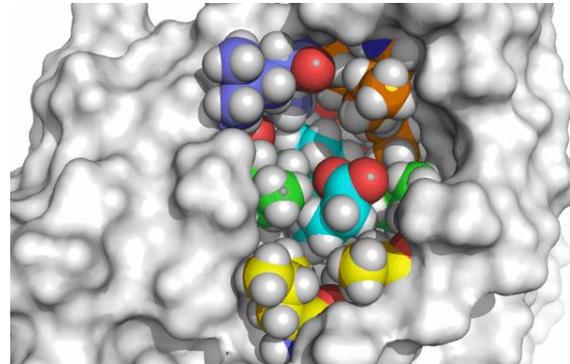
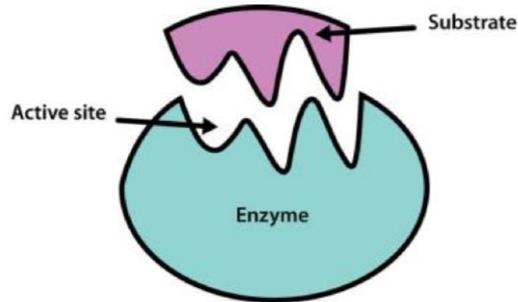
Enzyme = Protéine

Polymère fait d'acides aminés

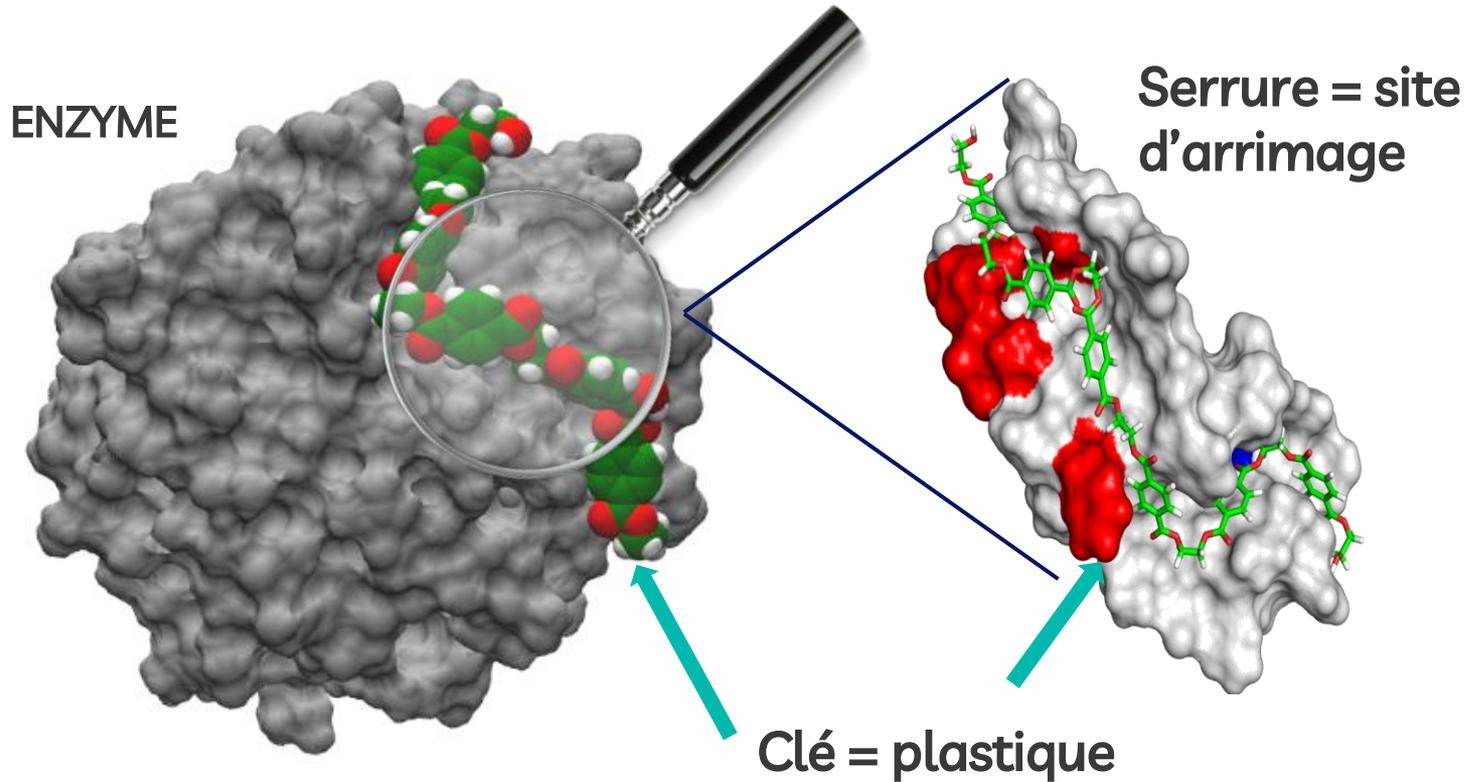
20 acides aminés possibles

Enzyme = Catalyseur

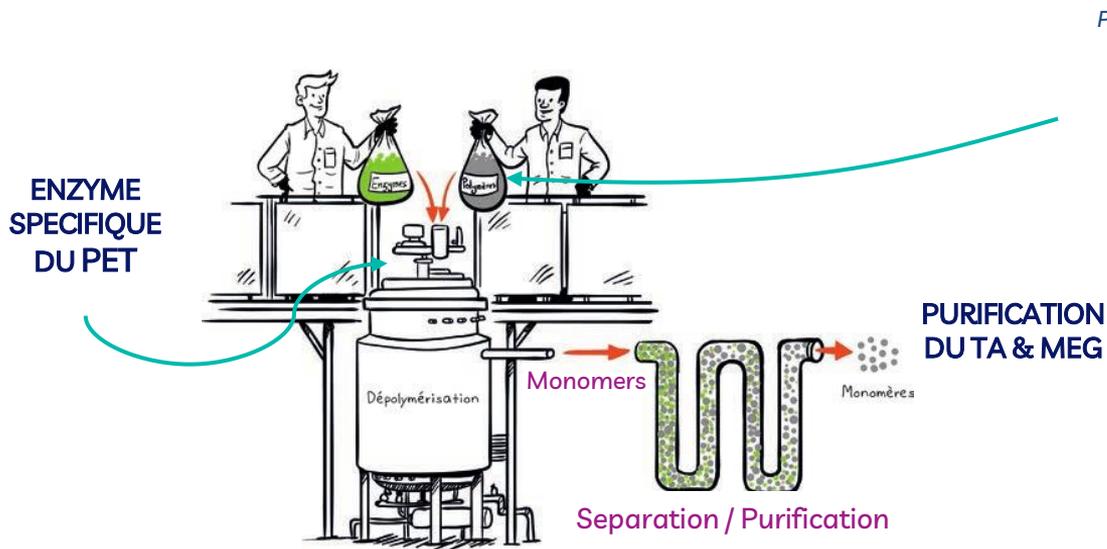
Enzyme = serrure / substrat = clé  
A l'intérieur réaction acido/basique



# Une enzyme : Quésaco ? !



# Recyclage du PET ad infinitum



Plastic and textile waste



## AVANTAGES DU RECYCLAGE ENZYMATIQUE

- Recyclage à 100%
  - Sélectivité
  - faible temperature, pression atmosphérique, aucun solvant
- pas de tri sophistiqué
- recyclage de plastique complexes (PET/PE; PET/PA)

# 2015: dépolymérisation du PET

## UN RÊVE INACCESSIBLE

- Sourcing

- Flakes lavés Post-consommateur
- (~95 % PET)

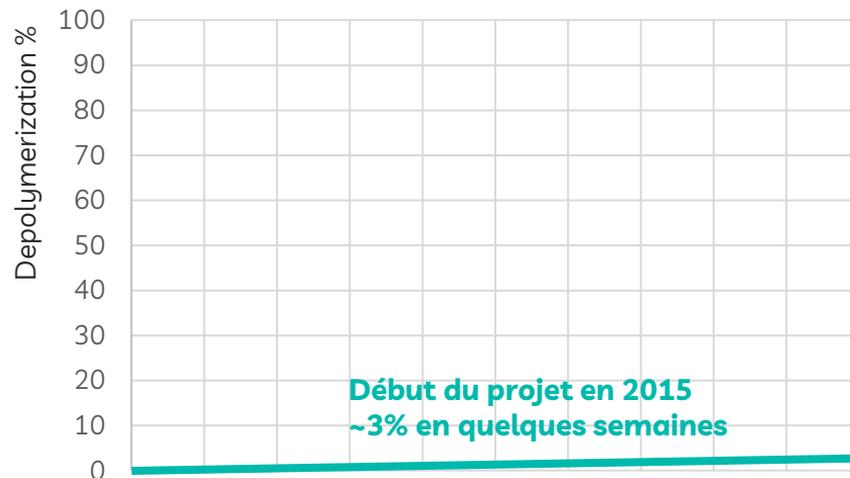


Réacteur 0.5L - PET: 10 g/L  
60°C, pH8  
Enzyme: 1 % g/g PET

- Compétiteurs:

- enzyme de *Ideonella sakaiensis* et ses variants
- ~ 1% conversion en 3 jours

S. Yoshida et al, Science 351, 1196 (2016)  
X. Han et al, Nat. Commun. 8, 2106 (2017)  
S. Joo et al., Nat. Commun. 9, 382 (2018)  
H. P. Austin et al, PNAS 115, 4350 (2018).



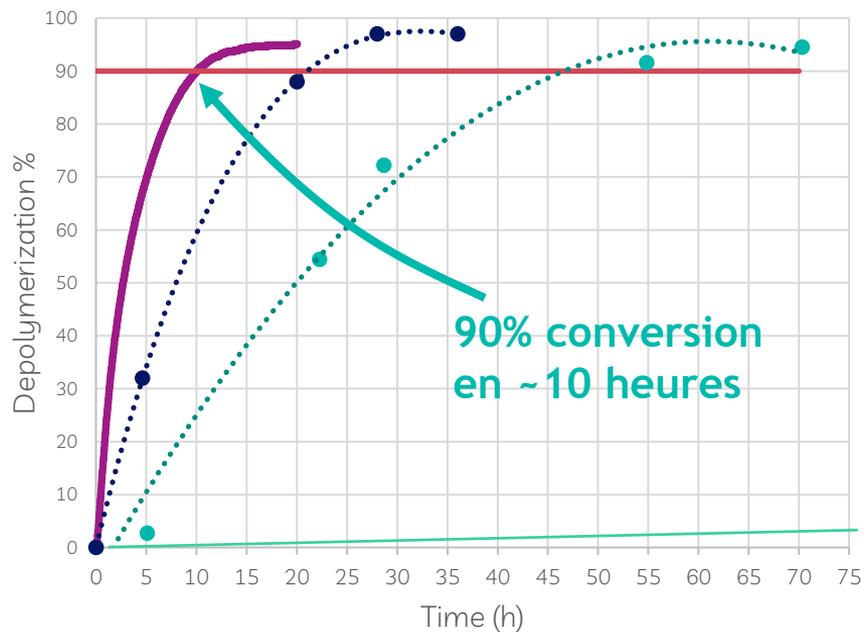
# 2019: Le rêve devient réalité

## ● Sourcing

- Flakes & fibres Post-consommateur
- (95 % PET)



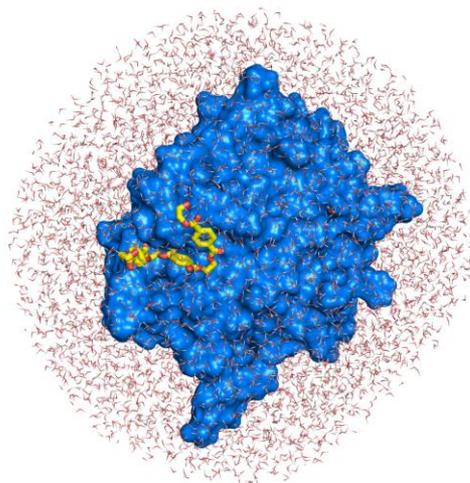
Réacteur 1 m<sup>3</sup> - PET : 200 g/L  
72°C, pH8  
Enzyme: 0.1 % g/g PET



PRODUCTIVITE MOYENNE  
15 G<sub>TA</sub>·L<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>

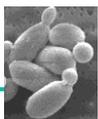
# La clé du succès

## UN TRAVAIL À L'INTERFACE ENTRE SCIENCES DES POLYMERES ET ENZYMOLOGIE



# Stratégie

Librairie de microorganismes  
provenant d'environnements  
pollués ou enrichis en  
plastique



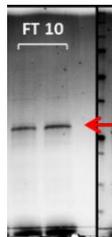
Analyse  
diversité  
microbienne



Screening

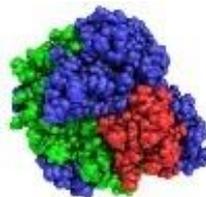


Identification  
Enzyme



Purification  
Enzyme

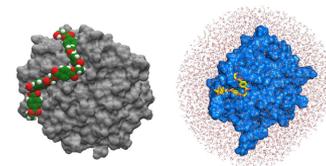
Enzymes  
Candidates



Expression  
Recombinant



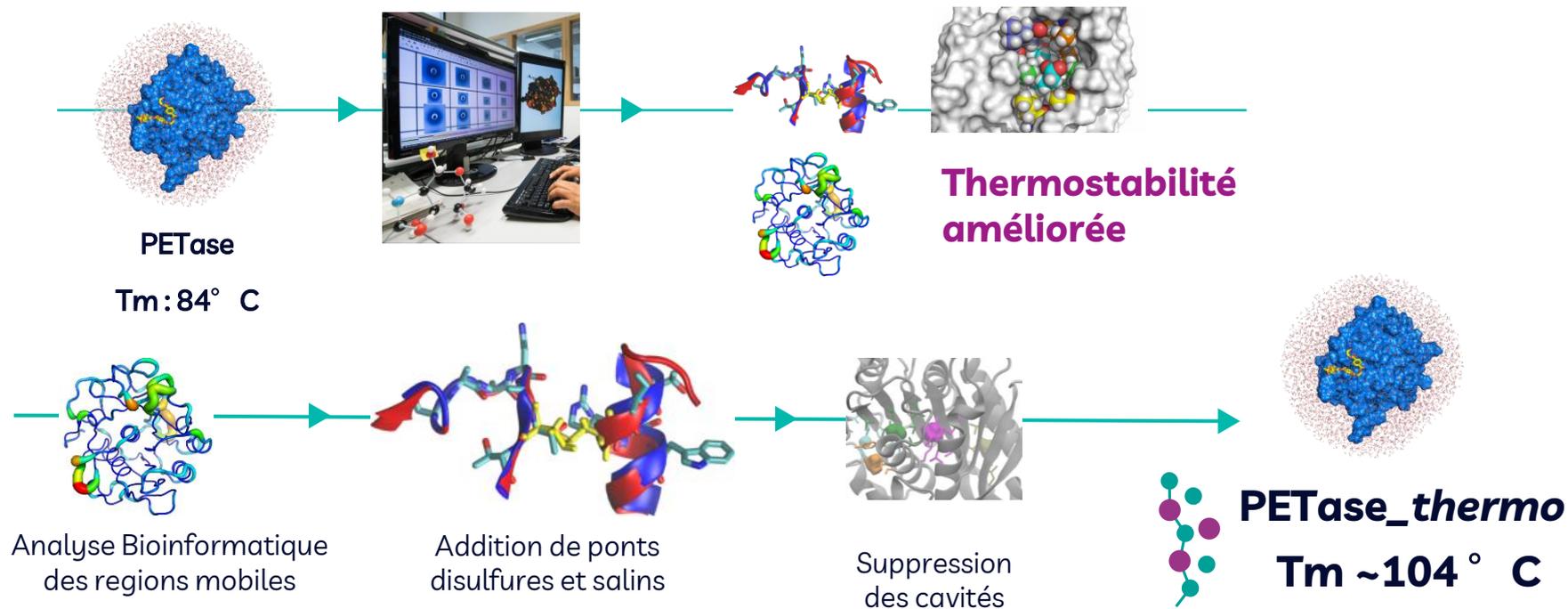
Optimisation  
thermostabilité  
& activité



**PETase<sub>opt</sub>**

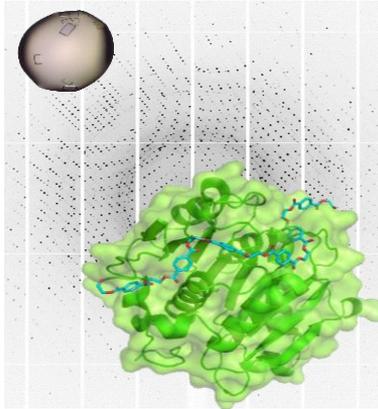
# Ingénierie Enzymatique

OBJECTIF: TRAVAILLER PRÈS DE LA T° DE TRANSITION VITREUSE (~78°C)



# Remedolage du site actif de l'enzyme

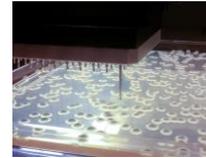
Rayons X



~50 acides aminés constituent le site actif

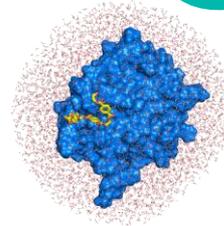
Stratégie: chaque acide aminé remplacé par les 19 autres possibles

> ~1000 variants testés



Screening avec nanoparticules de PET

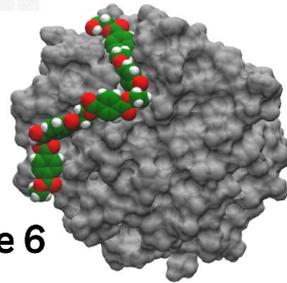
Combinaison des meilleures mutations



PETase<sub>opt</sub>

T<sub>m</sub> ~104° C

Oligomère de 6 unités AT



# Reconnaissance scientifique

- Publication dans **nature**
- « An engineered PET-depolymerase to break down and recycle plastic bottles ».
- Fierté de faire la couverture de **nature** !



# Recyclage du PET : sourcing

Aucune INHIBITION de l'enzyme par :

- colorants
- pigments
- Noir de carbone
- TiO<sub>2</sub>
- IPA, CHDM
- autres polymères : PE, PA, PVC



Barquettes



Bouteilles transparentes & colorées



Bouteilles opaques  
(TiO<sub>2</sub> -carbon black)



Textile



PET/PE  
(8% of PE)



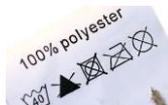
Bouteilles multi-couches  
PET/PA (7.5% of PA)

# Un PET recyclé de haute qualité

BOUCLE FERMÉE : BOUTEILLES COLORÉES ou FIBRES VERS BOUTEILLES CLAIRES



TA EQUIVALENT  
AU TA COMMERCIAL  
(pureté > 99.5%)



MEG  
(pureté > 99.5%)



PET DE HAUT POIDS  
MOLECULAIRE



BOUTEILLES CLAIRES

# Bouteilles recyclées de haute qualité

## BOUCLE FERMÉE : BOUTEILLES COLORÉES ou FIBRES VERS BOUTEILLES CLAIRES

- Le PET recyclé se comporte comme le pétrochimique durant l'injection et le soufflage



PET Commercial    PET Carbios textile    PET Carbios bouteille

# Planning



Recherche

2012

50 mL

Echelle Labo

100 L

Echelle pilote

1m<sup>3</sup>

Echelle pilote

2019

20m<sup>3</sup>

Demo Plant

2021

50 kT

Déploiement industriel

2024

Projet Thanaplast™

bpi**france**

Projet CE-PET

ADEME



2019: design du demo plant

2020: commandes

Sept-2021: en opération

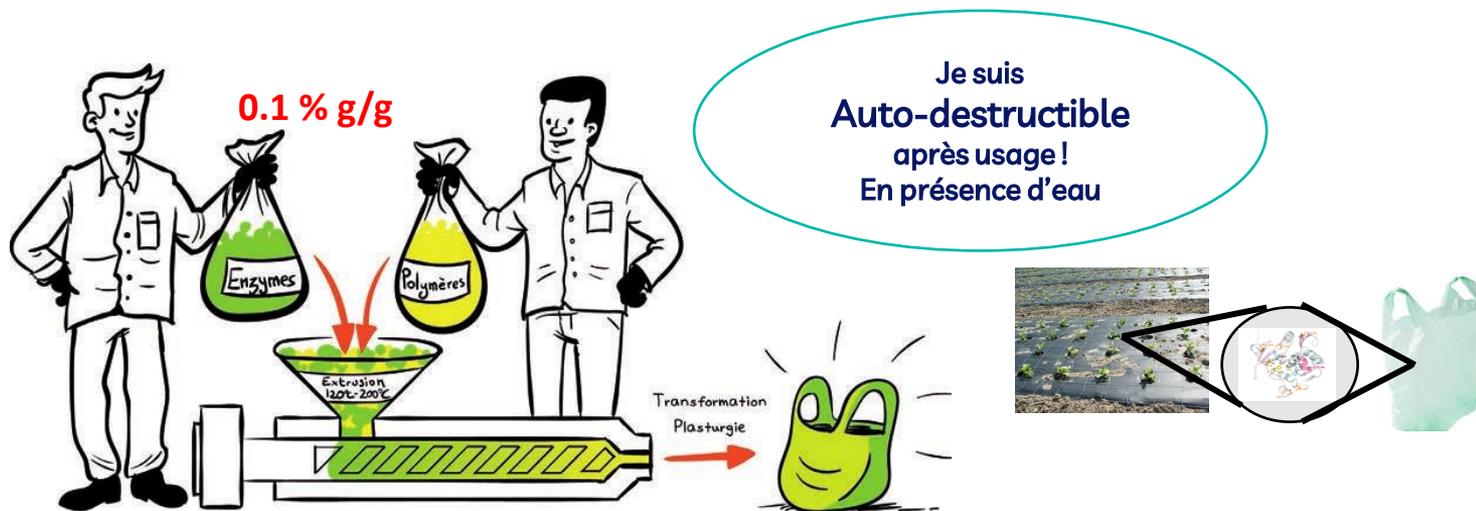


# PLA biodégradable et compostable

ET SI VOTRE  
POT DE YAOURT  
PARTAIT EN  
COMPOST ?



# PLA biodégradable et compostable



## ENZYME INCLUSE DANS LA MATRIQUE PLASTIQUE

### Challenges relevés:

- Enzyme optimisée résistant à T° extrême d'extrusion (PLA 170°C)
- Enzyme active dans un polymère
- Dégradation totale jusqu'au CO<sub>2</sub>: Label Home compost

# PLA biodégradable et compostable

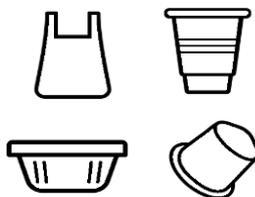


EVANESTO

Enzyme produite  
par **NOVOZYMES**  
Rethink Tomorrow



PLA



**100 % COMPOSTABLE**  
**100 % BIODEGRADABLE**

LANCEMENT sur le MARCHÉ fin 2020



# Nos partenaires clés

L'ORÉAL





# CARBIOS

Enzymes powering the Circular Economy

**Société**  
**d'Encouragement**  
**pour l'industrie**  
**nationale** FONDÉE EN 1801