



Atelier Biomasse énergie

10 décembre 2015



Sypecar

SYstèmes de Production Energétique à base de CAnne à la Réunion

Durée projet : 2 ans (2013-2015)

Partenariat :

eRcane : Service Process

INRA : Agro-Impact (Mons)

Cirad : Aida
Geo
Horstys



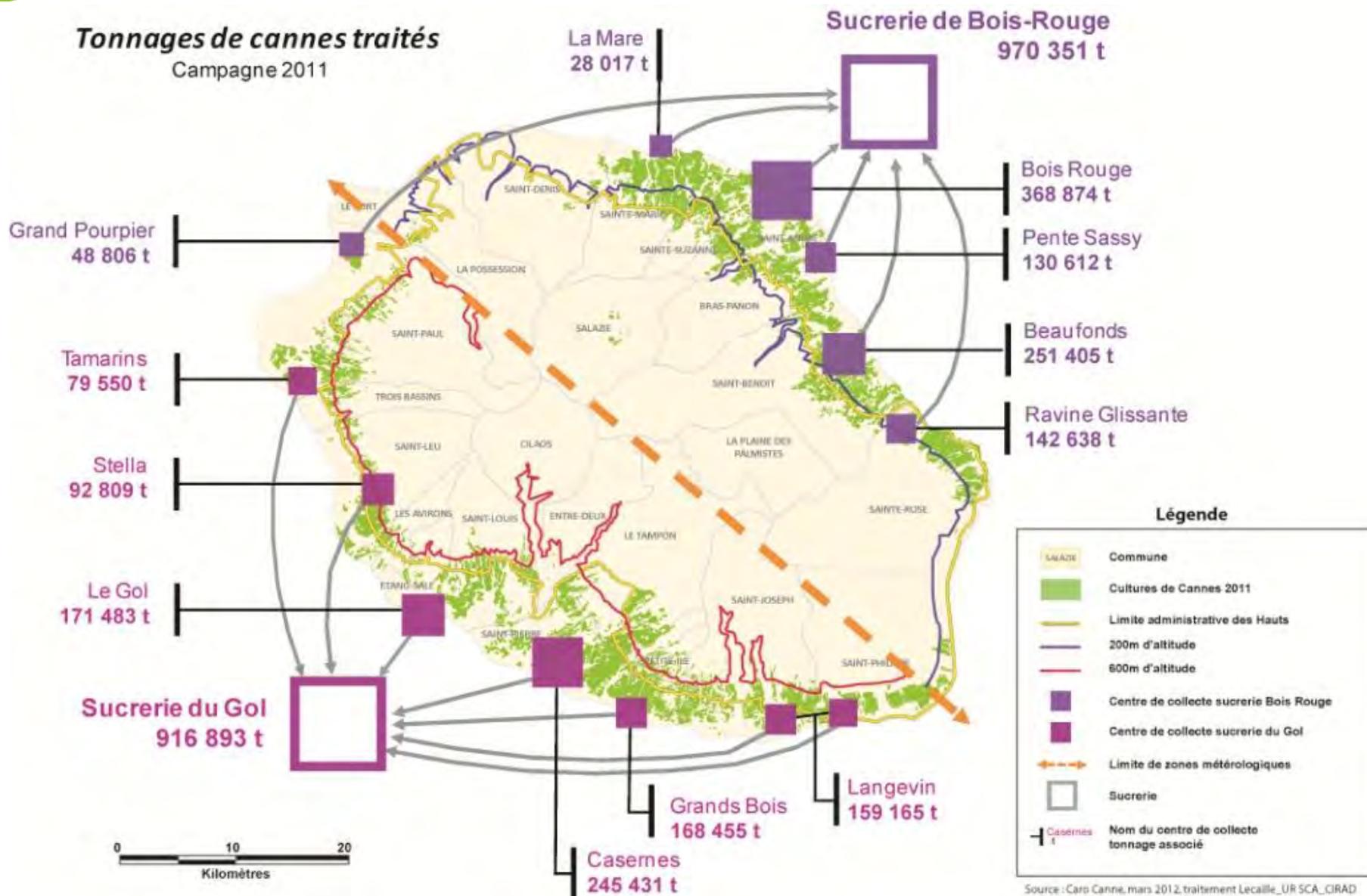
Evaluer la pertinence et la faisabilité de production énergétique à base de canne

Canne Fibre

- **Culture à vocation énergétique**
- **Destinée à être récoltée entière**
- **Sur terrains non concurrentiels de la canne à sucre**

Questions

- **Pouvoir énergétique ?**
- **Rendement ?**
- **Tout au long de l'année ?**
- **Durée et calage du cycle ?**
- **Rentabilité économique ?**
- **Bilan énergétique ?**
- **Impact socio – environnemental ?**
- **...**



Projet SYPECAR



Restitution finale Juin 2015



Action n°1 :

Approche analytique



Action n°2 :

Approche agronomique



Action n°3 :

Evaluations économiques et
environnementales



Bonus :

Séchage au champ

Projet SYPECAR



 **Action n°1 :**
Approche analytique

 **Action n°2 :**
Approche agronomique

 **Action n°3 :**
Evaluations économiques et
environnementales

 **Bonus :**
Séchage au champ

Projet SYPECAR



Action n°1 :

Approche analytique



Action n°2 :

Approche agronomique



Action n°3 :

Evaluations économiques et
environnementales



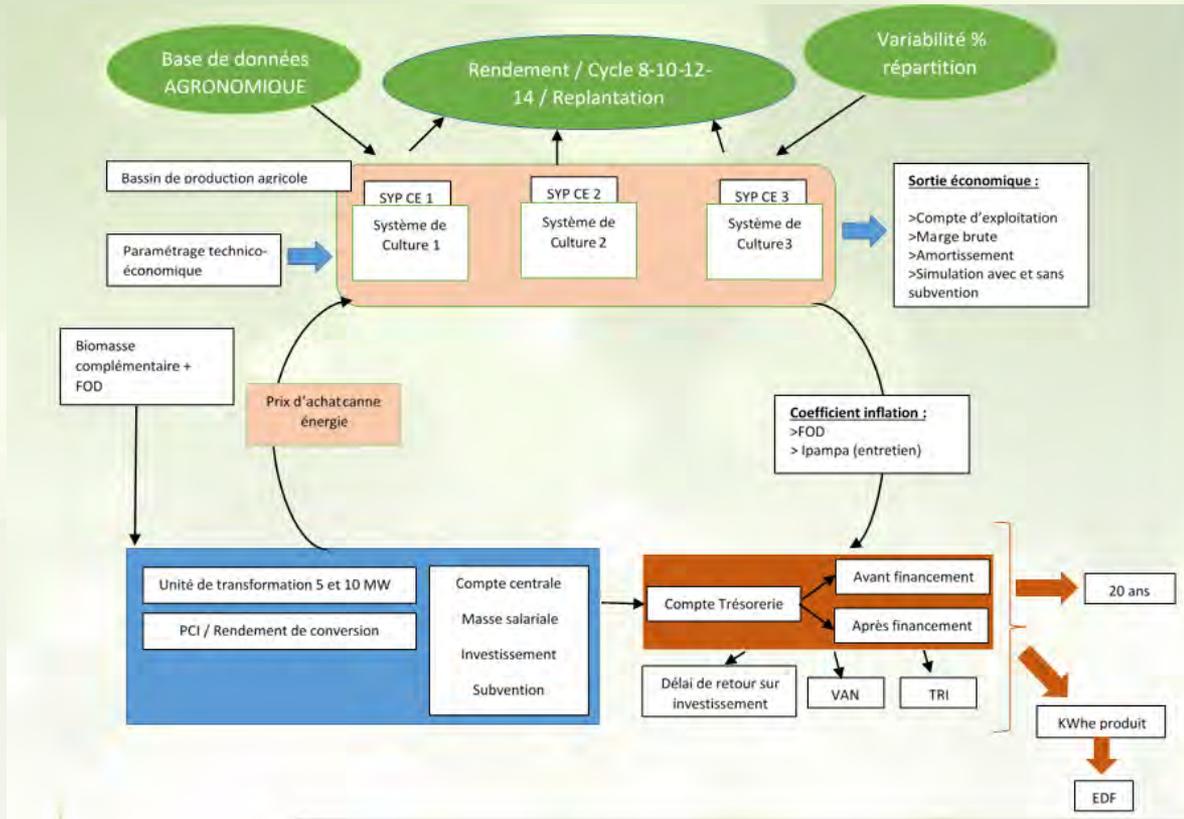
Bonus :

Séchage au champ



Sortie terrain lors restitution du projet

Projet SYPECAR



ReefCane

 **Action n°1 :**
Approche analytique

 **Action n°2 :**
Approche agronomique

 **Action n°3 :**
Evaluations économiques et environnementales

 **Bonus :**
Séchage au champ

Projet SYPECAR



Test de séchage au champ - La Mare



Action n°1 :

Approche analytique



Action n°2 :

Approche agronomique



Action n°3 :

Evaluations économiques et
environnementales



Bonus :

Séchage au champ

Action 1 : Approche analytique

Caractériser la qualité (composition) de la biomasse.

Données de laboratoire

Développer une méthode de caractérisation rapide

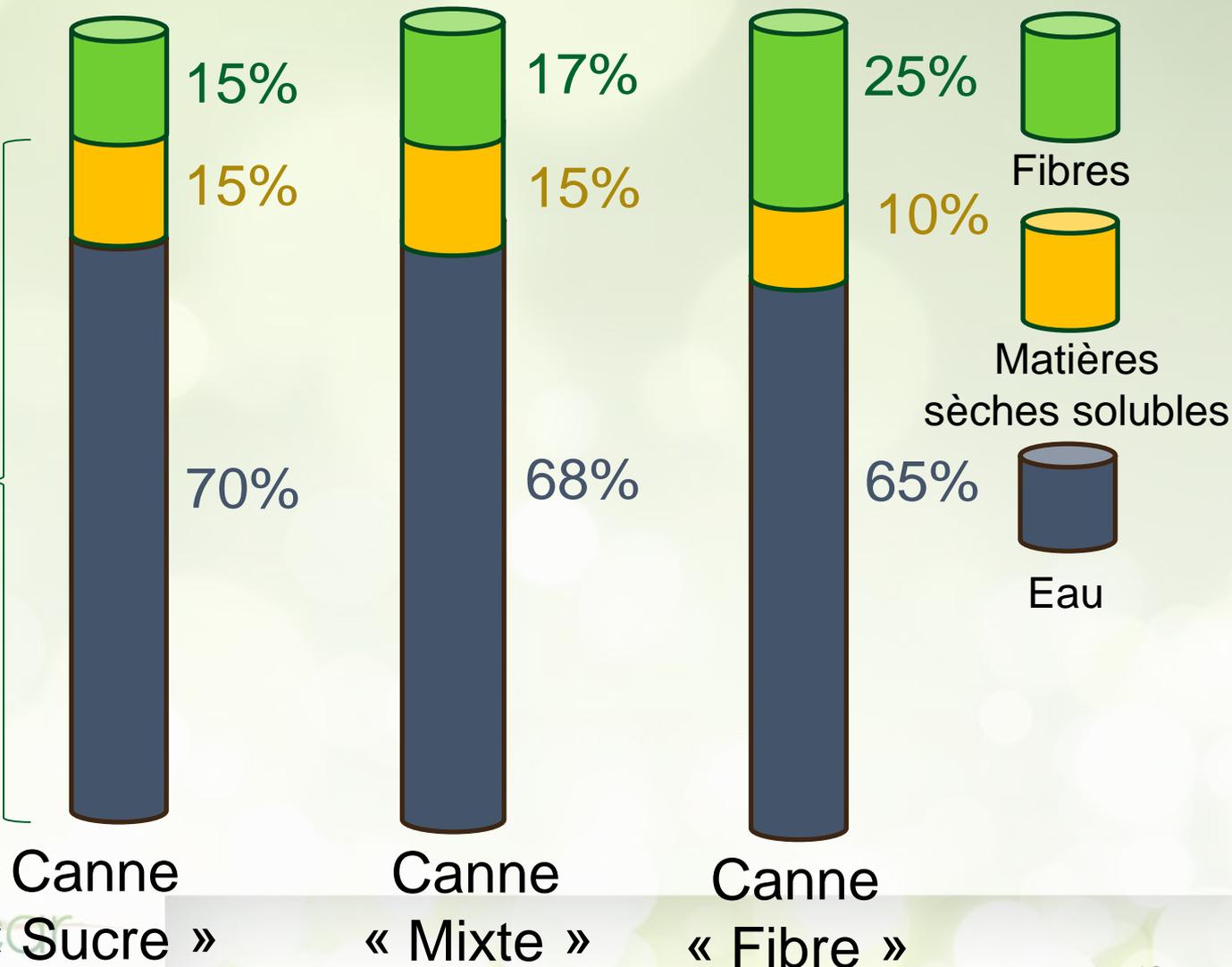
- Basé sur les méthodes d'analyse de la canne à sucre
- Complété par des caractéristiques énergétiques

- Acquisition d'un Spectromètre Proche Infra Rouge (SPIR / NIRS)
- Développement de la méthode

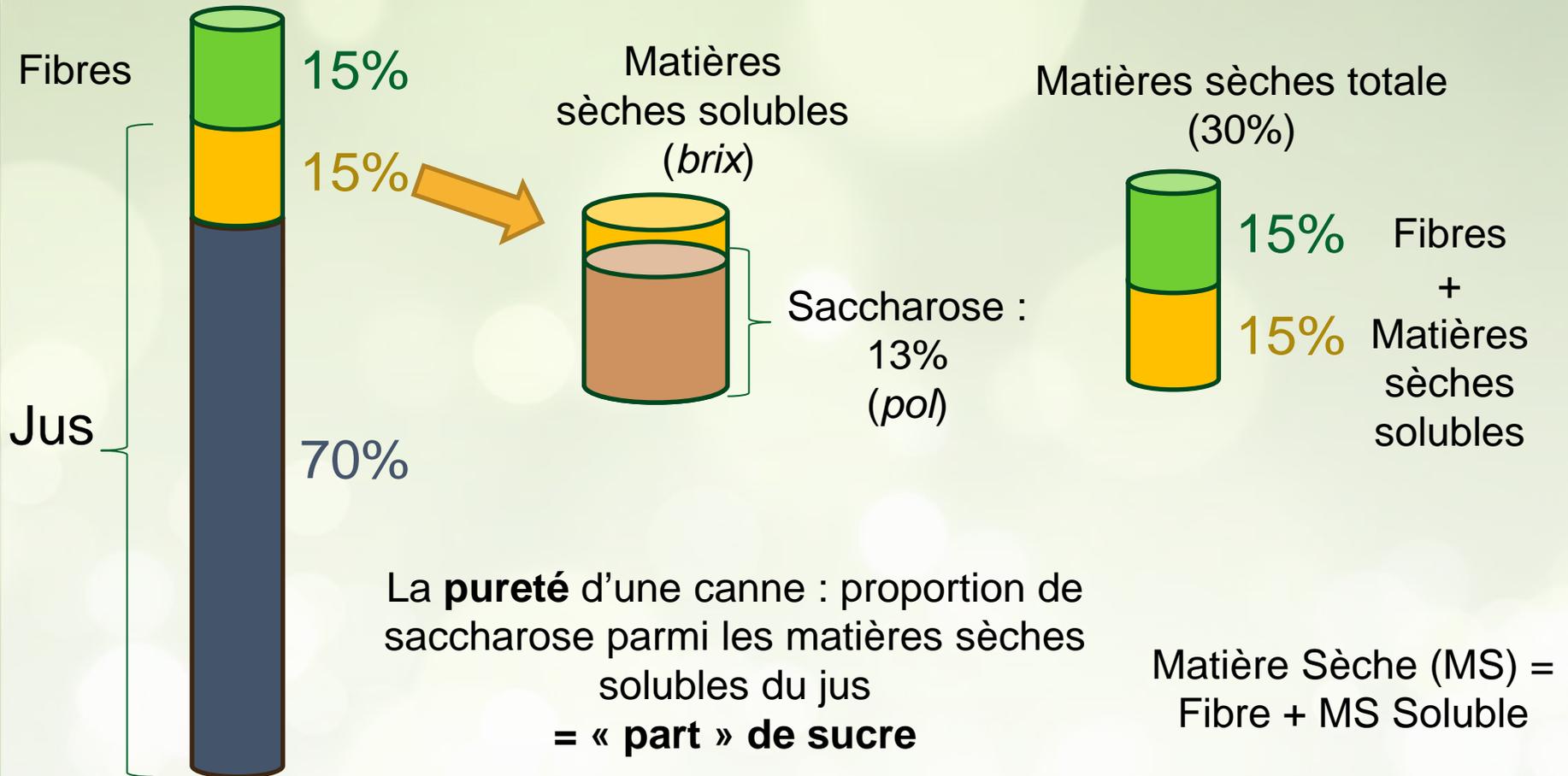
Utilisation des données pour les actions 2 et 3



Les compartiments de la canne



Les compartiments de la canne



Canne

« Sucre »

Le Pouvoir Calorifique

Quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible

Joules (ou kCal ; kWh)

/

kg (ou t)

Pouvoir calorifique supérieur	Pouvoir calorifique inférieur
Energie dégagée par la combustion y compris chaleur latente de la vapeur d'eau produite	Energie dégagée par la combustion sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite
Mesurable en laboratoire sur un produit sec	Se calcule à partir du PCS, sur produit sec ou frais
Energie « absolue » mais non récupérable en pratique et peu utilisé	Energie théoriquement récupérable (combustion parfaite, rendement 100%)

Mesure des caractéristiques des combustibles bois/ ADEME/ JUILLET 2001



Le Pouvoir Calorifique Inférieur

Mode de détermination

Mesure du PCS

Bombe Calorimétrique
Produit sec

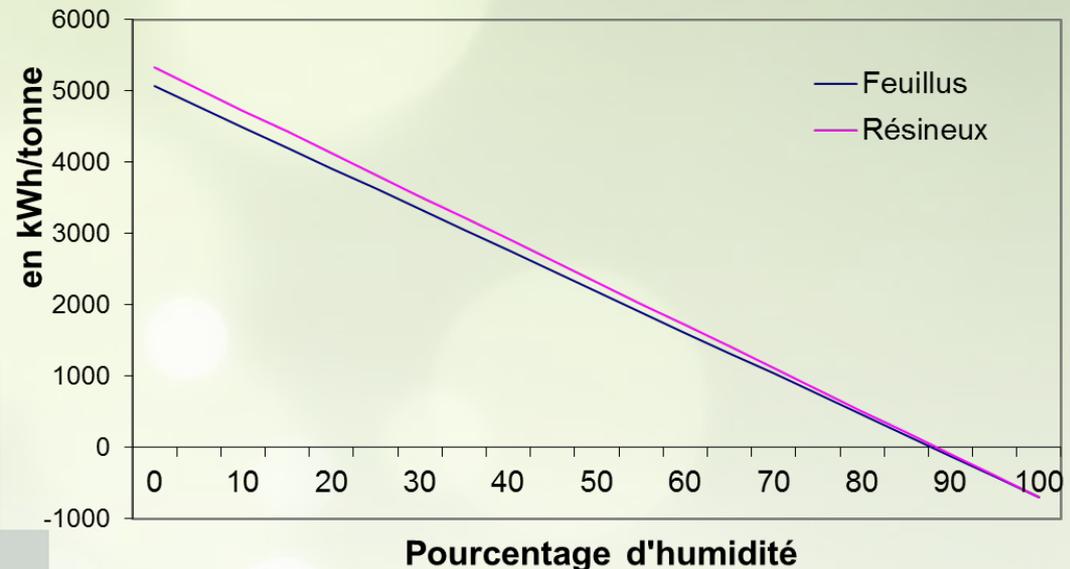
Calcul du PCI sur sec

Formule complexe prenant
en compte l'eau préexistante
et l'hydrogène

Calcul du PCI sur brut (frais)

$$\text{PCI sur brut} = \text{PCI sur anhydre} \times \frac{(100 - E)}{(100 - 6 E)}$$

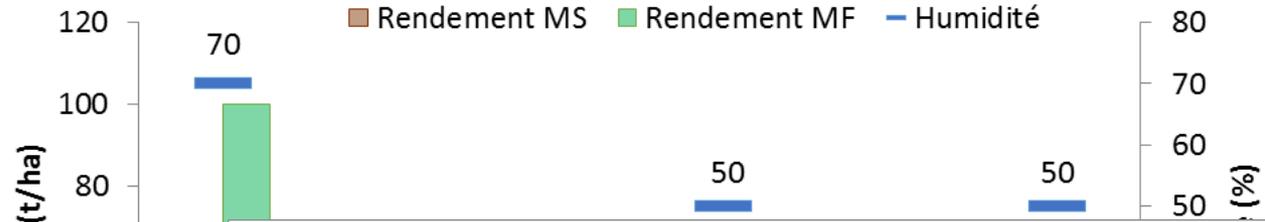
PCI en fonction de l'humidité



Mesure des caractéristiques des combustibles bois/ ADEME/ JUILLET 2001

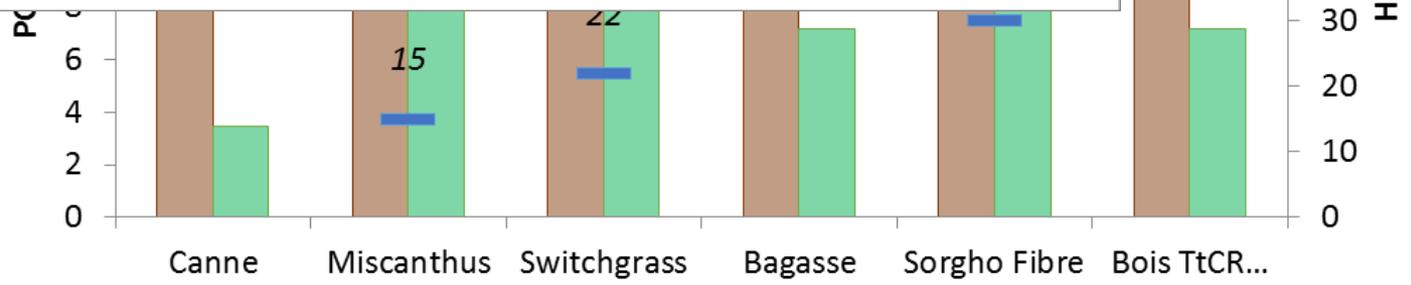
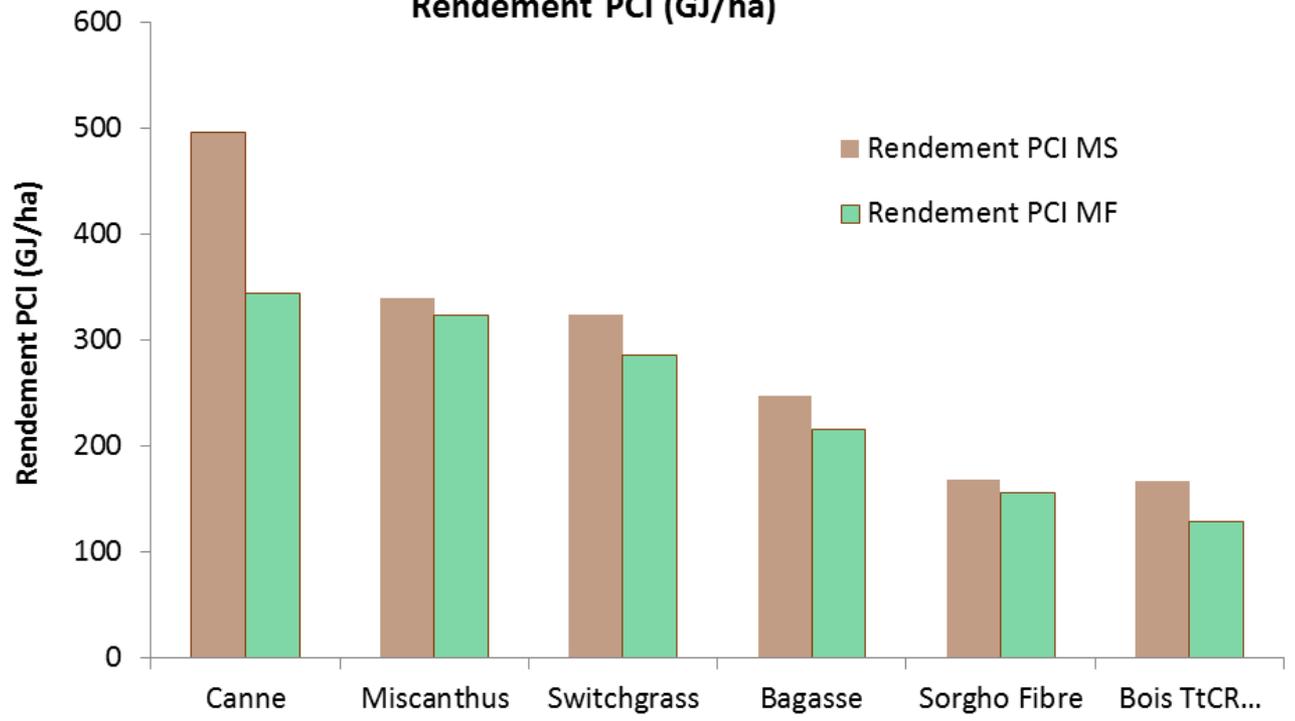
Rendement biomasse- Humidité

■ Rendement MS ■ Rendement MF — Humidité



Rendement PCI (GJ/ha)

■ Rendement PCI MS ■ Rendement PCI MF



Méthode d'analyse des cannes



Broyage des tiges
→ Pulpe de canne



Extraction à la presse



Mise à l'étuve pulpe et tourteaux



Pesée du tourteau



Récupération du jus



Filtration du jus



Détermination du Brix (MS soluble) et du pol (sucre)



Analyses réalisées

Analyses « sucrières »

- Brix, pol, pureté du jus
- Teneur en fibre

Analyses spécifique

- Sur la pulpe et sur le tourteau
 - Humidité
 - Teneur en cendres
 - PCI : $18260 - 207.01 * \text{Humidité} - 182.6 * \text{Cendres} - 31.14 * \text{Brix}$

Sur l'ensemble des échantillonnages :

- 428 analyses



Développement NIRS

 Réception CPS « Cane Preparation System » - Bruker
(juin 2014)

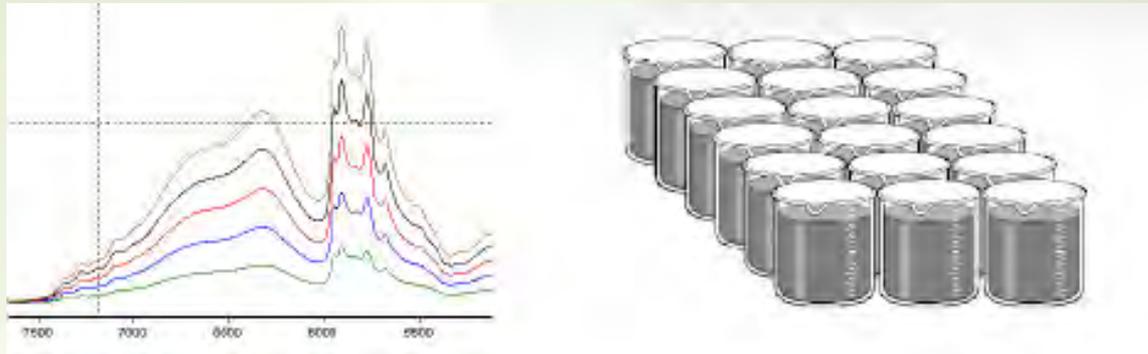
- Broyeur
- Convoyeur
- Spectromètre (Matrix F)
- PC + Logiciel de traitement



Développement NIRS

Méthode indirecte

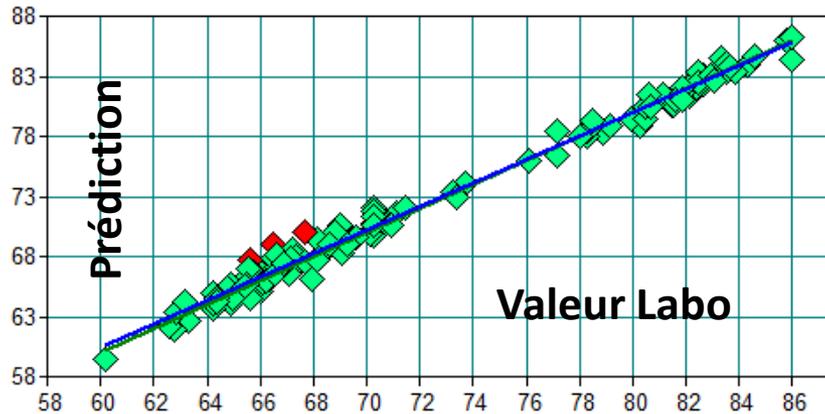
Spectres + analyse labo



- Etape 1 : Calibration
- Etape 2 : Validation sur des échantillons inconnus
- Etape 3 : utilisation de la calibration en prédiction

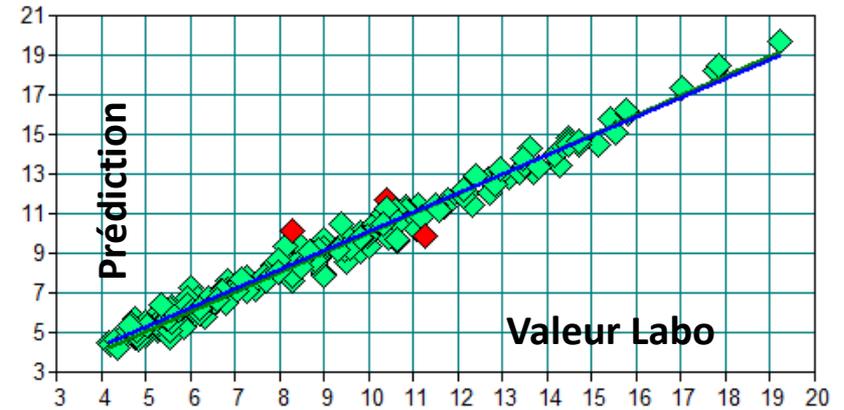
Développement NIRS

Prédiction vs Vrai / Humidité [%] / Set de validation



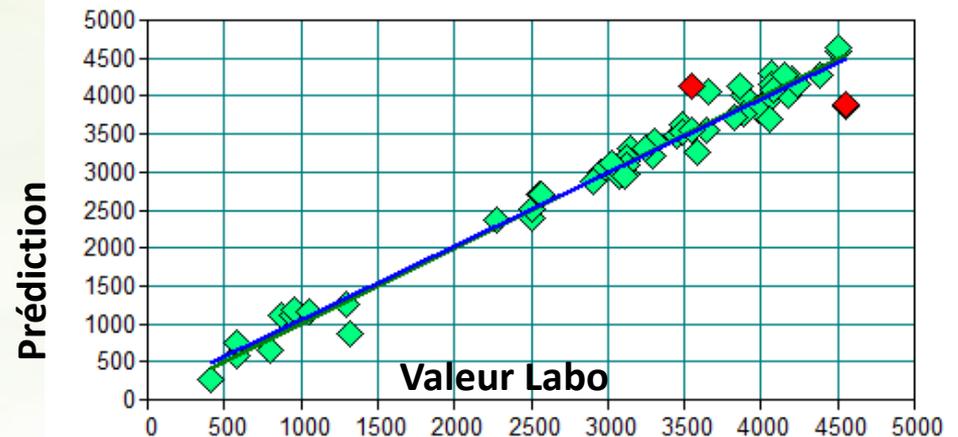
Offset: 1.998 Pente: 0.975 Coeff.Corr.: 0.9945
 Rang: 10 $R^2 = 98.85$ RMSEP = 0.791 Biais: -0.145 RPD: 9.47

Prédiction vs Vrai / Brix Jus [g%g] / Set de validation



Offset: 0.370 Pente: 0.970 Coeff.Corr.: 0.9891
 Rang: 10 $R^2 = 97.72$ RMSEP = 0.508 Biais: -0.109 RPD: 6.78

Prédiction vs Vrai / PCI [kJ/kg MF] / Set de validation



Offset: 86.257 Pente: 0.970 Coeff.Corr.: 0.9827
 Rang: 8 $R^2 = 96.57$ RMSEP = 210 Biais: 6.99 RPD: 5.4



Conclusions Action 1

-  Utilisation des données pour les caractérisations agronomiques et technologiques (Actions 2 et 3)
-  Validation des méthodes d'analyses
-  Développement de calibrations NIRS
-  Criblage variétal en sélection (eRcane)

Perspectives

Etudes avec CPS :

- eRcane : Travaux qualité - génétique - séchage
- CTICS (Achat de la canne)
 - Etude de faisabilité en 2014 poursuite 2016 ?

Communications

- Congrès IC NIR 15 au Brésil
- Communications

Association SPIR OI

Action 2 : Performances agronomiques



Objectifs action 2

Caractériser des variétés de cannes riches en fibre et l'évolution de l'accumulation de biomasse.

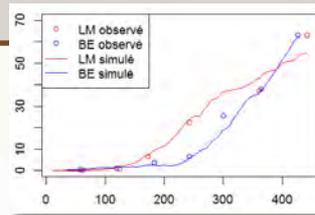
- Essai agronomique avec 20 variétés, en 2 sites.
- Mesures tous les 2 mois.



Données expérimentales

Mettre au point un outil de modélisation.

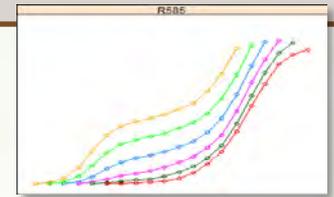
- Adapter le modèle de croissance de la canne à sucre MOSICAS.
- Intégrer les données expérimentales dans ce modèle.



Modèle canne fibre

Tester des conditions de culture différentes.

- Définir des scénarios de test (climat, zone, etc.) ;
- Simuler les résultats agronomiques ;
- Analyser les résultats obtenus.



Dispositif expérimental

 20 variétés :

12 issues du programme d'élargissement de la base génétique de eRcane.		6 cultivars mixtes venant de la Barbade	2 variétés commerciales eRcane
R10/9001	R10/9904	Wi 78/402	R570
R10/9003	R10/9905	Wi 79/460	
R10/9005	R10/9906	Wi 79/461	R585
R10/9901	R10/9907	Wi 80/542	
R10/9902	R10/9908	Wi 81/456	
R10/9903	R10/9909	Wi 86/15	



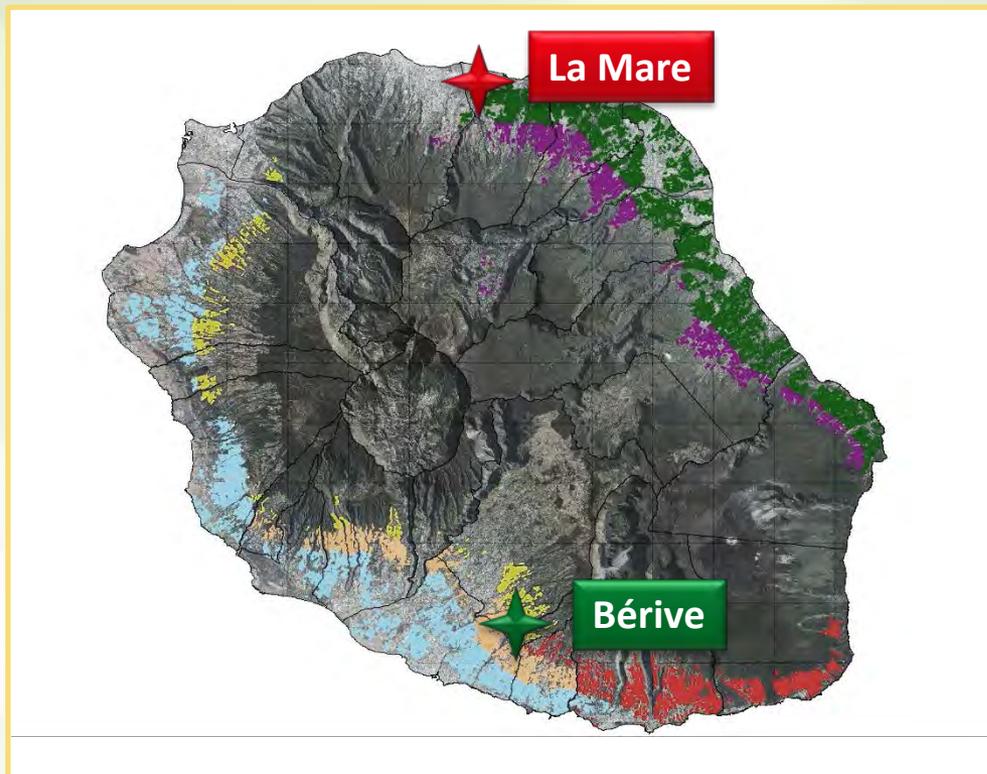
Dispositif expérimental



20 variétés ;



2 situations pédo-climatiques différentes :



La Mare

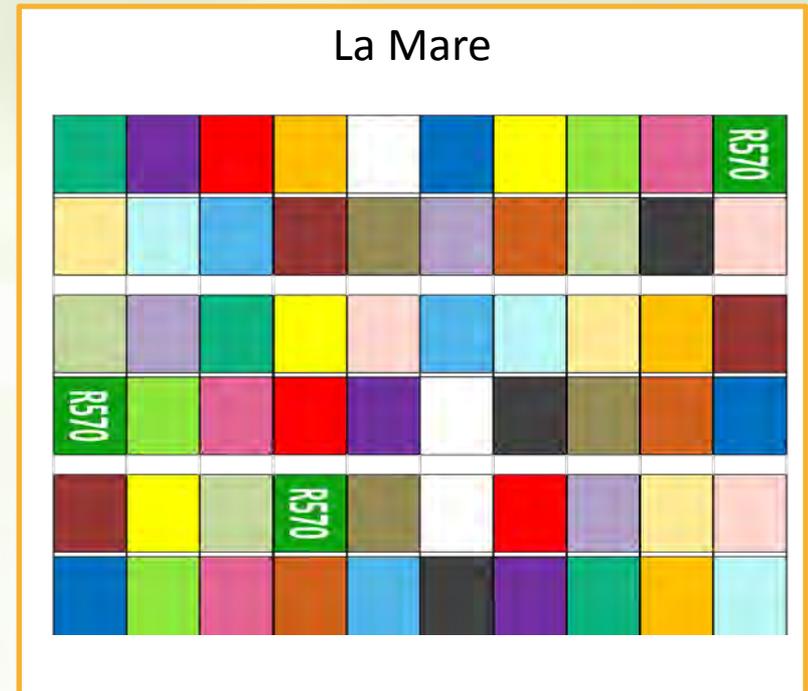
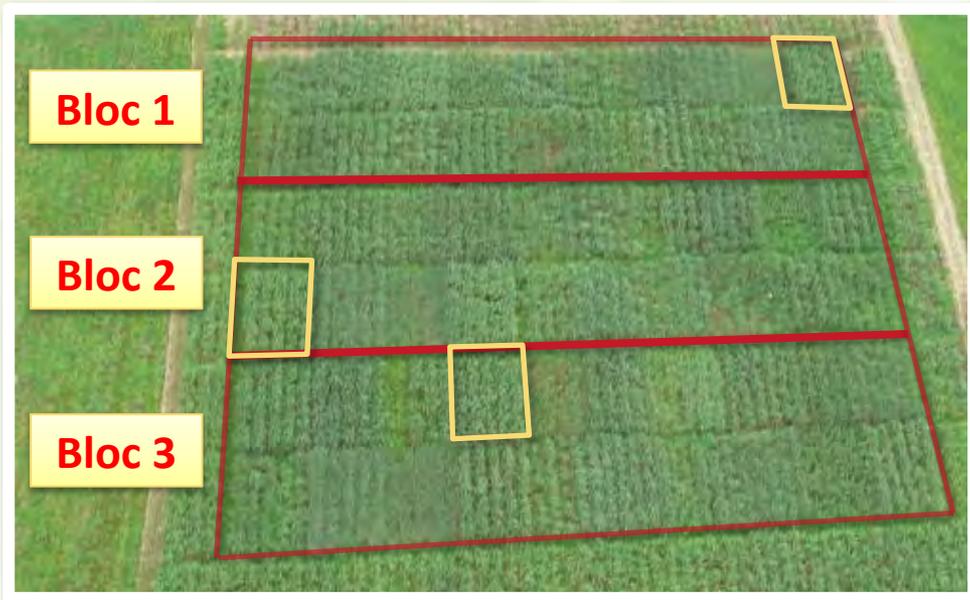
Altitude : 70m.
Température moy : 24°C.
Sol : ferralitique.
Zone irriguée.

Bérive

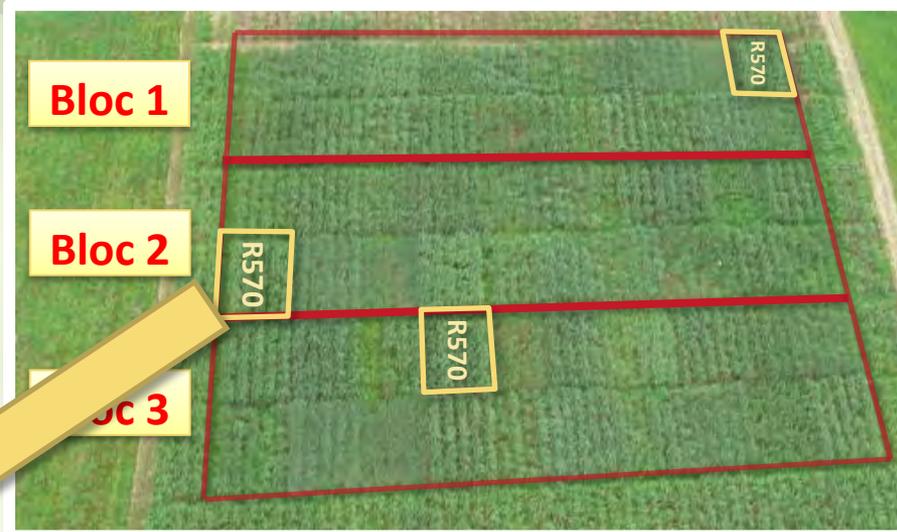
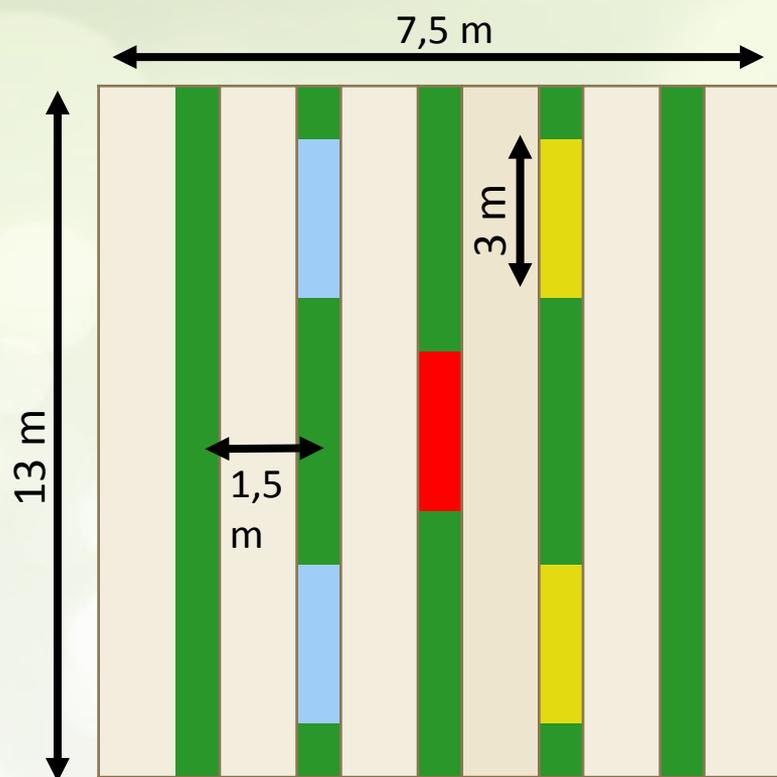
Altitude : 670m.
Température moy : 18°C.
Sol : andosol.
Zone pluviale.

Dispositif expérimental

- 🌱 20 variétés ;
- 🌱 2 situations pédo-climatiques différentes ;
- 🌱 **Dispositif en blocs : 3 répétitions ;**
- 🌱 **2 cycles de culture**



Parcelle élémentaire



-  ED1 et ED2 du cycle vierge
-  ED1 et ED2 du cycle de repousse.
-  EE et ED3 réalisé lors de la coupe de la parcelle pour les deux cycles.



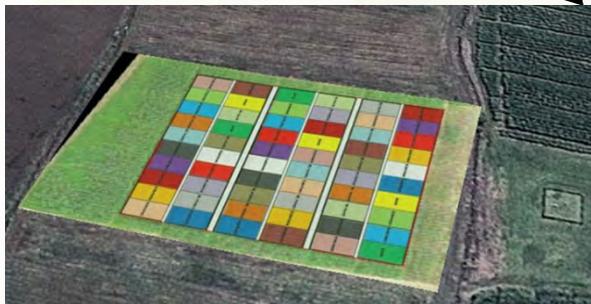
PLANNING

	2013												2014												2015							
Mois	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8				
Age		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
La Mare		PL		EE1		EE2		EE3		ED1			ED2			ED3		EE1		EE2			EE3		ED1		ED2		ED3			
Age										0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4				
Isautier										PL		EE1		EE2		EE3		ED1			ED2			ED3		EE1		EE2				

- Vierge
- Repousse
- PL Plantation
- ED Echantillonnages Destructifs (Ercane)
- EE Echantillonnage Estimatif non destructif (Cirad)
- Récolte Essai après ED3
- Arrêt officiel du projet



Plantation – Berive le 10 et 11 février 2014



Mesures effectuées

Pour les échantillonnages estimatifs :

- comptage du nombre de tiges sur 3m,
- mesures de toutes les hauteurs de tige ;

Pour les échantillonnages destructifs :

Observations au champ sur 3m:

- comptage du nombre de tiges,
- évaluation de la floraison, des manques et de la verse ;

Mesure de la biomasse aérienne totale sur 3m :

- pesée des cannes (tiges + feuilles + chou),
- échantillonnages pour analyses ;

Analyse d'un échantillon :

- Caractéristiques sucrières : richesse, fibre, etc...
- Caractéristiques énergétiques : humidité, cendres, PCI, etc...
- Acquisition du spectre NIRS.



Essai de La Mare



		2013								2014							
		juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.
Premier cycle	Age (mois)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Notations	PL		EE1		EE2		EE3		ED1				ED2		ED3	Réc.

		2014				2015								
		sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.
Second cycle	Age (mois)	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Notations	Réc.		EE1		EE2		EE3		ED1		ED2		ED3 +R

Essai de Bérive



		2014										2015				
		févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avr.
Premier cycle	Age (mois)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Notations	PL		EE1		EE2		EE3		ED1		ED1B		ED2		ED3 +R

		2015								2016			
		avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars
Second cycle	Age (mois)	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Notations	ED3 +R		EE1		EE2		EE3		ED1		ED2	ED3 +R

Résultats agronomiques

-  Production de biomasse fraîche
-  Production de biomasse sèche
-  Caractérisation des cannes
-  Performances en vue d'une valorisation énergétique

Biomasse :

Partie aérienne de la canne,
c'est-à-dire **la tige avec le chou et les feuilles**

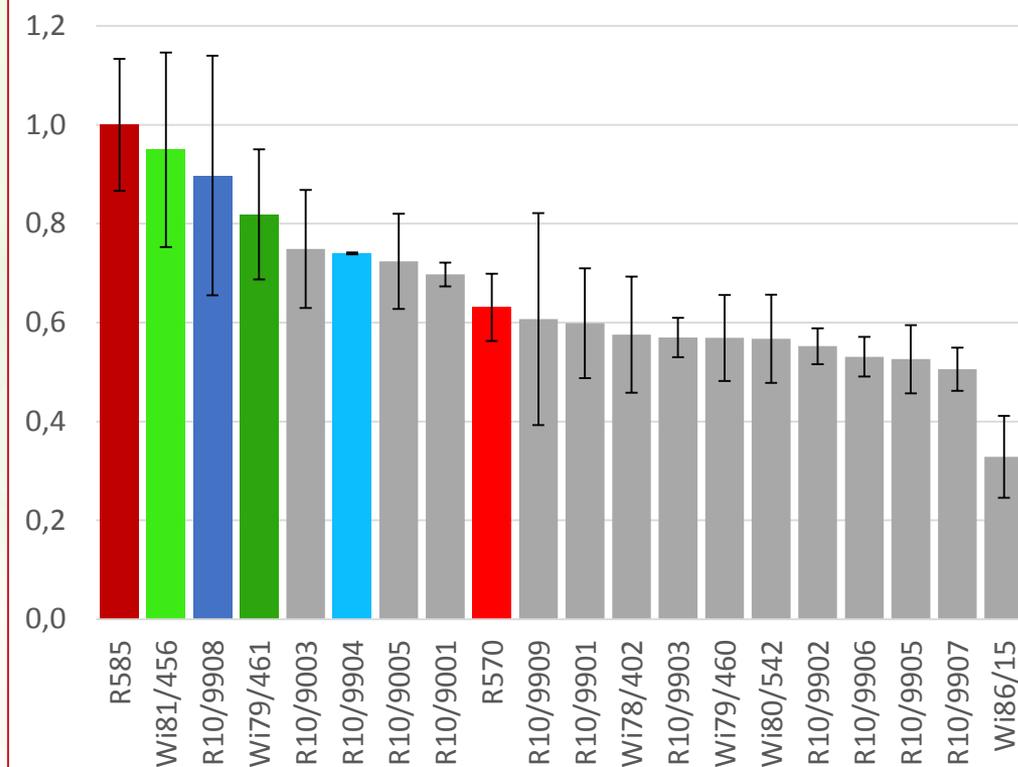
Résultats énergétiques

Le rendement en PCI est l'extrapolation des résultats des analyses énergétiques et des mesures agronomiques ; puis rapporté à la valeur de R585.

Les « barres d'erreurs » représentent les écarts-types de cette mesure.

Les 20 variétés présentent un large gamme de rendements en PCI.

Rendements en PCI relatifs
à la récolte de Bérive



Modélisation de la production

Caractéristiques
variétales



Climat : Température,
rayonnement, pluie...



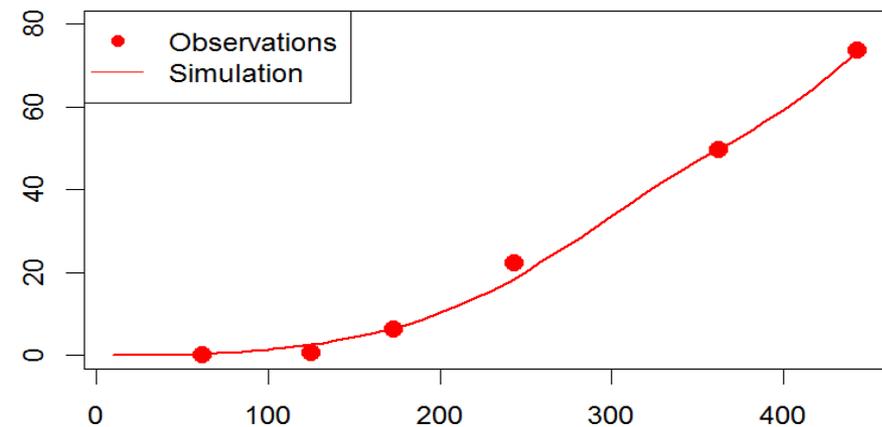
Sol



MOSICAS

Modélisation Journalière

Pratiques
culturales



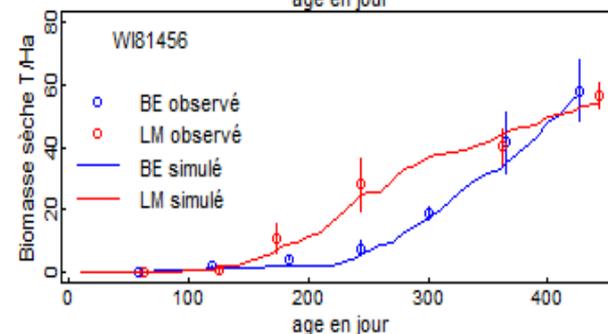
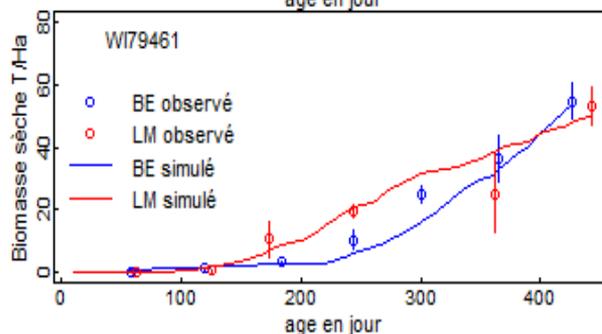
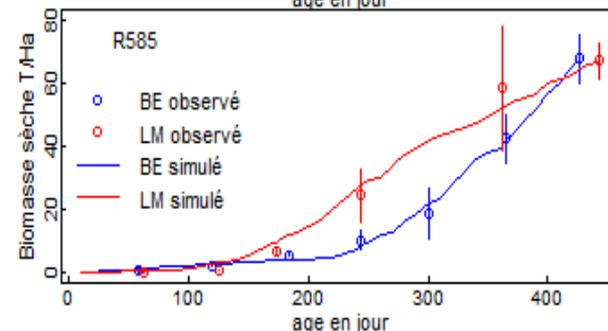
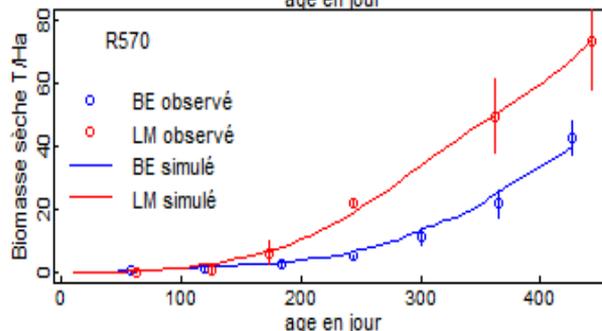
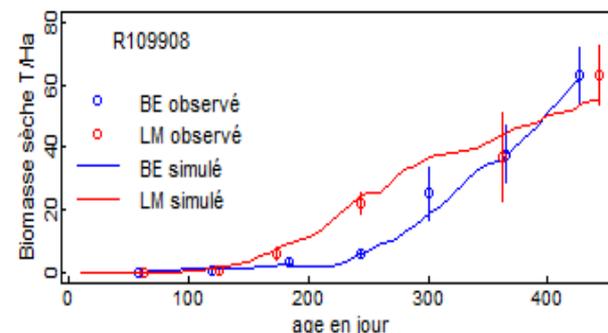
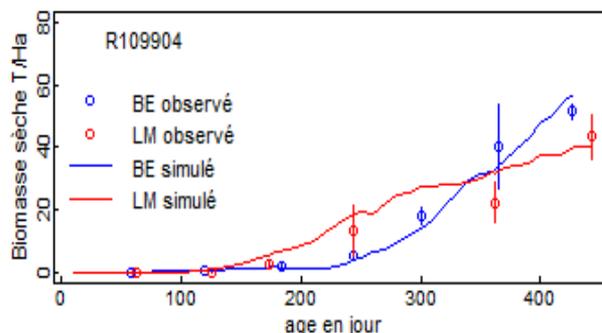
Résultats de simulation :

- Prévisions de rendement
- Qualité
- Impacts de phénomènes (sécheresse, ravageurs...)

Résultats de calibration

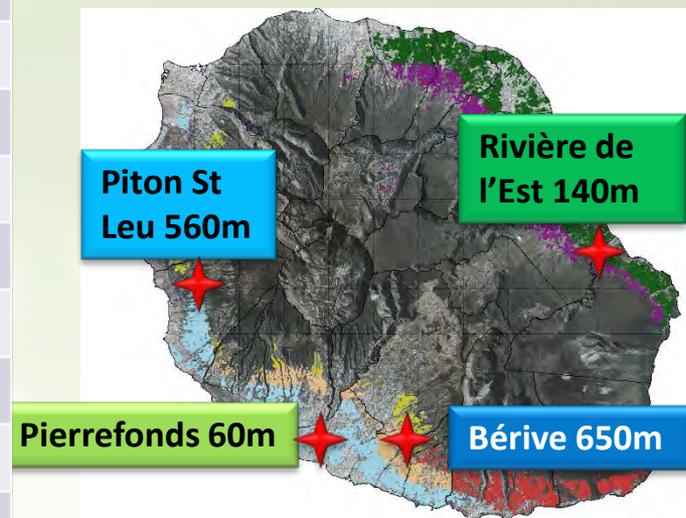
Calibration: ajuster les paramètres variétaux pour que la simulation représente au mieux la réalité

Matière sèche aérienne en T/ha en fonction de l'âge des cannes



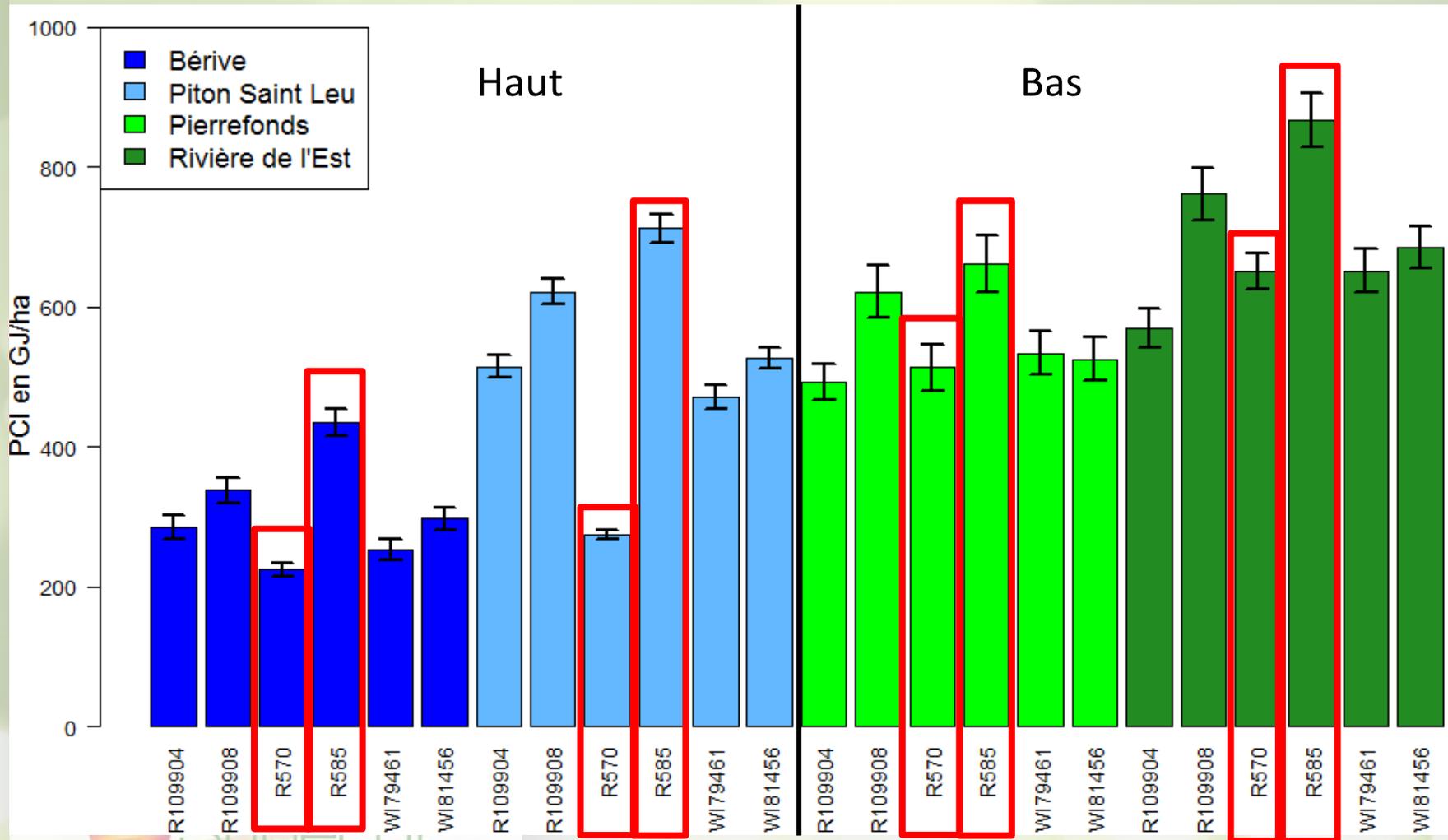
Restitution du projet SYPECAR – 17 juin 2015

Simulations

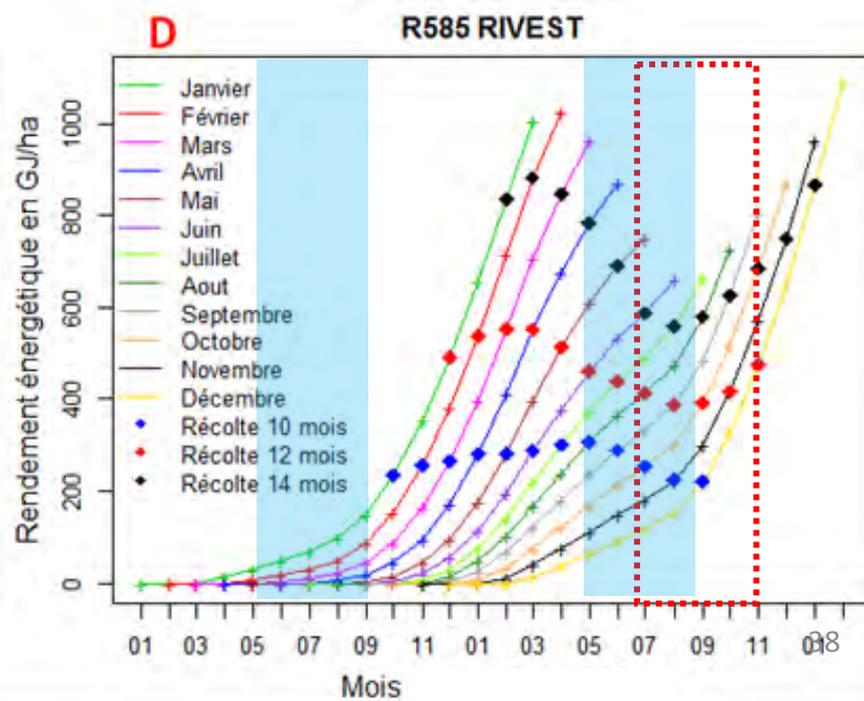
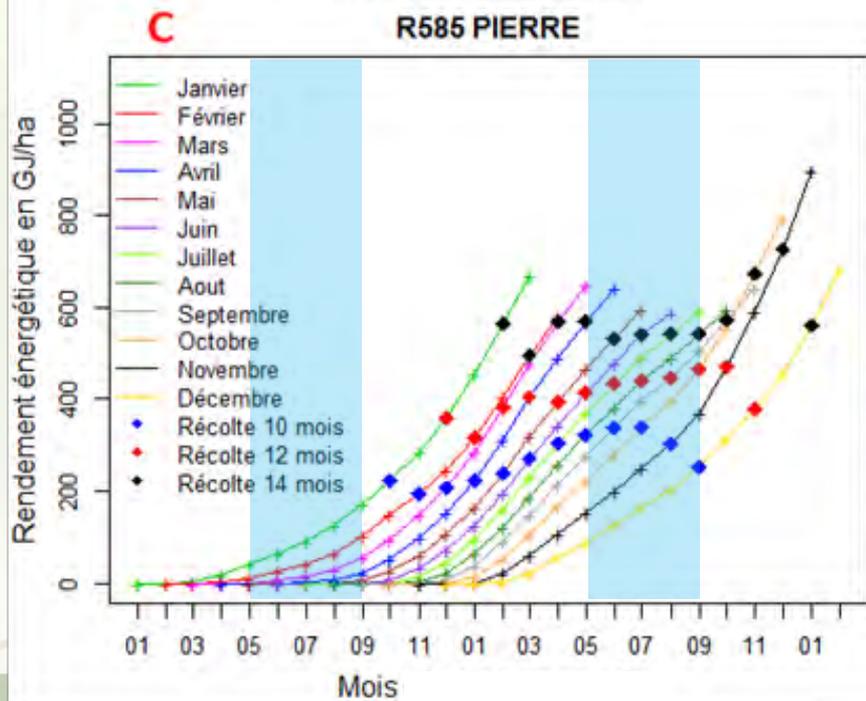
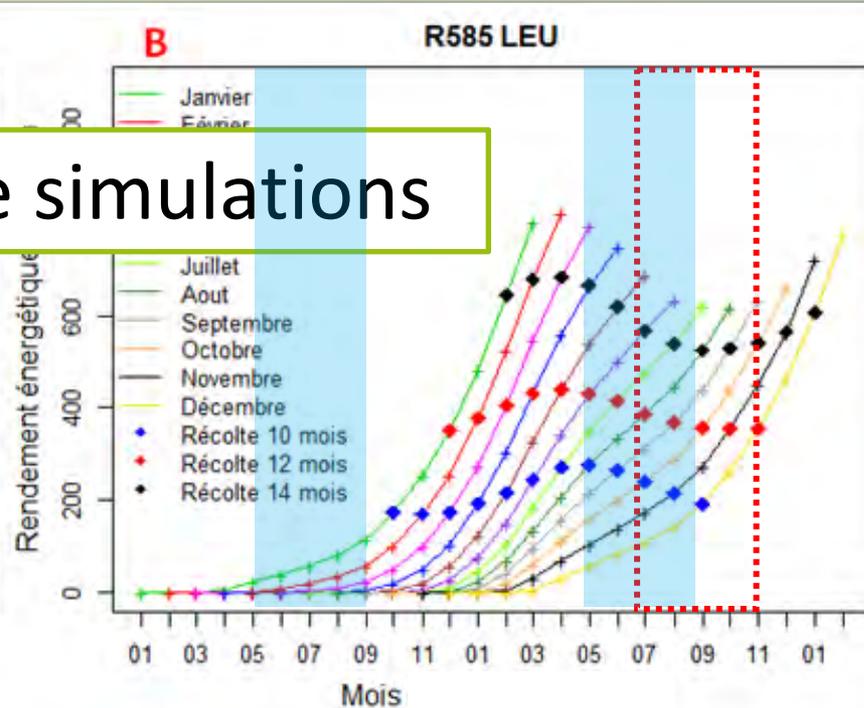
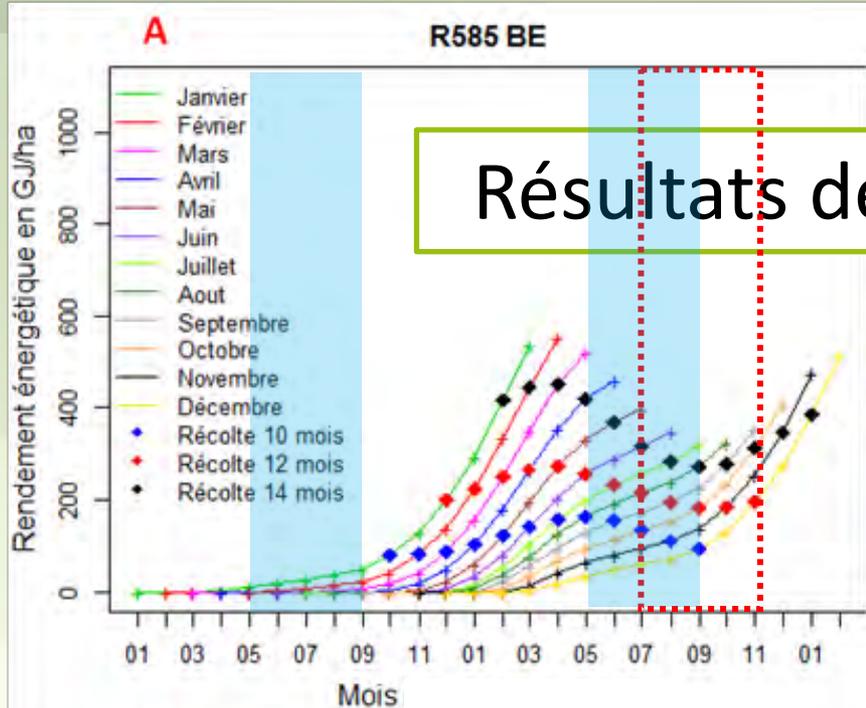


Variable utilisée : PCI
Exprimé en GJ/ha

Simulations



Résultats de simulations



Conclusions Action 2

-  Les données agronomiques accumulées ont été utilisées pour les évaluations économiques et environnementales (action 3).
-  Mosicas intègre la production de canne énergétique en année de plantation. (Calage et Validation Réunion / Guadeloupe)
-  **L'humidité de la canne et la production en matière sèche** explique les différences entre les classements des rendements en PCI.
-  Les 20 variétés ont des comportements différents sur les deux sites : **interactions entre les géotypes et l'environnement.**

Perspectives Action 2

-  Intégration des données en repousse (Sypecar 1')
-  Validation et application du modèle à d'autres situations
-  Autres géotypes (Barbade – eRcane – Selection)
-  La diminution de l'humidité de la canne est un enjeu important pour gagner de l'énergie (par unité de surface).
=> Importance des travaux sur le séchage de la biomasse

Etude de faisabilité d'une unité de production d'électricité à partir de canne - énergie Action 3

Analyse des conditions économiques et environnementales

Etude préliminaire

Objectifs de l'étude

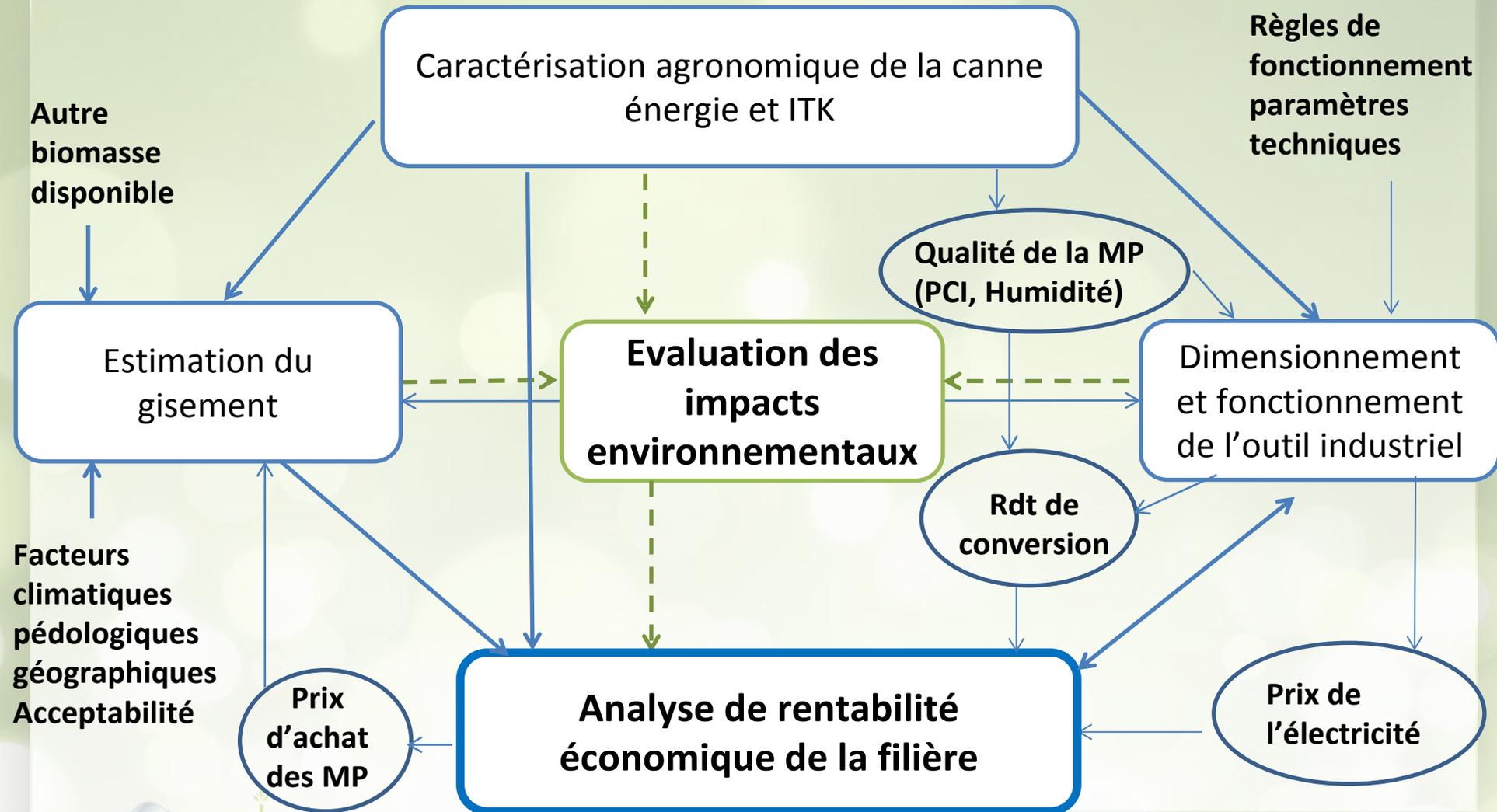
Construire des outils d'analyse économique et environnemental de la filière

- Pour évaluer les couts d'investissements et des couts de production aux champs
- Pour analyse économique de la filière en intégrant les couts industriels
- Pour réaliser un bilan environnemental type ACV

Evaluer des scénarios autour de 2 unités industrielles (5 et 10 MW)

- Tester les outils, leur utilisation possible « en routine »
- Obtenir des ordres de grandeur de la faisabilité économique de la filière
- Premières estimations du bilan énergétique et des résultats environnementaux clés

Des analyses interdépendantes



Démarche et outils développés : Schéma général

Construction de scénarios et définition des paramètres d'entrée



Construction d'un référentiel technico-économique d'une canne énergie
(Mise à jour de Cirad 2006)

Dimensionnement de l'outil industriel
(Données et estimation industrielles)

Développement d'un Outil d'analyse économique de filière



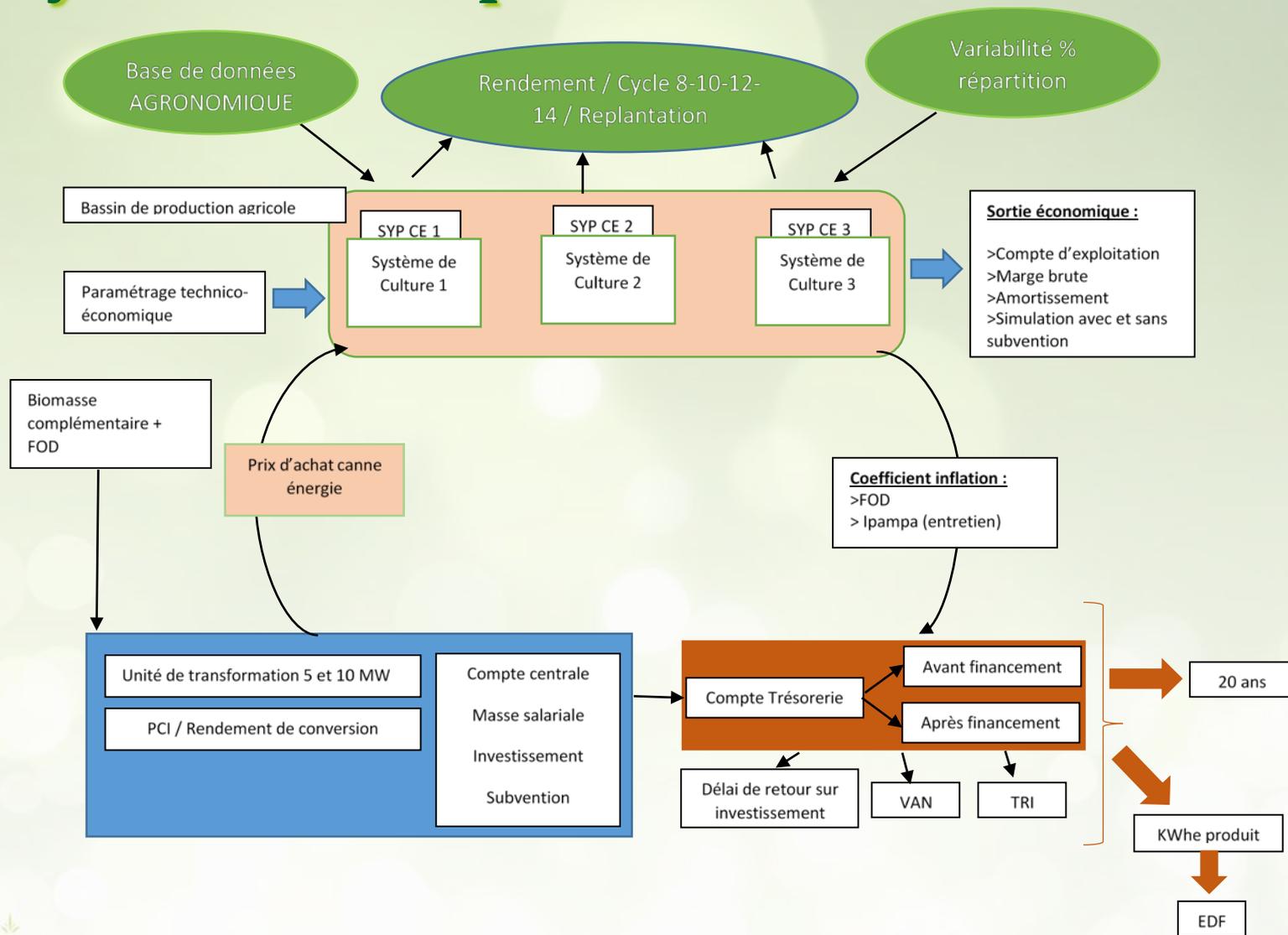
Analyse de la faisabilité économique de la filière canne énergie

Adaptation Logiciel ACV (Simapro) et base de données Ecoinvent



Analyse de Cycle de Vie (ACV)
Bilan énergétique et environnemental

Analyse économique : L'outil d'évaluation



Analyse économique : indicateurs de faisabilité



Indicateurs de rentabilité de la filière

- **TRI - Taux de Rentabilité interne : Outil de décision à l'investissement**
Projet devient intéressant pour un investissement avec un $TRI \geq 9\%$.
- **Solde de trésorerie avant financement** (\neq entre flux entrant et sortant)
- **VAN - Valeur Actuelle Nette**
Flux de trésorerie actualisé hors investissement
- **TR – Délai de retour sur investissement**
Récupération du capital investi

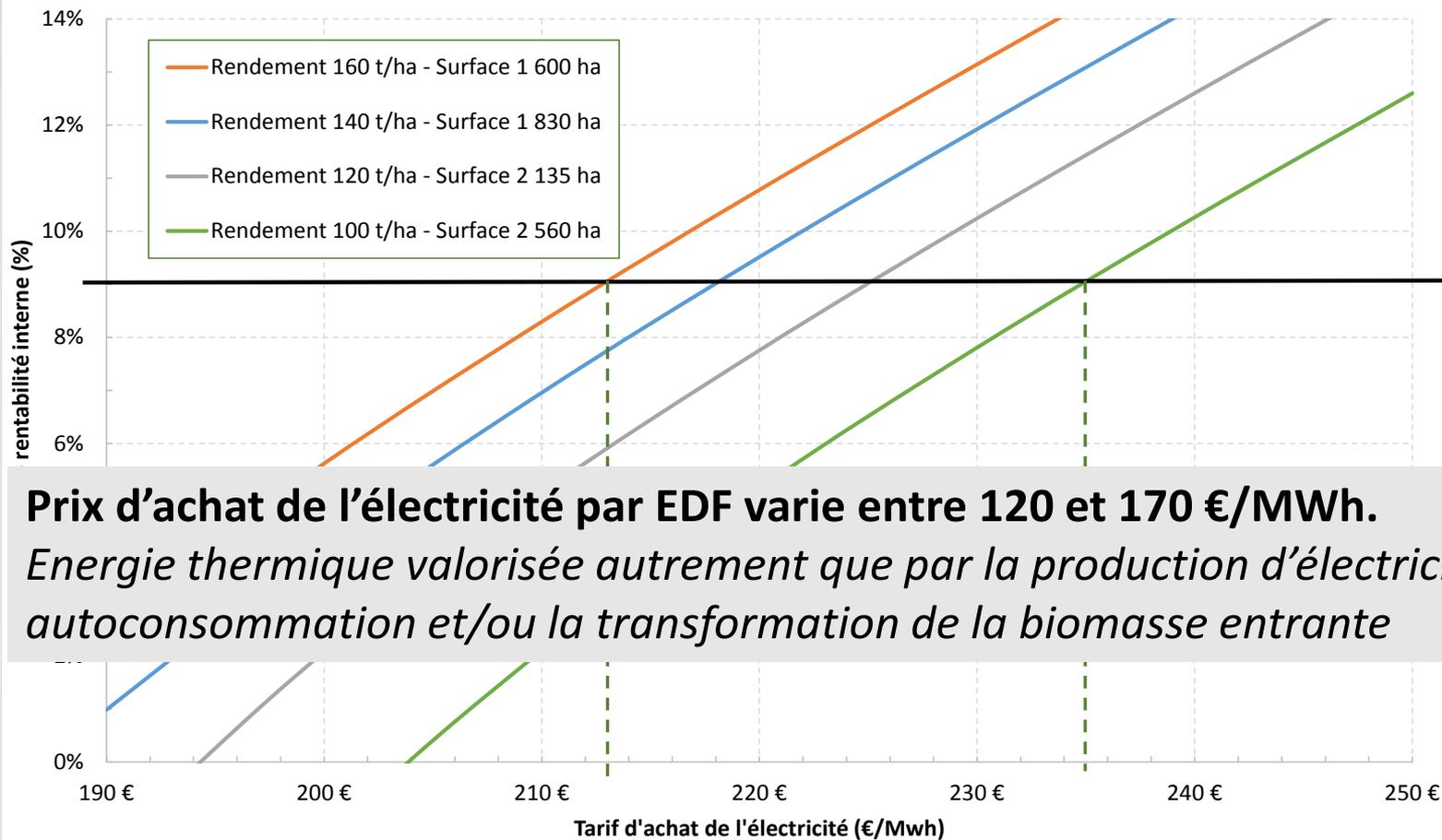


Taille du gisement nécessaire

Analyse économique : Résultats

TRI et Prix de l'électricité

Analyse de sensibilité du TRI de la filière par rapport au tarif d'achat de l'électricité - 10 MW - 3% d'apport complémentaire - 30% subvention



Prix d'achat de l'électricité par EDF varie entre 120 et 170 €/MWh.
Energie thermique valorisée autrement que par la production d'électricité : autoconsommation et/ou la transformation de la biomasse entrante

Analyse environnementale : Méthodologie ACV

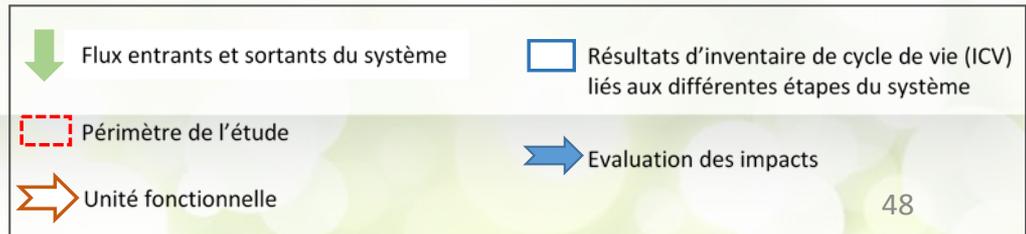
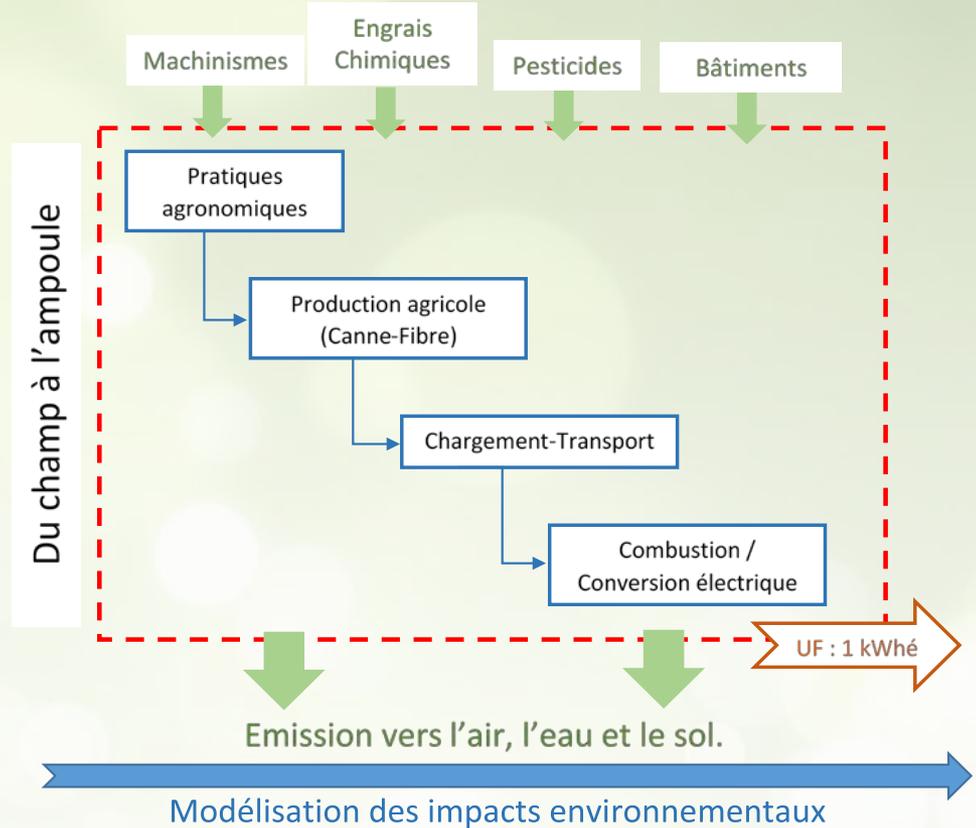
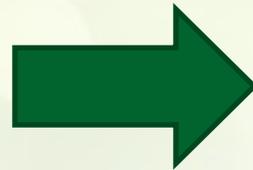


Frontière et étapes du système

Scénarios identifiés
dans la partie
économique



Interface commune



Analyse environnementale : Méthodologie ACV



Inventaire de Cycle de Vie

Combustion de la canne

Itinéraires techniques Machinismes

Transport

Mix énergétique Réunion

Fertilisation

Changement Affection du Sol direct

Pesticides

Facteurs Emissions (N_2O , CO_2 , P ...)

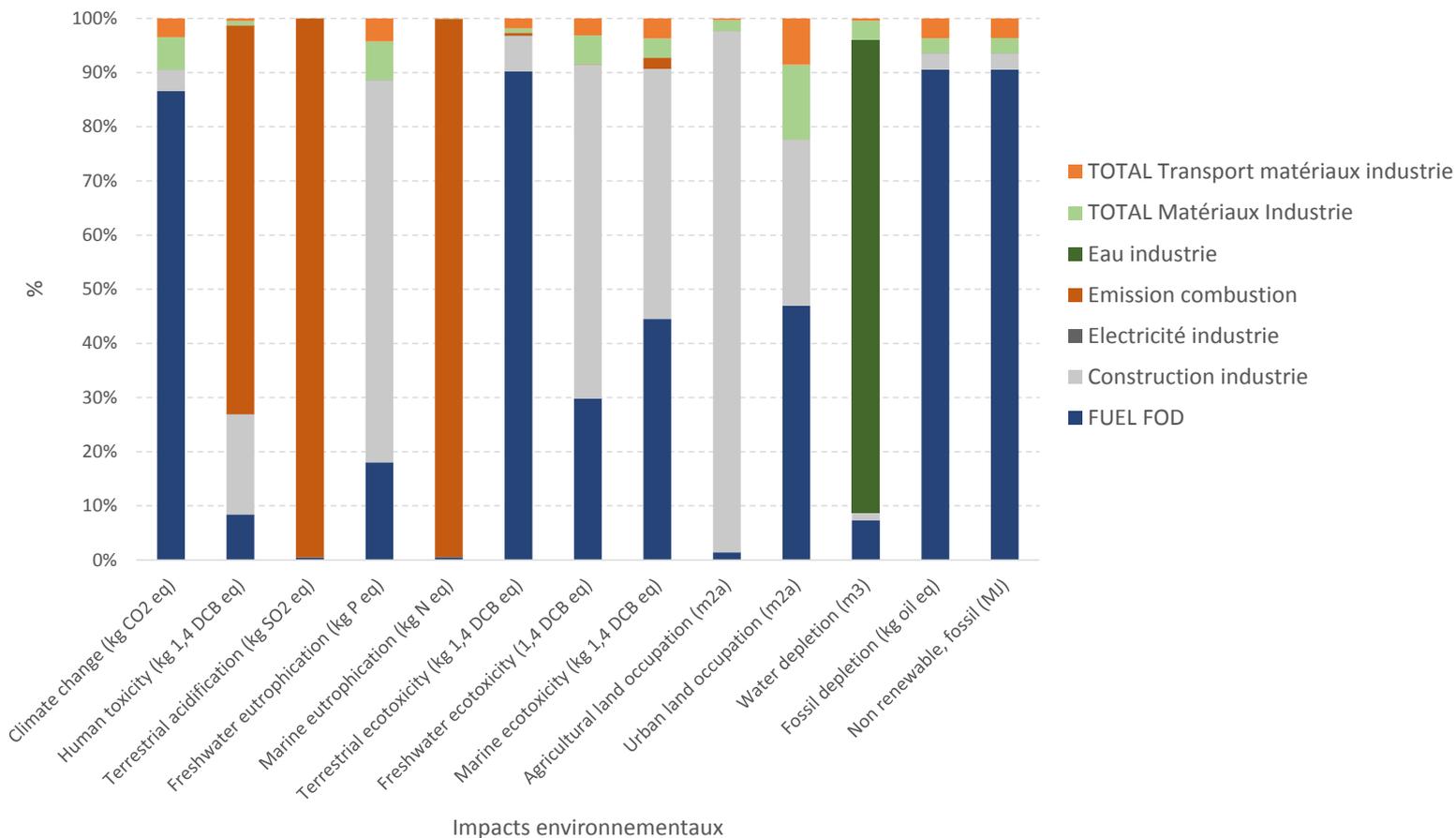
Erosion (éléments traces
métalliques)

Analyse environnementale : Premiers résultats ACV

Analyse de la contribution des étapes de cycle de vie

Exemple : 5 MW – 120 t/ha – 1065 ha

Analyse de la contribution des étapes du cycle de vie de l'industrie pour la production d'un kWh avec les impacts environnementaux de la méthode ReCiPe Midpoint.

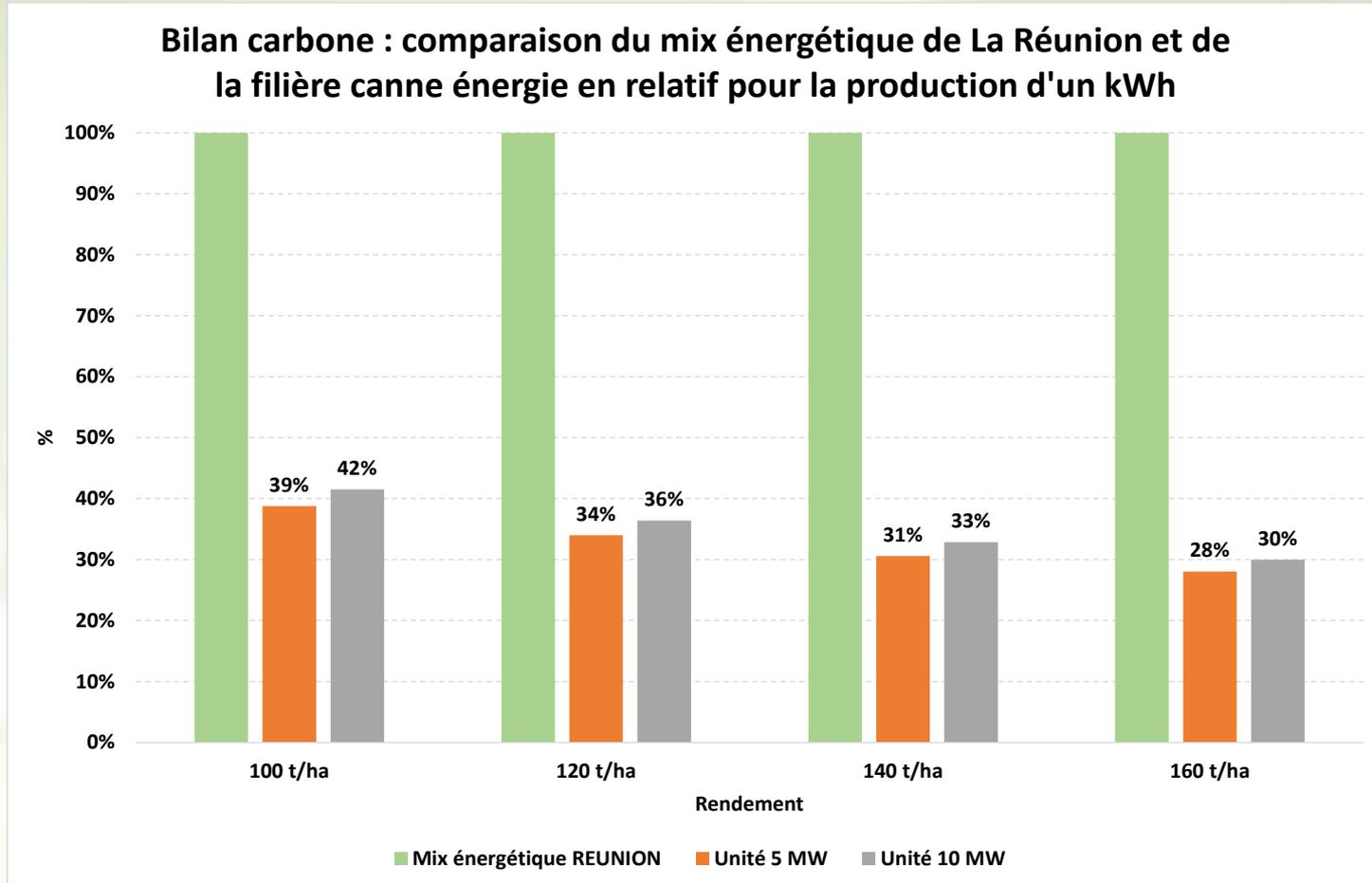


Analyse environnementale : Bilan ACV



Bilan énergie et bilan carbone

CO₂ évité : 20 et 44 ktCO₂ eq



Conclusions et perspectives

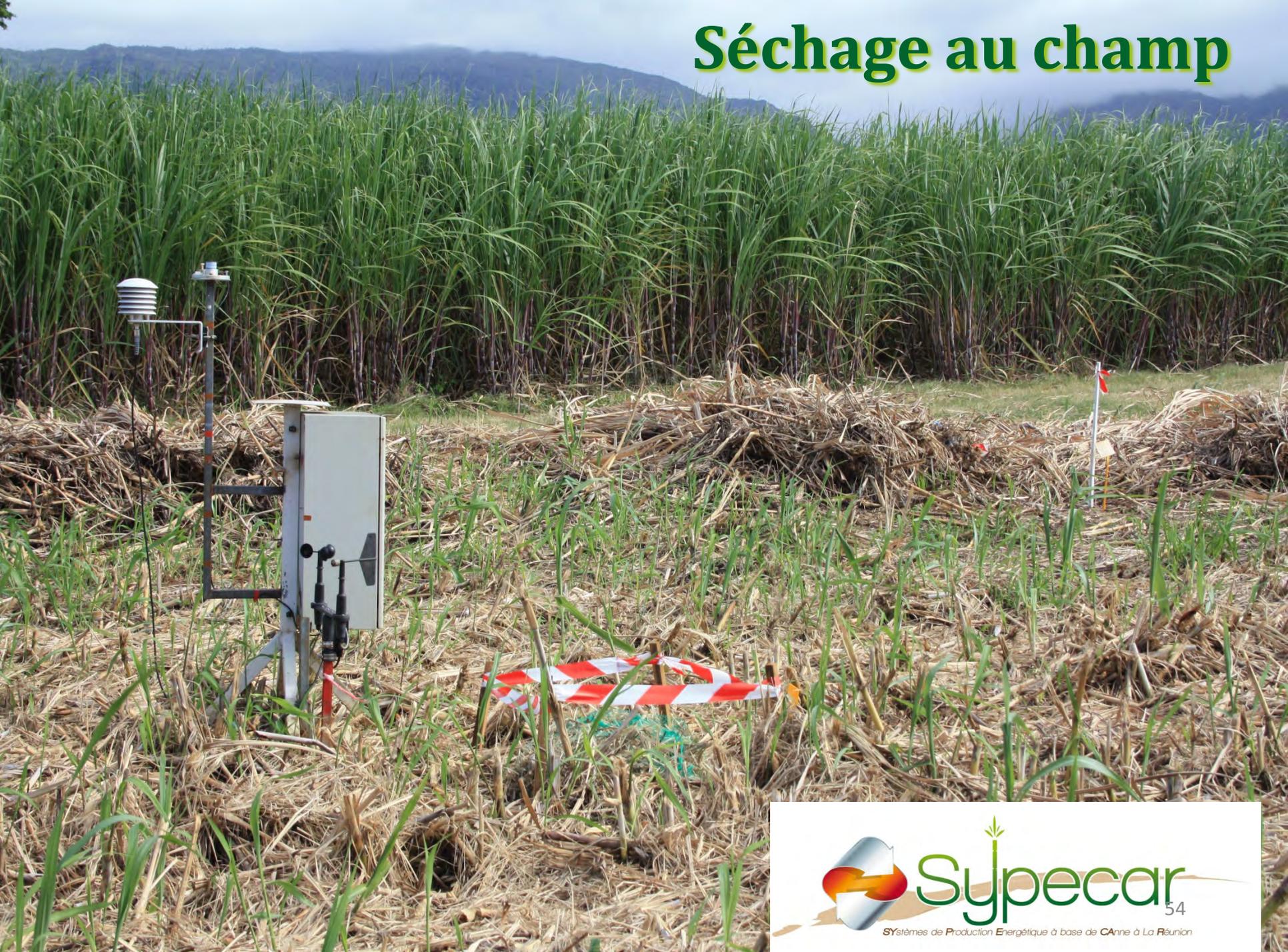
- ➊ Développement d'un outil de simulation
 - Dépôt de l'outil auprès de l'AFPP
 - Outils génériques adaptables à d'autres régions et pour des cultures dédiées à la production d'énergie

Conclusions et perspectives

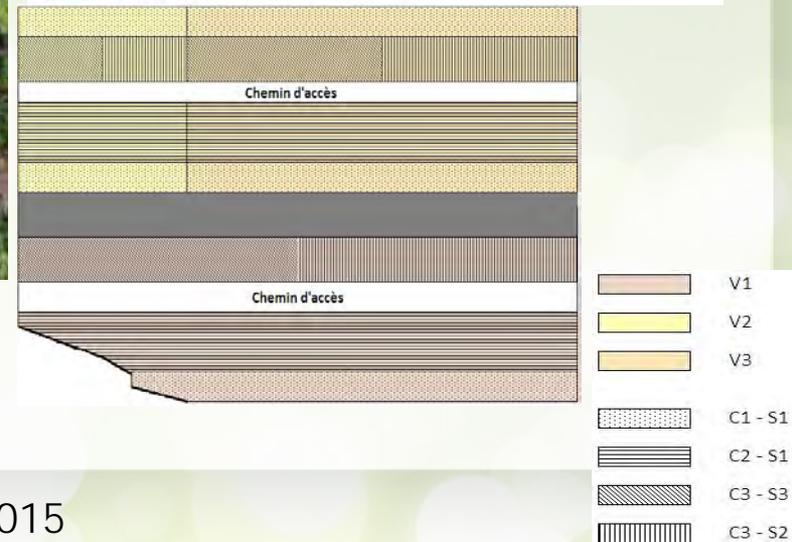
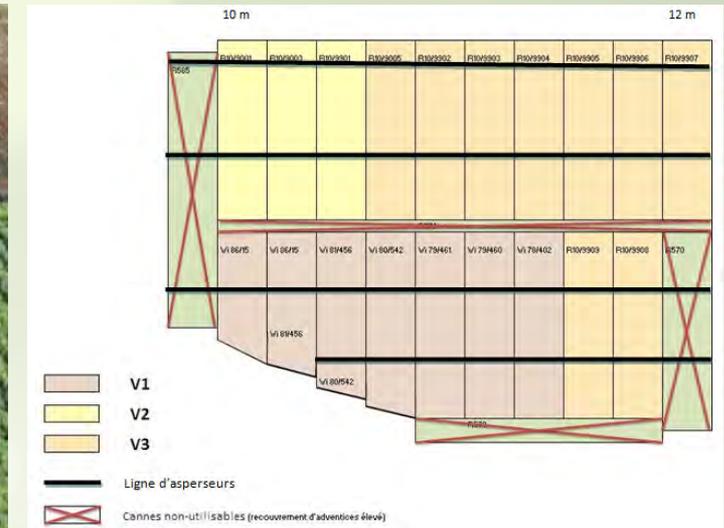
- ❖ **Obtention d'ordres de grandeurs de la faisabilité économique**
 - ❖ **Gisement nécessaire pour du 5 MW entre 700 et 1300 ha , pour 10 MW entre 1500 et 2500 ha.**
 - ❖ **Avec des subventions à l'investissement industriel de 50% et des aides à l'amélioration foncière le prix de l'électricité nécessaire pour avoir un filière rentable se situe entre 200 et 230 €/MWh**

- **Etude de sensibilité sur l'outil**
- **Définir les conditions pour arriver à une tarification d'achat de l'électricité acceptable**
- **Développer d'autres scénarios (taille d'unité de production, ...)**
- **Estimation du gisement disponible (foncier, acceptabilité sociale)**

Séchage au champ



Dispositif expérimental 2



Cannes adultes disponibles pour test de séchage

Restitution – 17 juin 2015

Cannes broyées



Broyeur à marteaux à axe horizontal



Andains de cannes broyées



Canne tronçonnées



Récolteuse tronçonneuse



Tronçons et paille au sol



Cannes entières

-  Coupeuse « péï »
-  Cannes empilées mécaniquement en andains



Restitution – 17 juin 2015

Suivi de la dessiccation 1



Suivis répétés



Echantillonnages aléatoires



Enregistrement climat



Suivi de la dessiccation 1



Broyage



Pesage



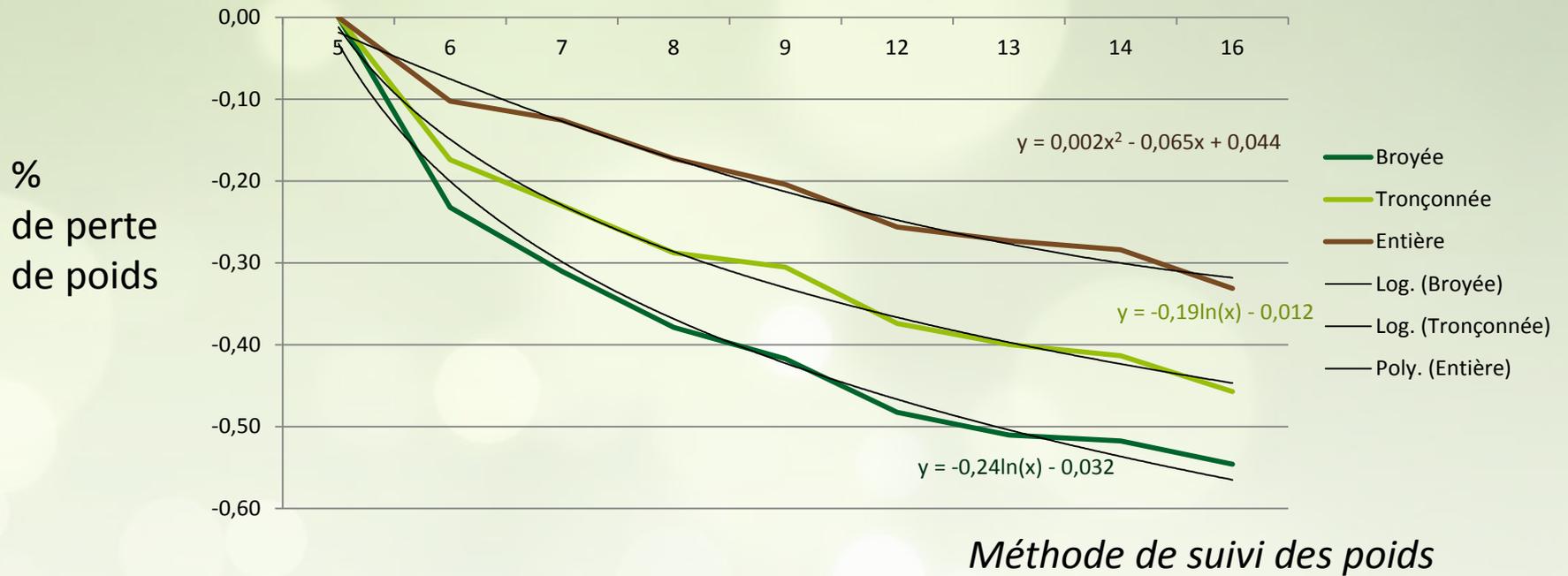
Passage étuve



NIRS

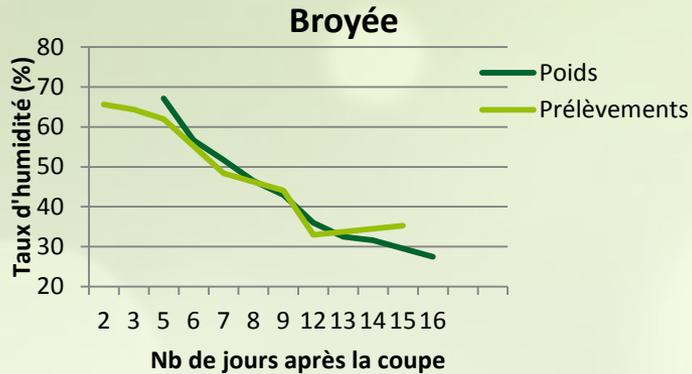


Résultats préliminaires 1



% perte de **poids** facilement modélisable

Résultats préliminaires 2



Pas de différence entre types de suivis



Différences significatives entre type de coupe (3,8 ; 2,3 ; 1,8 % /jour)



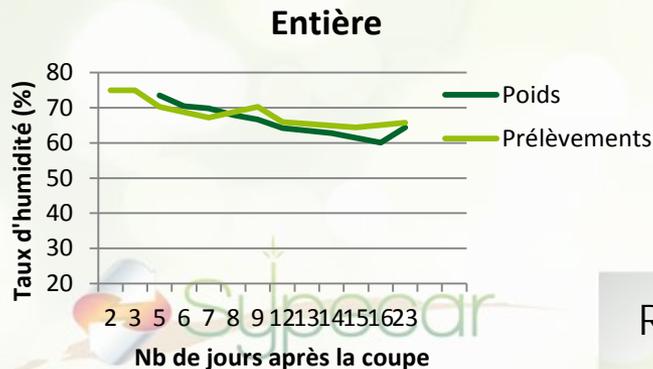
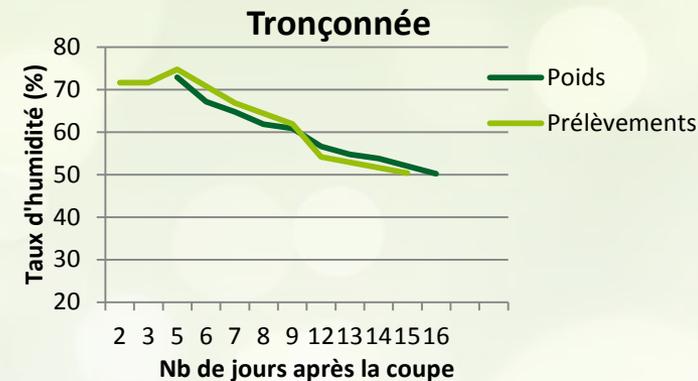
Pas de différences observées entre type de cannes



Acquisition de résultats NIRS pour calibrations

Limites :

- Zone littorale, période propice : chaude , sans pluie....
- Durée au champ trop longue(repousses)



Restitution – 17 juin 2015

Acquis

- Il est possible de sécher en partie la canne au champ
- Un protocole permet de suivre ce dessèchement
- Le dessèchement augmente la qualité de la biomasse



Perspectives



Choix des engins de récolte



Possibilité de modéliser le dessèchement (Déficit de saturation \times Fenêtres de jours sans pluie)



Calibration du NIRS sur une gamme d'échantillons plus large



Perspectives

- 📄 Tester à d'autres périodes
- 📄 Valider les dynamiques et les lier du Déficit en Saturation (DF)
- 📄 Modéliser le processus sur les données climats pour évaluer le gain de PCI de la biomasse disponible au champ
- 📄 Evaluer sur l'année



Merci de votre attention



Roussel C., Martiné JF, Masson J, Paillat J., Mellin M., Lejars C., Boizard H, Tricard C. , Dassie P., Latapie M., E Bressy , Rosies B. Poser C.

Merci aux techniciens et ouvriers Cirad , eRcane et CTICS

SYPECAR, un projet en partenariat :



Atelier Biomasse Energie 10 décembre 2015



