

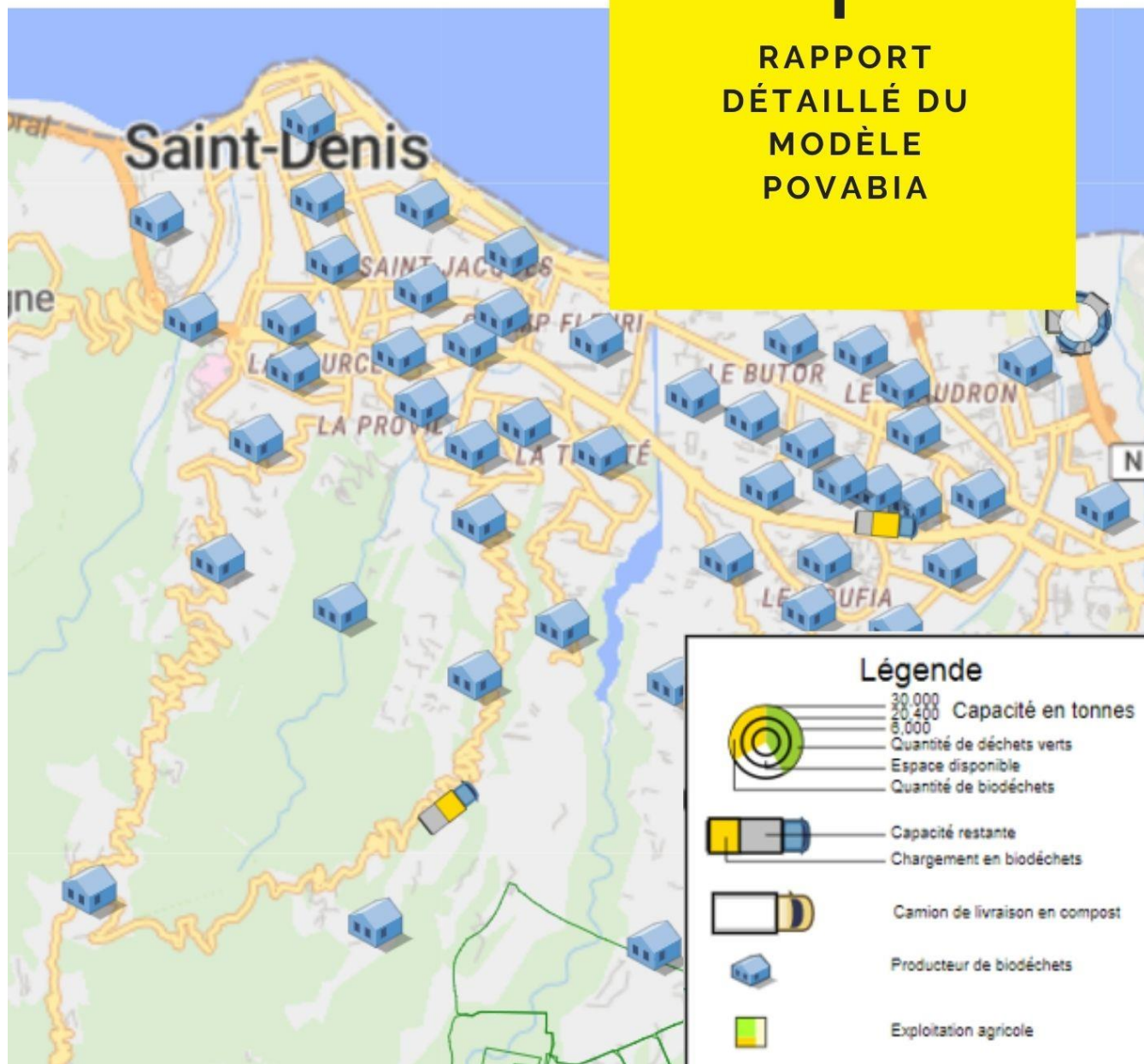
POVABIA

RAPPORT TECHNIQUE

09 - 2020



RAPPORT DÉTAILLÉ DU MODÈLE POVABIA



TRAVAUX DE POST-DOCTORAT DE
CHRISTELLE HATIK



TABLES DES MATIERES

GLOSSAIRE	4
Sigles.....	4
Définitions PoVaBiA	4
TABLE DES TABLEAUX.....	5
TABLE DES FIGURES.....	6
TABLE DES EQUATIONS	7
I. INTRODUCTION	8
Objectif du document	8
Aspects techniques	8
II. DESCRIPTION GENERALE DU MODELE	8
1. Modélisation des agents	8
2. Diagramme des agents.....	9
3. Classes sous-jacentes	11
4. Interface utilisateur	11
5. Scénarios	13
6. Données de sortie	14
III. FONCTIONNEMENT GENERAL DES CLASSES	15
1. Classe Main.....	15
2. Classe (Agent) Producer	16
2.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	16
2.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	16
2.3. DESCRIPTION DU STATECHART	17
3. Classe (Agent) CollectingPlanner.....	18
3.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	18
3.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	18
3.3. DESCRIPTION DU STATECHART	19
4. Classe (Agent) Collecting	20

4.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	20
4.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	20
4.3.	DESCRIPTION DU STATECHART	22
5.	Classe (Agent) Treatment-Landfill	23
5.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	23
5.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	23
5.3.	DESCRIPTION DU COMPORTEMENT	24
6.	Classe (Agent) CompostingPlant	25
6.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	25
6.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	25
6.3.	DESCRIPTION DU STATECHART	25
7.	Classe (Agent) MethanationPlant	26
7.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	26
7.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	26
7.3.	DESCRIPTION DU COMPORTEMENT	26
8.	Classe (Agent) Farmland	27
8.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	27
8.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	27
8.3.	DESCRIPTION DU STATECHART	29
9.	Classe (Agent) DeliveryPlanner	30
9.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	30
9.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	30
9.3.	DESCRIPTION DU STATECHART	30
10.	Classe (Agent) Delivery	32
10.1.	DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION	32
10.2.	DESCRIPTION DES ATTRIBUTS	32
10.3.	DESCRIPTION DU COMPORTEMENT	33

II. DETAIL DU MODELE : CONSTRUCTION ET HYPOTHESES DE MODELISATION DES AGENTS34

1.	Les producteurs de biodéchets et déchets verts	34
1.1.	IDENTIFICATION DES PRODUCTEURS A LA REUNION	34
1.2.	CALCUL DES GISEMENTS DE PRODUCTION	35
1.2.1	Par producteurs.....	35
1.2.2	Par IRIS	35
1.2.3	Compte-rendu des gisements	36
1.3.	CARACTERISATION DES GISEMENTS	37
1.3.1	Choix des critères de qualités des déchets	37
1.3.2	Méthode d'identification des qualités	38
1.3.3	Compte-rendu de la qualité des différents déchets.....	38
2.	Les transporteurs	40
2.1.	ORGANISATION DES FILIERES DE COLLECTE	40
2.2.	REPRESENTATION GENERALE DES CAMIONS	40
2.3.	IDENTIFICATION DE LA FLOTTE PAR EPCI	40

2.4.	ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DES VEHICULES	41
3.	Les unités de transformation	42
3.1.	LES RECETTES D'ENTREE	42
3.1.1	Les contraintes à respecter	42
3.1.2	Les différents scénarios testés	43
3.1.3	La recette sélectionnée	43
3.2.	FONCTIONS DE TRANSFORMATION	43
3.2.1	Méthode de travail	44
3.2.2	Les fonctions de transformation du modèle	44
3.2.2.1	La méthanisation	44
3.2.2.2	Le compostage	44
3.2.2.3	La séparation de phase	45
3.3.	FONCTION DE PRODUCTION D'ENERGIE	45
4.	Les consommateurs de matières organiques	46
4.1.	CONSTRUCTION DU STATECHART	46
4.1.1	L'identification des différents types de cultures	46
4.1.2	Les cultures maraîchères	46
4.1.2.1	Identification des cultures représentatives	46
4.1.2.2	Etats de développement et temps de transition	47
4.1.3	La culture d'ananas	47
4.1.4	La culture de canne à sucre	48
4.1.5	L'arboriculture	48
4.1.5.1	Identification des cultures représentatives	48
4.1.5.2	Etats de développement et temps de transition	48
4.2.	INTEGRATION DES DONNEES DU RPG 2017	49
4.3.	IDENTIFICATION DE LA DEMANDE	54
4.3.1	Identification des facteurs de la demande	54
4.3.2	La source de matière organique demandée	56
4.3.3	Fractionnement des besoins	56
4.3.4	Ajustement des besoins selon le type de sol	57
4.4.	QUANTIFICATION DE LA DEMANDE	57
4.4.1	Approche NPK	57
4.4.2	Approche matière organique	58
4.4.2.1	Caractérisation des matières organiques produites	58
4.4.2.2	Calcul des besoins en MO par parcelles	59
4.5.	SELECTION DE LA PRISE EN CHARGE DES BESOINS	59
4.5.1	Objectif de diversification	59
4.5.2	Bilan de matières organiques	59
4.6.	MISE EN PLACE DES FACTURES	60
	BIBLIOGRAPHIE	62

GLOSSAIRE

SIGLES

Alim : Déchets de la restauration collectives et des commerces alimentaire

BOM : Bennes à Ordures Ménagère

C : Carbone

C/N : Ratio de carbone organique sur l'azote organique

DO : Déchets Organique

DV : Déchets Verts

FFOM : Fraction Fermentescible des Ordures Menagères

GES : Gaz à Effet de Serre

IAA : Industries Agro-Alimentaire

IRIS : Ilots regroupés d'Information Statistique

K : Potassium

Kacc : Potassium accessible

N : Azote

Nacc : Azote accessible

OM : Organic Matter, matière organique

P : Phosphore

Pacc : Phosphore accessible

pH : Potentiel Hydrogène

DEFINITIONS POVABIA

Classe: abstraction d'un type de donnée caractérisée par des propriétés (attributs et méthodes) communes à des objets, et permettant de créer des objets ayant ces propriétés (source : dico.fr.com).

Co-compostage : compostage à partir de différentes sources de biodéchets et déchets verts.

Co-méthanisation : méthanisation à partir de différentes sources de biodéchets et déchets verts.

Digestat brut : digestat produit après fermentation au cours de la méthanisation.

Instance : occurrence d'une classe.

Matières brutes : biodéchets et déchets verts, servant de substrat aux processus de méthanisation et compostage.

Population : ensemble d'objet relié à une classe.

Producteurs : personne productrice de déchets.

Simulation : Lancement du modèle informatique.

Sources de matières organiques : composts, digestats liquides et solides.

Statechart : diagramme des agents.

Substrat : support matériel des processus de méthanisation et compostage.

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des scénarios.....	13
Tableau 2 : Description des attributs de la classe Producer	16
Tableau 3 : Présentation des attributs de la classe CollectingPlanner.....	18
Tableau 4 : Présentation des attributs propre à la classe Collecting.....	20
Tableau 5 : Présentation des attributs de la classe Treatment_Landfill.....	23
Tableau 6 : Attributs de la classe Farmland	27
Tableau 7 : Présentation des attributs de la classe DeliveryPlanner.....	30
Tableau 8 : Présentation des attributs de la classe Delivery.....	32
Tableau 9 : Dénombrement des producteurs par gisements.....	34
Tableau 10 : Présentation des différents gisements modélisés dans PoVaBiA.....	36
Tableau 11 : Résultats de la quantification des gisements	36
Tableau 12 : Sélection des critères qualifiant les biodéchets et déchets verts.....	37
Tableau 13 : Résultats de la synthèse bibliographique sur la qualification des catégories de biodéchets	38
Tableau 14 : Attributs de la classe AbstractTruck commun aux classes Collecting et Delivery	40
Tableau 15 : Synthèse des substrats autorisés par type de traitements.....	42
Tableau 16 : Conditions physico-chimiques des substrats en entrée.....	42
Tableau 17 : Evolution de la matière au cours de la méthanisation	44
Tableau 18 : Evolution de la matière au cours du compostage	44
Tableau 19 : Répartition des qualités du digestat brut entre la phase liquide et la phase solide	45
Tableau 20 : Sources bibliographiques utilisées pour identifier les cycles de production et les temps de transition des cultures maraîchères modélisées	47
Tableau 21 : Bibliographie utilisée pour identifier le cycle cultural et les temps de transitions des cultures en verger	48
Tableau 22 : Les cultures types dans PoVaBiA	49
Tableau 23 : Les cultures sélectionnées dans le RPG 2017	50
Tableau 24 : Proportions respectées pour la répartition aléatoire des parcelles	52
Tableau 25 : Présentation des résultats de répartition des cultures du RPG dans les catégories types de notre modèle.....	52
Tableau 26 : Sources utilisées pour déterminer les moments et les besoins des cultures type du modèle PoVaBiA	54
Tableau 27 : Présentation des différentes natures de matière demandée par culture Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 28 : Fractionnement des besoins NPK (en % des besoins totaux identifiés dans les sources bibliographiques).....	56
Tableau 29 : Sources utilisées pour identifier les besoins des cultures non-renseignés dans le guide FertiRun.....	58
Tableau 30 : qualités agronomiques des matières organiques produites dans PoVaBiA.....	59
Tableau 31 : Production de matière organique selon différents scénarios (à partir des biodéchets produits)	60
Tableau 32 : Demande totale en matière organique basée sur les besoins en azote	60
Tableau 33 : Présentation des attributs de la classe AbstrackTruck.....	60

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme Agents des classes de PoVaBiA.....	10
Figure 2 : Portion de l'interface dédiée au choix d'un scénario pré-enregistré ou personnalisé (à gauche) et portion de l'interface dédiée au choix de priorisation (à droite).....	12
Figure 3 : Panneau de visualisation principal de la simulation	12
Figure 4 : Interface graphique de la classe Main.....	15
Figure 5 : Statechart de la classe Producer.....	17
Figure 6 : Interface graphique de la classe CollectingPlanner	18
Figure 7: Diagramme d'états de la classe CollectingPlanner.....	19
Figure 8 : Interface graphique de la classe Collecting.....	20
Figure 9 : Statechart de la classe Collecting.....	22
Figure 10 : Interface graphique de la classe Treatment_landfill	23
Figure 11 : Interface graphique de la classe farmland.....	27
Figure 12 : Statechart de la classe Farmland	29
Figure 13 : Interface graphique de la classe DeliveryPlanner	30
Figure 14 : Diagramme d'états de la classe DeliveryPlanner	30
Figure 15 : Interface graphique de la classe Delivery	32
Figure 16 : Statechart de la classe Delivery	33
Figure 17 : Calcul de la production de déchets ménagers et déchets verts par IRIS	36
Figure 18 : Répartition de la production selon les gisements.....	36
Figure 19: Ratio de la part collectable sur la production totale de biodéchets par gisement.....	37
Figure 20 : Carte des gisements par IRIS de la production (à gauche) et de part collectable (à droite) des biodéchets et déchets verts à la Réunion.....	37
Figure 21 : Présentation des différents gisements envisageables (partie haute : gisement de production, partie basse : gisement collectable).....	43
Figure 22 : Proportion des différents gisements.....	43
Figure 23 : Schéma de la construction de la classe (Agent) Farmland.....	46
Figure 24 : Schéma conceptuel du state chart de le classe Farmland et représentation des stades culturaux des 15 catégories modélisées.....	49
Figure 25 : Schéma de répartition des cultures du RPG au sein des catégories PoVaBiA.....	53
Figure 26 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des culture maraîchères de (1) légumes feuilles, (2) légumes à bulbes, (3) légumineuses	54
Figure 27: Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des culture maraîchères de (4) tubercules, (5) de légumes fruits.	55
Figure 28 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des cultures d'Ananas et des Bananes.	55
Figure 29: Schéma illustrant les moments de demande en matière organique des cultures de Cannes à sucre d'un système de production défini.....	55
Figure 30 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des vergers fruitiers.	56
Figure 31 : Carte pédologique de la Réunion, selon CIRAD 2003.	57

TABLE DES EQUATIONS

Équation 1 : Méthode générale de l'estimation des gisements de biodéchets.....	35
Équation 2 : Production d'électricité (1).....	45
Équation 3 : Production d'électricité (2).....	45
Équation 4 : Calcul de la dose de matière organique à appliquer selon les besoins.....	59

I. INTRODUCTION

OBJECTIF DU DOCUMENT

Cette notice décrit en détail le modèle spatialisé multi-agents PoVaBiA (Potentiel de Valorisation des Biodéchets en Agriculture) dont l'objectif est d'être un outil d'appui à la décision pour les instances régionales en charge de la gestion des déchets.

Ses fonctionnalités sont les suivantes :

- Simuler les flux de déchets organiques (DO) entre producteurs et unités de traitement (Partie amont du modèle) et entre unités de traitement et consommateurs (partie aval du modèle) dans le cadre de scénarios préétablis ou personnalisés ;
- Simuler la transformation des DO au sein des unités de traitement, en fonction de leur nature et du procédé de transformation de l'unité ;
- Évaluer les coûts d'investissement et de fonctionnement des différents scénarios ainsi que les importations évitées par rapport à un scénario tendanciel ;
- Évaluer les émissions de GES des différents scénarios, par rapport à un scénario tendanciel.

ASPECTS TECHNIQUES

La version du modèle décrite est la dernière version stable, à savoir : « PoVaBiA_v10 ».

Nous faisons tourner les simulations sur Windows 7, et grâce à la plateforme de développement AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.5.1.

II. DESCRIPTION GENERALE DU MODELE

1. MODELISATION DES AGENTS

Le modèle met en scène sept classes d'agents présentées brièvement ci-après :

- Les producteurs de DO (Classe Producer) produisent des biodéchets (BD) et des déchets verts (DV). Cette classe rassemble en fait 4 sous-types différents (ménages, restauration collective, restauration commerciale & commerce alimentaire, industrie agroalimentaire) dont les DO présentent des caractéristiques différentes. Une instance de la classe Producer regroupe les producteurs d'un même sous-type par Îlot Regroupé pour l'Information Statistique (IRIS).
- Les camions de collecte de déchets (Classe Collecting) transportent les DO depuis les producteurs aux unités de traitement. Chaque camion est caractérisé par sa capacité en tonnes. Au vu de la prépondérance des deux types de camions BOM et mini-BOM sur l'île, on modélise la flotte par un ensemble de camions pouvant posséder comme capacité celle des BOM (12t), ou celles des mini-BOM (3,5t).
- Les unités de traitement (Classe Treatment-Lanfill, Methanation & Composting) stockent et transforment les DO. Les différents scénarios du modèle incluent les processus d'enfouissement, de méthanisation et de compostage. Les sous-produits de ces transformations (digestat liquide et solide, compost et éventuellement électricité) sont comptabilisés et les trois sous-produits biologiques sont réinjectés pour la partie aval du modèle.
- Les camions de distribution (Classe Delivery), qui transportent le compost produit depuis les unités de traitement jusqu'aux agriculteurs. Leur fonctionnement est similaire à celui des camions de collecte et ils sont également caractérisés par leur capacité.
- Les agriculteurs (Classe Farmland) garantissent la qualité du sol et les rendements cultureux de leurs parcelles agricoles. Ils peuvent donc épandre le compost ou le digestat pour amender leur

sol et fertiliser leur cultures (en élément N, P et K). Les instances de la classe Farmland émettent des demandes en engrais en fonction de l'état de leur sol, de la culture qui y est en place et du stade de développement de cette culture. En contrepartie de cette demande, ils reçoivent une commande et une facture en fonction des stocks disponibles.

Au regard de ces agents matérialisés, deux classes d'agents non matérialisés complètent le modèle :

- Le planificateur de collecte (*Classe CollectingPlanner*), qui distribue les missions de collecte aux camions de collecte. Il s'assimile aux services de planification de collecte des collectivités territoriales.
- Le planificateur de distribution (*Classe DeliveryPlanner*), qui reçoit et traite les demandes en compost des agriculteurs. Il fixe également un prix pour le compost et le digestat en fonction des stocks disponibles et de la demande.

D'autres classes permettent de représenter les matières qui restent de simples objets manipulés par les agents (*Classe Waste, Classe Digestate, Classe Compost*).

2. DIAGRAMME DES AGENTS

La plateforme Anylogic permet d'implémenter un modèle avec le langage de programmation Java, qui est un langage orienté-objet. Anylogic donne à disposition de l'utilisateur un espace de travail et propose un panel d'objets complexes à manipuler sur cet espace de travail. Le software gère automatiquement la syntaxe du code « caché » et permet à un utilisateur peu chevronné des structures et fonctionnalités de Java de se concentrer sur la modélisation à proprement parler des agents, c'est-à-dire leur comportement.

Ci-après, le diagramme des classes agent (*cf. Figure 1*) permet de visualiser les paramètres des classes en jeu, les principales méthodes associées et les interactions principales entre agents. Ce diagramme présente les agents suivant le parcours chronologique des déchets organiques lors de leur revalorisation, depuis leur production dans nos poubelles, jusqu'à l'épandage de matières organiques transformées (compost, digestats liquide et solide) en passant par les différentes étapes de collecte, traitement et redistribution.

Pour les questions de communication entre agents, se référer à la section 3Classes sous-jacentes qui explique les choix opérés en termes de communication entre agents.

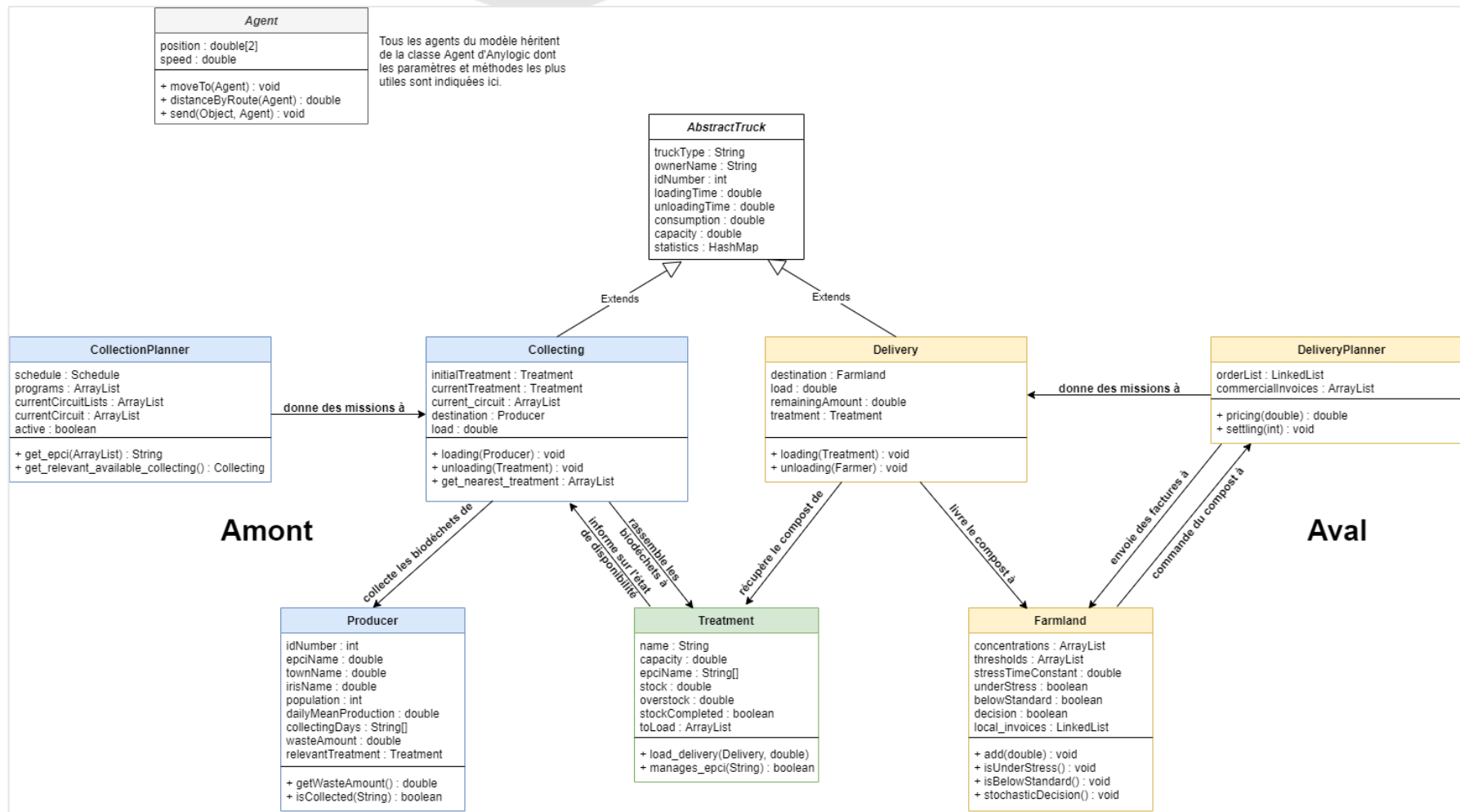


Figure 1 : Diagramme Agents des classes de PoVaBiA

3. CLASSES SOUS-JACENTES

Dans Anylogic, les agents peuvent communiquer avec d'autres agents en utilisant des canaux par le biais desquels ils peuvent envoyer des objets contenant de l'information. Nous utilisons cette fonctionnalité pour deux types d'objets : les messages et les factures.

- La **classe Message** représente l'ensemble des moyens génériques de communiquer d'un agent à un autre. Que l'échange réel se fait de *visu*, par téléphone, mail ou tout autre moyen de communication, il sera assimilé à un objet de la classe *Message*. Un tel objet est produit, émis et transmis de manière instantanée à l'agent destinataire. Celui-ci prend connaissance de la nature du message et, en fonction de son état courant, effectue une action, et éventuellement y répond. Le message est défini par un attribut *type* qui donne la nature de la requête ou de l'information transmise. Se peut-être, entre autres, une confirmation, une notification de disponibilité...
- La **classe Invoice** représente les factures que le *DeliveryPlanner* envoie aux instances de la classe *Farmland* et stocke pour les enjeux de comptabilité. Lorsque la partie aval du modèle sera complètement développée, la classe permettra d'obtenir des statistiques économiques intéressantes, et d'implémenter des actes commerciaux comme « l'abonnement » au compost, la commande ponctuelle, le report de commande, etc.

4. INTERFACE UTILISATEUR

Lors du lancement d'une simulation, une page d'accueil présente le modèle, et laisse la main à l'utilisateur pour paramétrer la simulation. Les paramètres sont regroupés par thématique et accompagnés de commentaires détaillant leur signification. Voici la liste des données de simulation paramétrables :

- **Unités de traitement mises en jeu** grâce au choix d'un scénario pré-enregistré ou personnalisé (*cf.* Figure 2) ;
- **Mode de collecte des déchets**, en priorisant le ramassage par EPCI ou au niveau du syndicat mixte tout entier (*cf.* Figure 2) ;
- **Proportion de biodéchets et de déchets verts** dans les unités de transformation.

Une fois que les paramètres sont fixés, le panneau principal de la simulation s'ouvre (*cf.* Figure 3). Il est composé :

- Des éléments de contrôle de déroulement de la simulation ;
- D'une carte permettant de visualiser le positionnement et les déplacements des agents ;
- D'une série de graphes et indicateurs présentant en temps réel les grandeurs pertinentes de la simulation ;
- De sous-panneaux permettant de visualiser pour chaque classe agent les paramètres et les diagrammes d'état de chaque instance de classe.

1/ Choix du scénario

Choisissez un des scénarios pré-enregistrés ou composez votre propre scénario en sélectionnant les unités de traitement à intégrer à la simulation.

Scénarios préenregistrés

Scénarios pré-enregistrés

- Scénario tendanciel
- Scénario "Stations de compostage"
- Scénario "Stations de compostage + stations de broyage"
- Scénario "Projets Ileva et Sydne"
- Scénario " Projets + Stations de compostage"
- Scénario "Projets + Stations de compostage + stations de broyage"

Dans les 3 premiers scénarios, les déchets de Saint-Denis Ouest (défini par la Ravine des patates à Durand) sont envoyés pour traitement sur le territoire d'Ileva, en priorité sur le site de Cambaie, comme c'est le cas actuellement. Dans les 3 scénarios incluant les nouveaux projets d'aménagement, les déchets de Saint-Denis Ouest sont rapatriés sur le territoire de la Sydne.

2/ Choix du paradigme

Choisissez le paradigme de distribution des circuits.

- EPCI en priorité
- Au plus proche dans le syndicat mixte

"EPCI en priorité" signifie que le camion de collecte auquel est donné l'ordre de ramasser les déchets d'un circuit donné est recherché en priorité au sein de l'EPCI, puis dans le syndicat mixte en entier.

Dans le second paradigme, tous les camions d'un syndicat mixte sont équivalents et seule la notion de proximité entre camion et circuit de collecte est utilisée pour la distribution des circuits.

Figure 2 : Portion de l'interface dédiée au choix d'un scénario pré-enregistré ou personnalisé (à gauche) et portion de l'interface dédiée au choix de priorisation (à droite).

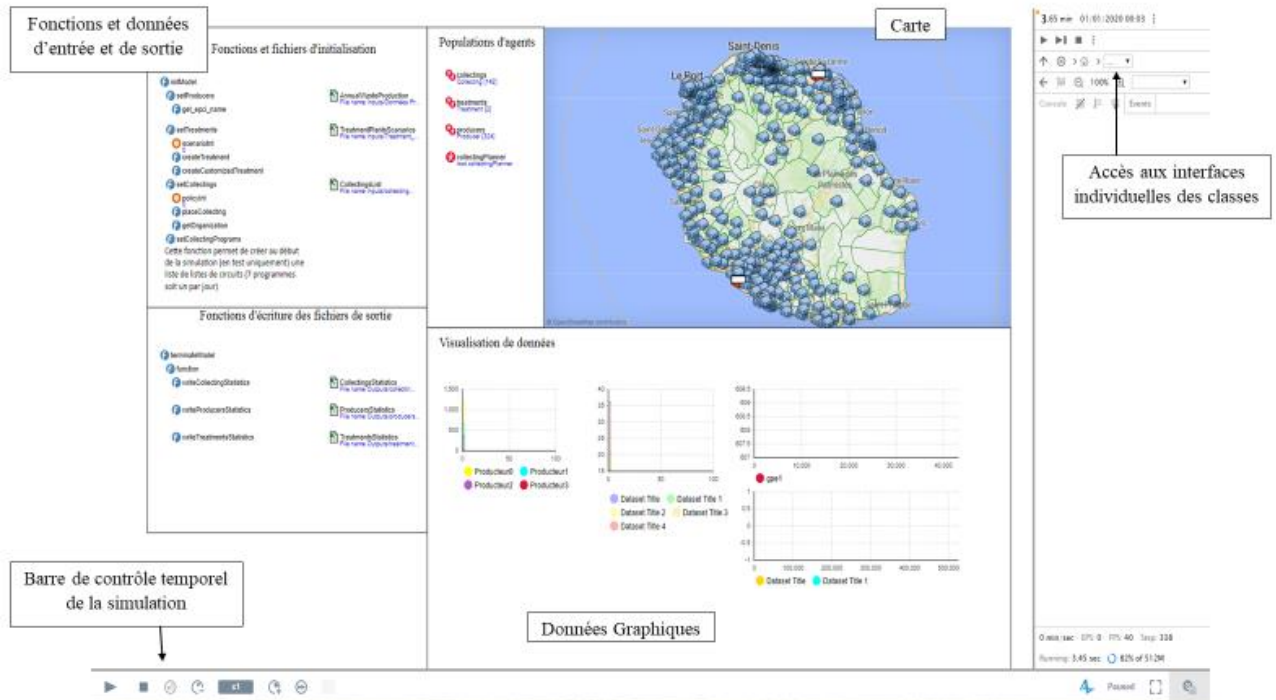


Figure 3 : Panneau de visualisation principal de la simulation

5. SCENARIOS

Les scénarios pré-enregistrés (cf. Tableau 1) sont ceux que nous avons privilégiés pour comparer différentes trajectoires de gestion des infrastructures de traitements de déchets de l'île (Capacité de traitement, pertinence du placement des unités de traitement).

Tableau 1 : Liste des scénarios

Scénario	Type de traitement	Emplacement	Syndicat mixte
Scénario 1 : Tendance	ISDnD	Sainte-Suzanne	Sydne
	ISDnD	Saint-Pierre	Ileva
Scénario 2 : Compostage	Station de compostage	Sainte-Rose	Sydne
	Station de compostage et de broyage	Le Tampon (Plaine des Cafres)	Ileva
	Station de compostage	Le Port	Ileva
Scénario 3 : Compostage et Broyage	Station de compostage	Sainte-Rose	Sydne
	Station de compostage et de broyage	Le Tampon (Plaine des Cafres)	Ileva
	Station de compostage	Le Port	Ileva
	Station de broyage	Bras-Panon (Ma Pensée)	Sydne
	Station de broyage	Saint-Denis (La Jamaïque)	Sydne
	Station de broyage	Saint-André (Ravine Creuse)	Sydne
	Station de broyage	Saint-Paul (Cambaie)	Ileva
	Station de broyage	Saint-Leu (Pointe des Châteaux)	Ileva
Scénario 4 : Projets en cours	Station de compostage	Sainte-Suzanne	Sydne
	Station de compostage	Saint-Joseph	Ileva
	Unité de méthanisation	Saint-Pierre	Ileva
Scénario 5 : Projets et stations de compostage	Station de compostage	Sainte-Suzanne	Sydne
	Station de compostage	Saint-Joseph	Ileva
	Unité de méthanisation	Saint-Pierre	Ileva
	Station de compostage	Sainte-Rose	Sydne
	Station de compostage et de broyage	Le Tampon (Plaine des Cafres)	Ileva
	Station de compostage	Le Port	Ileva
Scénario 6 : Projets et stations de compostage et broyage	Station de compostage	Sainte-Suzanne	Sydne
	Station de compostage	Saint-Joseph	Ileva
	Unité de méthanisation	Saint-Pierre	Ileva
	Station de compostage	Sainte-Rose	Sydne
	Station de compostage et de broyage	Le Tampon (Plaine des Cafres)	Ileva
	Station de compostage	Le Port	Ileva
	Station de broyage	Bras-Panon (Ma Pensée)	Sydne
	Station de broyage	Saint-Denis (La Jamaïque)	Sydne
	Station de broyage	Saint-André (Ravine Creuse)	Sydne
	Station de broyage	Saint-Paul (Cambaie)	Ileva
	Station de broyage	Saint-Leu (Pointe des Châteaux)	Ileva
	Station de broyage	Saint Pierre (ISDnD)	Ileva

6. DONNEES DE SORTIE

Le modèle permet d'extraire de nombreuses données collectées au cours de la simulation et qui permettent d'une part de vérifier la pertinence du modèle, et d'autre part, de comparer les scénarios entre eux et d'estimer les productions de matière valorisable et d'énergie exploitable. On retrouve notamment :

Pour les *Producer* :

- La quantité de déchets organiques dans les conteneurs (poubelles) courante et moyennée sur l'année ;
- Pour les *Collecting* et *Delivery* :
- Le nombre de missions et de déplacement effectués ;
- La quantité de matière transportée par type ;
- La distance parcourue sur l'année, directement liée à la consommation en carburant et aux émissions de GES ;

Pour les *Treatment* :

- La quantité de déchets organiques traitée par type ;
- Les émissions de sous-produits gazeux fatals (N_2O , CO_2) et facilement valorisables (CH_4) ;
- Le coût de fonctionnement annuel ;
- Pour les unités de méthanisation/co-compostage :
- L'investissement initial ;
- La quantité de matière transformée en digestat puis en compost et les propriétés agronomiques des produits ;
- Les quantités d'électricité et de chaleur produites par le processus de cogénération et la quantité de chaleur auto-consommée par le processus endothermique de méthanisation ;
- La quantité de chaleur produite par le processus exothermique de compostage ;

Pour les *Farmland* :

- La quantité d'engrais commandée et les dépenses associées ;
- Les quantités de GES émis lors de l'épandage (N_2O) de matière azotée ;
- Les indicateurs chimiques de qualité du sol (N, P, K, C) ;

III.FONCTIONNEMENT GENERAL DES CLASSES

1. CLASSE MAIN

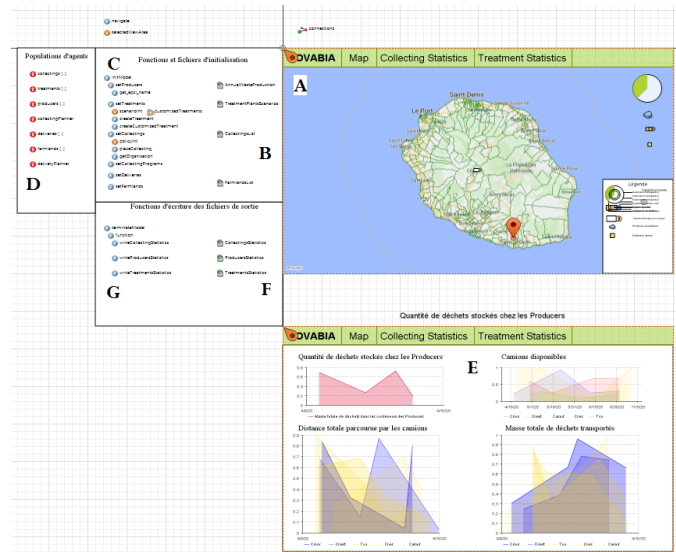


Figure 4 : Interface graphique de la classe Main

La classe Main est celle dans laquelle tous les processus liés à la simulation sont lancés. Ce n'est pas une classe agent à proprement parler mais plutôt une fonction de départ, activée dès le début de la simulation, et qui orchestre celle-ci. Tous les agents de la simulation sont créés au sein de « populations » qui évoluent dans cette classe et utilisent les ressources cartographiques qui y sont stockées.

Outre les éléments de décor qui facilitent la lecture et l'utilisation des fonctionnalités du modèle (cf. Figure 4), la classe Main contient :

(A) le support cartographique de la simulation, un objet de la classe *GisMap* ;

(B) les fichiers d'entrée du modèle (fichiers Excel) ;

Anylogic permet de charger directement sur l'espace de travail des fichiers excel, des fichiers texte et des bases de données ;

(C) les fonctions d'initialisation du modèle (création, paramétrisation et géolocalisation des agents) ;

(D) les différentes populations d'agents, pour chaque classe représentée lors de la simulation ;

Anylogic permet de définir des statistiques sur ces populations, par exemple, le nombre de camions de collecte dans l'état « Idle », ou encore la quantité totale de déchets chez tous les producteurs de déchets ;

(E) les différents graphes permettant de visualiser l'évolution temporelle des statistiques en temps réel ;

(F) les fichiers de sorties statistiques du modèle (fichiers Excel) ;

(G) les fonctions d'écriture dans les fichiers de sortie, activées à l'issue du modèle.

2. CLASSE (AGENT) PRODUCER

2.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

La classe *Producer* permet de modéliser la production de déchets sur l'île. Les données les plus fines dont nous disposons sur la production de biodéchets sont rassemblées à l'échelle des IRIS administratifs. Un agent de la classe *Producer* représente donc l'ensemble des producteurs individuels d'un IRIS. Il est placé au centroïde de ce dernier. Les IRIS non habités ou non producteurs sont ignorés lors de la simulation.

Un agent *Producer* produit journalièrement différents types de déchets, qui représentent l'éventail des déchets organiques produits dans un milieu habité et exploitables lors des processus de méthanisation et/ou compostage :

- biodéchets :
 - déchets ménagers ;
 - déchets issus de la restauration collective et commerciaux ;
- déchets industriels de 5 types différents ;
- déchets verts :
 - déchets carbonés ;
 - déchets azotés ;

Les déchets se cumulent et sont stockés sur place jusqu'à ce qu'un camion de collecte ramasse les déchets de cet IRIS.

2.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

Le Tableau 2 : Description des attributs de la classe *Producer* présente les différentes propriétés des agents de la classe *Producer*, les variables de fonctionnement. Les variables grisées permettant le suivi des déchets produits dans le modèle.

Tableau 2 : Description des attributs de la classe *Producer*

Variable	Type	Détails
idNumber	int	Numéro d'identification du producteur
irisName	String	Nom de l'IRIS représenté par cette instance
townName	String	Nom de la commune à laquelle cet IRIS appartient
epciName	String	Nom de l'EPCI auquel est rattaché cette commune
population	int	Population de l'IRIS représenté par cette instance
roadsLength	double	Linéaire (en m) des routes de cet IRIS praticables par un camion de collecte
dailyMeanProduction1	double	Production journalière moyenne de biodéchets ménagers
dailyMeanProduction2	double	Production journalière moyenne de biodéchets issus de la restauration collective et des commerces.
dailyMeanProduction3	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « amidonné ».
dailyMeanProduction4	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « produits végétaux stables ».
dailyMeanProduction5	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « graisses & huiles ».
dailyMeanProduction6	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « végétaux frais ».
dailyMeanProduction7	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « viande & poisson ».

dailyMeanProduction8	double	Production journalière moyenne de biodéchets industriels de type « mixte ».
dailyMeanProduction9	double	Production journalière moyenne de déchets verts azotés.
dailyMeanProduction10	double	Production journalière moyenne de déchets verts carbonés.
collectingDays	String[]	Tableau regroupant les jours de la semaine où cet IRIS est collecté
wasteAmounts	double[10]	Quantités courantes des 6 types de déchets stockés
wasCollected	boolean[4]	Tableau de booléens qualifiant si le camion de collecte a pu ramasser tous les déchets de chaque type
relevantTreatment	String	Nom de l'unité de traitement où sont déposés préférentiellement les déchets (Unité de rattachement)

2.3. DESCRIPTION DU STATECHART

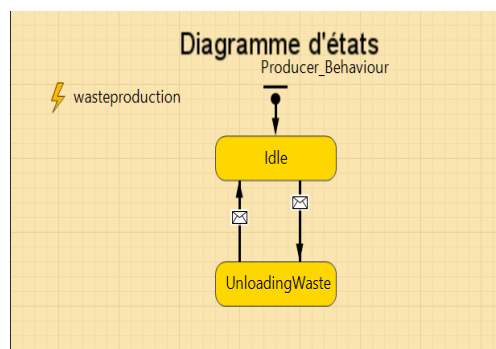


Figure 5 : Statechart de la classe Producer

Les instances de cette classe possèdent actuellement deux états (cf. Figure 5) :

- « **Available** » : l'unité possède encore de la capacité pour traiter des déchets organiques et fonctionne de manière régulière : elle accueille les camions de collecte pour qu'ils y déposent leur contenu et les camions de distribution pour qu'ils livrent les commandes ;
- « **Unavailable** » : une fois sa capacité de traitement annuelle atteinte, la station est saturée et envoie un message à tous les camions de collecte qui s'y dirigent pour les faire se rediriger vers des unités encore non saturées. Cette unité ne sera plus disponible pour le dépôt de déchets organiques jusqu'à ce qu'un ensemble d'unités donné soit entièrement saturé (les unités du syndicat mixte, par défaut).

3. CLASSE (AGENT) COLLECTINGPLANNER

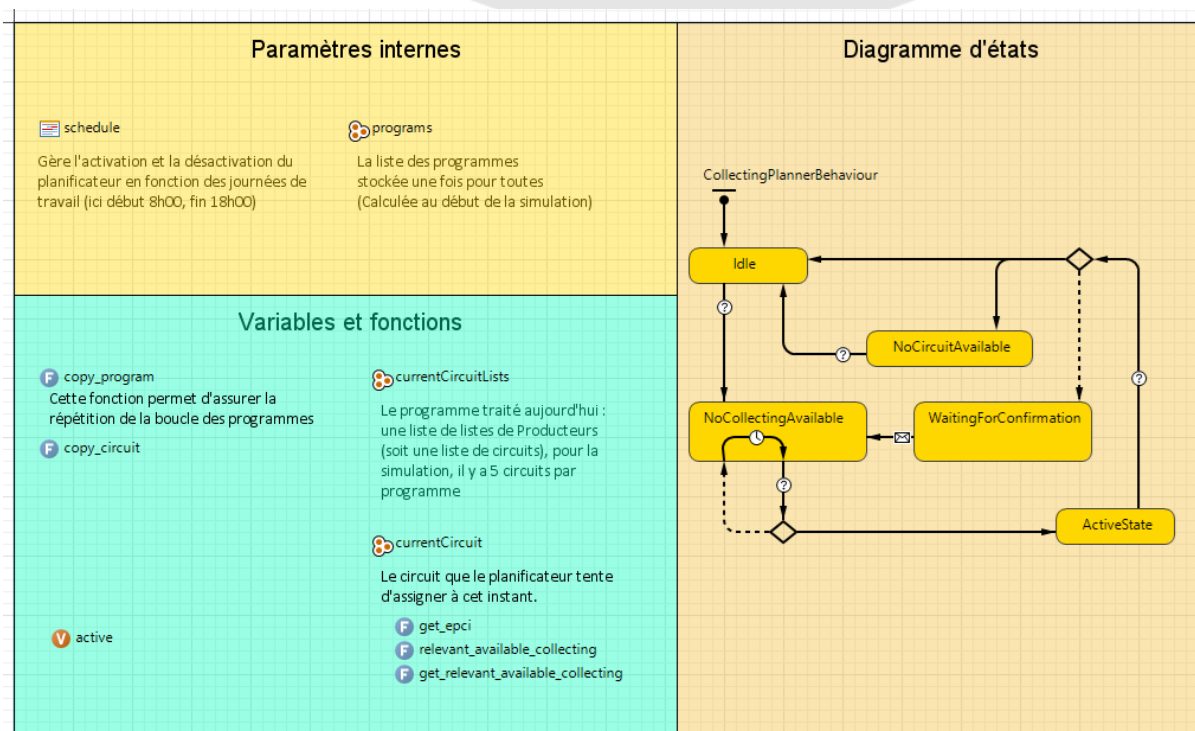


Figure 6 : Interface graphique de la classe CollectingPlanner

3.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

La classe *CollectingPlanner* permet de représenter les instances décisionnaires du système de collecte de déchets (cf. Figure 6). Dans le monde réel, ces instances consistent en une multitude d'acteurs, dans les communes, au sein des corps décisionnaires des EPCI et des syndicats mixtes. Nous avons choisi de modéliser ce système complexe en un agent unique, qui définit (au début du modèle) et distribue (chaque jour simulé) l'intégralité des circuits de collecte du modèle.

La méthode de définition des circuits de collecte est la suivante :

- Pour chaque jour J de la semaine, et pour chaque commune C, on liste l'ensemble des producteurs (IRIS) de la commune C collectés le jour J ;
- Cette liste est séparée en sous-listes comportant au plus 6 producteurs. Ces sous-listes représentent des missions (ou circuits de collecte) ;
- La liste des missions est ajoutée au programme du jour J.

3.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

Le Tableau 3 présente les attributs de la classe *CollectingPlanner* qui seront appliqués à chaque agent au sein de sa population.

Tableau 3 : Présentation des attributs de la classe CollectingPlanner

Variable	Type	Détails
schedule	Schedule	Objet Anylogic permettant de gérer l'emploi du temps d'un agent, de manière cyclique. Ici, le schedule active l'agent à 8h00 et le désactive à 18h00, tous les jours de la semaine, sauf le dimanche
active	boolean	Booléen qualifiant l'état actif de l'agent

programs	ArrayList<ArrayList<ArrayList<Producer>>>	Liste des programmes journaliers de collecte
currentCircuitLists	ArrayList<ArrayList<Producer>>	Programme journalier traité le jour courant du modèle. (Liste de circuits de collecte)
currentCircuit	ArrayList<Producer>>	Circuit traité actuellement par l'agent (Liste de producteurs)

3.3. DESCRIPTION DU STATECHART

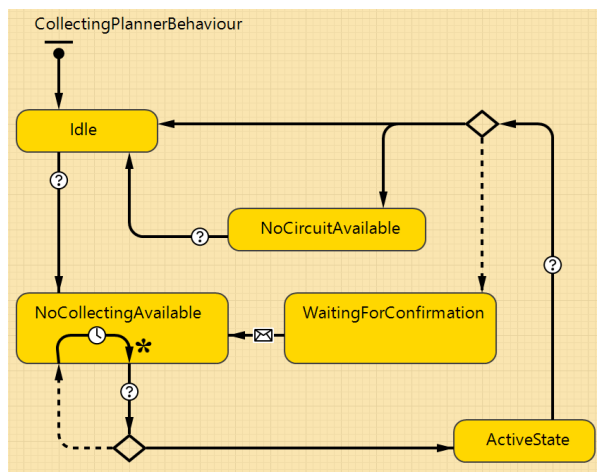


Figure 7: Diagramme d'états de la classe *CollectingPlanner*

La Figure 7 présente les différents états à travers lesquels une instance de la classe *CollectingPlanner* peut passer. Lors des horaires de travail, l'agent est activé et quitte l'état initial « **Idle** » pour entrer dans l'état « **NoCollectingAvailable** ». Dans cet état, il retire le premier circuit du programme journalier et cherche à le distribuer à un agent de type *Collecting*.

- S'il n'en trouve pas, il replace le circuit à la fin du programme journalier puis continue sa distribution.
- Sinon, il passe dans l'état « **ActiveState** » et détermine, parmi tous les camions adéquats (de l'EPCI ou du syndicat mixte, selon les options choisies), celui qui est le plus proche par la route du premier producteur du circuit. Il lui envoie un message avec le circuit en question en pièce jointe. S'il a encore des circuits à distribuer, il attend la confirmation de réception de l'agent (Etat « **WaitingForConfirmation** ») de type *Collecting* puis procède comme précédemment.

S'il n'y avait plus de circuits à distribuer ou si on a dépassé les horaires de travail¹, le *CollectingPlanner* sort de la boucle pour passer respectivement dans l'état « **NoCircuitAvailable** » (qui conduit à l'état « **Idle** » une fois la journée de travail finie) ou directement dans l'état « **Idle** » tout en notifiant l'utilisateur qu'il n'a pas eu le temps de tout distribuer.

¹ Dans le cas très improbable (jusqu'ici jamais rencontré) où l'on ne parvient pas à distribuer tous les circuits de la journée, cela implique que le *CollectingPlanner* boucle sur l'état « **NoCollectingAvailable** ». Dans Anylogic, l'agent qui entre dans un état n'évalue qu'une fois les conditions booléennes des transitions de sortie de cet état. Pour éviter d'y rester bloqué, l'agent réévalue à intervalle réguliers les possibilités de distribuer des circuits : c'est la transition interne marquée d'un astérisque qui permet cela.

4. CLASSE (AGENT) COLLECTING

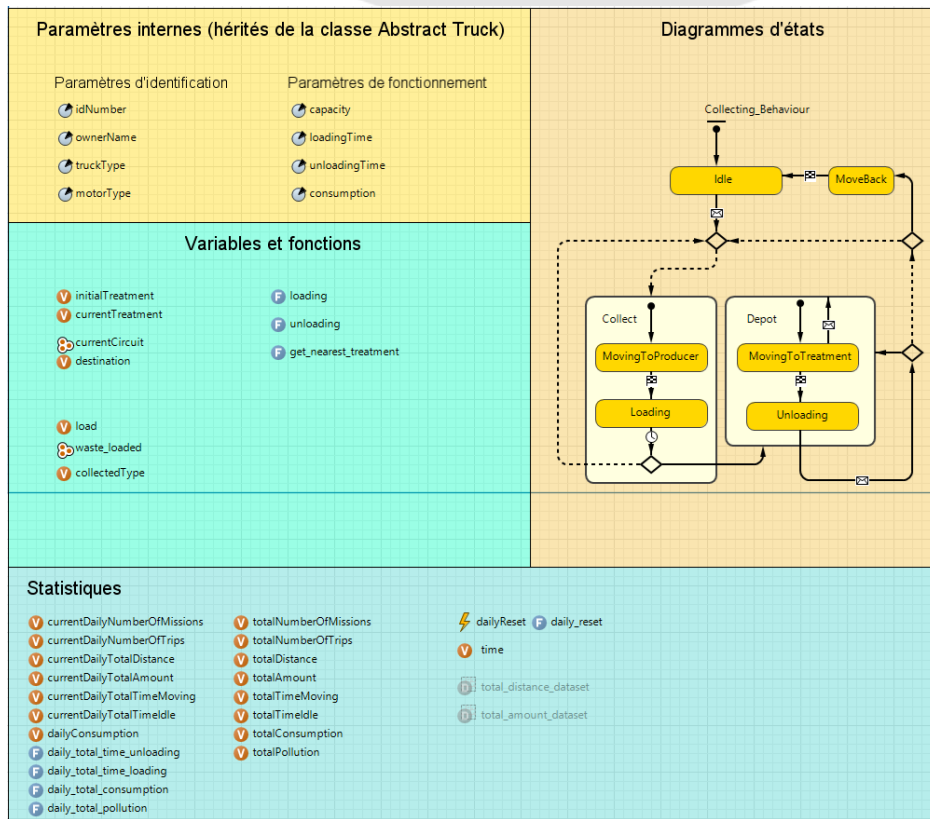


Figure 8 : Interface graphique de la classe Collecting

4.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

La classe *Collecting* représente les camions qui servent actuellement à la collecte des déchets sur l'île (cf. Figure 8). On considère deux types de camions, différenciés par leur capacité (BOM et mini-BOM). Entre deux missions, les camions sont stockés au niveau de leur unité de traitement de référence. La vitesse de déplacement des camions est fixée à 60km/h lors des phases de transport (entre deux IRIS et entre IRIS et Unité de traitement) et à 3 km/h lors des phases de collecte. Les déplacements se font toujours par le chemin « le plus rapide » entre deux points.

4.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

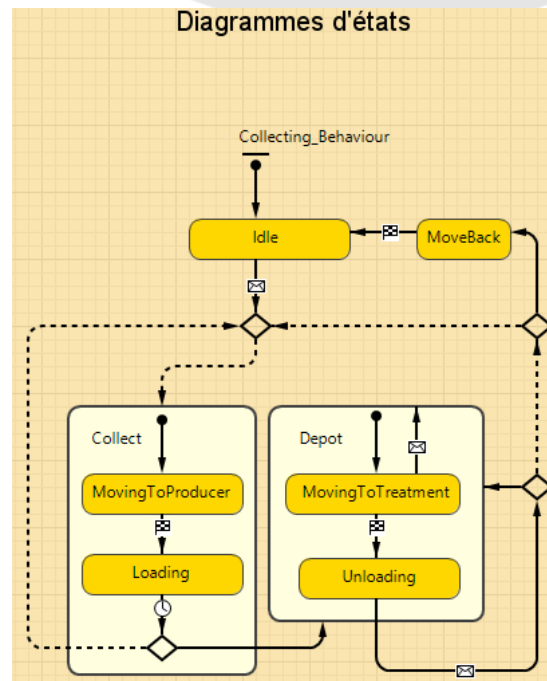
En dehors des attributs hérités de la classe *AbstractTruck* (Erreur ! Source du renvoi introuvable. (cf. II.2.2)), la classe *Collecting* présente les attributs suivants (cf. Tableau 4) .

Tableau 4 : Présentation des attributs propre à la classe *Collecting*

Variable	Type	Détails
Identification de l'agent		
idNumber	int	Numéro d'identification
ownerName	double	Nom de l'epci dont dépend l'agent
initialTreatment	Treatment	Unité de traitement de référence pour cet agent <i>Collecting</i> : le camion à l'état de repos est situé à cette unité de traitement et amène en priorité les déchets à cette station (sauf en cas de saturation).
Variables de fonctionnement		

currentCircuit	ArrayList<Producer>	Circuit que traite en ce moment l'instance <i>Collecting</i> . Il se réduit au fur et à mesure que les <i>Producer</i> sont visités.
destination	Producer	<i>Producer</i> traité en ce moment. Tant qu'il n'est pas vidé complètement, la variable <i>destination</i> ne change pas.
collectedType	int	Type de déchets collectés lors de la mission courante
currentTreatment	Treatment	Unité de traitement où l'agent <i>Collecting</i> va déposer les déchets qu'il transporte. Initialisée comme <i>initialTreatment</i> , cette variable change lorsque l'unité de référence est saturée et évolue alors de manière dynamique.
load	double	Quantité de déchets (en kg) transportée actuellement par l'agent <i>Collecting</i> (< <i>capacity</i>).
waste_loaded	ArrayList<Waste>	Liste des déchets transportés actuellement par l'agent. Permet de tracer les cartographies des flux
currentDailyNumberOfMissions/ totalNumberOfMissions	int	Nombre de missions données aujourd'hui/au total à cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
currentDailyNumberOfTrips/ totalNumberOfTrips	int	Nombre de déplacements effectués aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
currentDailyTotalDistance/ totalDistance	double	Distance parcourue (en m) aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
currentDailyTotalAmount/ totalAmount	double	Quantité de déchets (en kg) transportée aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
currentDailyTotalTimeMoving/ totalTimeMoving	double	Temps (en s) passé à se déplacer aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
currentDailyTotalTimeIdle/ totalTimeIdle	double	Temps (en s) passé dans l'état Idle aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
dailyConsumption/ totalConsumption	double	Consommation de carburant (en L) aujourd'hui/au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
totalPollution	double	Emissions de gaz à effet de serre (en kg eq CO ₂) au total par cette instance de la classe <i>Collecting</i> .
time	double	Variable tampon permettant de stocker un instant du modèle (permet d'effectuer les calculs de durée d'activité, de déplacement...)

4.3. DESCRIPTION DU STATECHART

Figure 9 : Statechart de la classe *Collecting*

La Figure 9 présente les différents états à travers lesquels une instance de la classe *Collecting* peut passer. L'agent *Collecting* est initialisé dans l'état « **Idle** », dans lequel il reste tant qu'il ne reçoit pas de missions de collecte de la part du *CollectingPlanner*. Au moment où il reçoit cette mission, il actualise ses variables *currentCircuit* et *destination* et se met en route vers *destination* (**Collect : « MovingToProducer »**).

Une fois arrivé à destination, il va charger (**Collect : « Loading »**) le maximum de déchets possible en fonction de sa capacité (*capacity-load*) disponible et du type de déchets ramassés. Deux cas peuvent alors se présenter :

- le camion n'est pas plein et poursuit son circuit ;
- le camion est plein ou le circuit est terminé, il faut alors passer à l'unité de traitement courante (*currentTreatment*) :

Le camion détermine (**Depot**) si sa station de référence est saturée puis :

- s'il y reste de la place, s'y dirige² et décharge les matières qu'il transporte (le maximum possible, dans la limite de saturation de la station) ;
- sinon, détermine quelle est la station la plus proche non saturée et va y décharger son chargement, dans les mêmes limites.

Après déchargement, le camion continue son circuit ou retourne à sa station de référence pour repasser dans l'état « **Idle** » et se rendre disponible pour d'éventuelles autres missions. Les risques de panne sont intégrés à ce moment du modèle : avant de passer dans l'état *Idle*, un test sur une variable aléatoire peut provoquer la panne de l'agent, qui est alors indisponible pour une durée prédéterminée.

² Dans le cas où un camion se dirige vers une station au moment où celle-ci entre en saturation, celui-ci va rediriger sa trajectoire après réception d'un message informatif.

5. CLASSE (AGENT) TREATMENT-LANDFILL

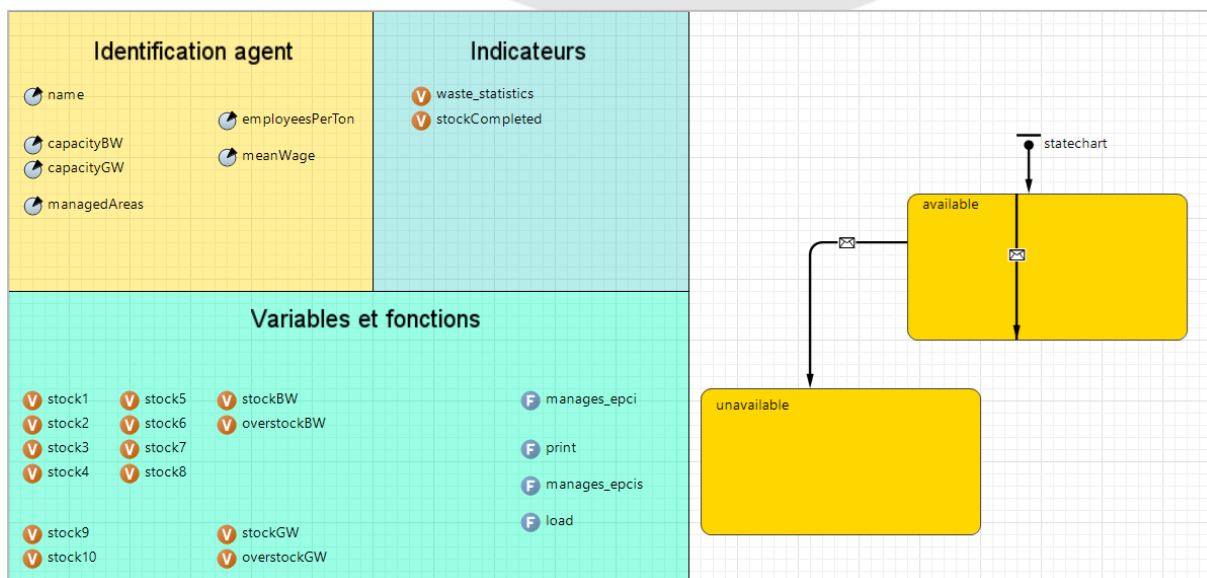


Figure 10 : Interface graphique de la classe *Treatment_landfill*

5.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

La classe *Treatment_landfill* permet de représenter toutes les Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND) existantes ou non, de manière à proposer des alternatives de placement des unités de traitement (cf. Figure 10).

5.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

La classe *Treatment_landfill* sert de classe « mère » aux classes *Composting* et *Methanation* qui héritent de l'intégralité des variables (cf. Tableau 5) et méthodes présentées dans la classe *Treatment_Landfill*.

Tableau 5 : Présentation des attributs de la classe *Treatment_Landfill*

Variable	Type	Détails
Identification de l'agent		
name	String	Nom de l'unité de traitement.
capacityBW	double	Capacité de traitement (en kg) annuelle de biodéchets.
capacityGW	double	Capacité de traitement (en kg) annuelle de déchets verts.
employeesPerTon	double	Nombre d'employé nécessaire au traitement d'une tonne de déchets.
meanWage	double	Salaire Moyen d'un employé.
Variables de fonctionnement		
stock1	double	Quantité de biodéchets ménagers (en kg) entrée sur le site.
stock2	double	Quantité de biodéchets de la restauration collective et des commerces (en kg) entrée sur le site.
stock3	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type amidonné (en kg) entrée sur le site.
stock4	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type produits végétaux stables (en kg) entrée sur le site.
stock5	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type graisses (en kg) entrée sur le site.

stock6	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type produits végétaux frais (en kg) entrée sur le site.
stock7	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type viande & poisson (en kg) entrée sur le site.
stock8	double	Quantité de biodéchets agro-industriels de type produits mixtes (en kg) entrée sur le site.
stockBW	double	Quantité de biodéchets (somme des stock 1 à 8) (en kg) entrée régulièrement sur le site depuis le début de la simulation.
stock9	double	Quantité de déchets verts azotés (en kg) entrée sur le site.
stock10	double	Quantité de déchets verts carbonés (en kg) entrée sur le site.
stockGW	double	Quantité de déchets verts (en kg) entrée régulièrement sur le site depuis le début de la simulation.
overstockBW	double	Quantité de biodéchets (en kg) entrée sur le site après saturation
overstockGW	double	Quantité de déchets verts (en kg) entrée sur le site après saturation
Fonctions		
manages_epci	boolean	Renvoi vrai si les EPCI dépendent de cette unité de traitement.
print	string	Renvoi le nom des EPCI dont dépends cette unité de traitement.
load		Fonction de chargement des déchets dans les stocks adaptés en entrée de site.
Indicateurs		
stockCompleted	Date	Date à partir de laquelle la capacité de la station d'enfouissement est atteinte.
waste_statistics	double [] []	Stocke les données sur l'origine et le type des déchets traités sur le site.

5.3. DESCRIPTION DU COMPORTEMENT

Les instances de cette classe possèdent actuellement deux états :

- « **Available** » : l'unité possède encore de la capacité pour traiter des déchets organiques et fonctionne de manière régulière : elle accueille les camions de collecte pour qu'ils y déposent leur contenu et les camions de distribution pour qu'ils livrent les commandes ;
- « **Unavailable** » : une fois sa capacité de traitement annuelle atteinte, la station est saturée et envoie un message à tous les camions de collecte qui s'y dirigent pour les détourner vers des unités non saturées. Cette unité ne sera plus disponible pour le dépôt de déchets organiques.

6. CLASSE (AGENT) COMPOSTINGPLANT

6.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

6.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

6.3. DESCRIPTION DU STATECHART

7. CLASSE (AGENT) METHANATIONPLANT

7.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

7.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

7.3. DESCRIPTION DU COMPORTEMENT

8. CLASSE (AGENT) FARMLAND

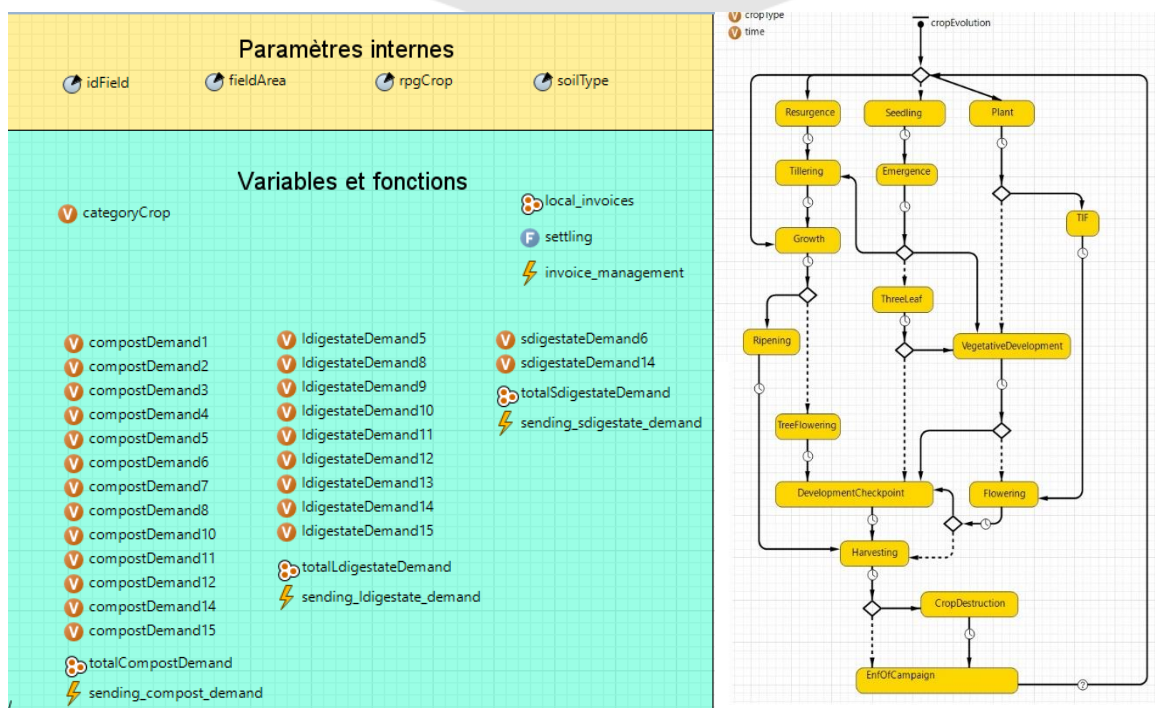


Figure 11 : Interface graphique de la classe farmland

8.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

La classe Farmland représente toutes les parcelles agricoles de l'île selon leur type de culture (cf. Figure 11).

Chaque parcelle agricole possède un type de sol et une culture type définissant le moment auquel elle a besoin de matières organiques, avec une quantité et une source de matière organique précise (digestats ou compost).

La culture en place va évoluer au cours du temps et changer d'état de développement. A un moment de développement donné, l'agent envoie une demande précise en matière organique.

8.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

Le Tableau 6 présente l'ensemble des variables propres à la classe Farmland et permettant le fonctionnement de chacune de ses instances.

Tableau 6 : Attributs de la classe Farmland

Variable	Type	Détails
Identification de l'agent		
idField	int	Numéro d'identification de la parcelle.
fieldArea	double	Surface de la parcelle (ha).
rpgCrop	string	Culture renseignée dans le RPG.
soilType	string	Nature du sol de la parcelle renseigné dans <i>Pédologie de la Réunion au 1/50000</i> selon M. Raunet – CIRAD (2016).
Variables de fonctionnement		
categoryCrop	int	Numéro d'identification de la culture en place pendant la campagne culturale en cours.

compostDemand1 (1 à 15)	double	Quantité de compost demandée pour les cultures de catégorie 1. Variable s identique pour les catégories jusqu'à la 15 ^{ième} .
ldigestateDemand5 (5 à 15)	double	Quantité de digestat liquide demandée pour les cultures de catégorie 5. Variable s identique pour les catégories jusqu'à la 15 ^{ième} .
sdigestateDemand6	double	Quantité de digestat solide demandée pour les cultures de catégorie 6. Variable s identique pour la catégorie 14.
totalCompostDemand	ArrayList	Collection qui stock l'ensemble des compostDemand. Se vide tous les jours pour envoyer des demande grâce à l'évent sending_compost_demand
totalLdigestateDemand	ArrayList	Collection qui stock l'ensemble des ldigestateDemande. Se vide tous les jours pour envoyer des demande grâce à l'évent sending_ldigestate_demand
totalSdigestatetDemand	ArrayList	Collection qui stock l'ensemble des sdigestateDemand. Se vide tous les jours pour envoyer des demande grâce à l'évent sending_sdigestate_demand
Local_invoices	ArrayList	Collection qui stock les objets invoice (facture).

8.3. DESCRIPTION DU STATECHART

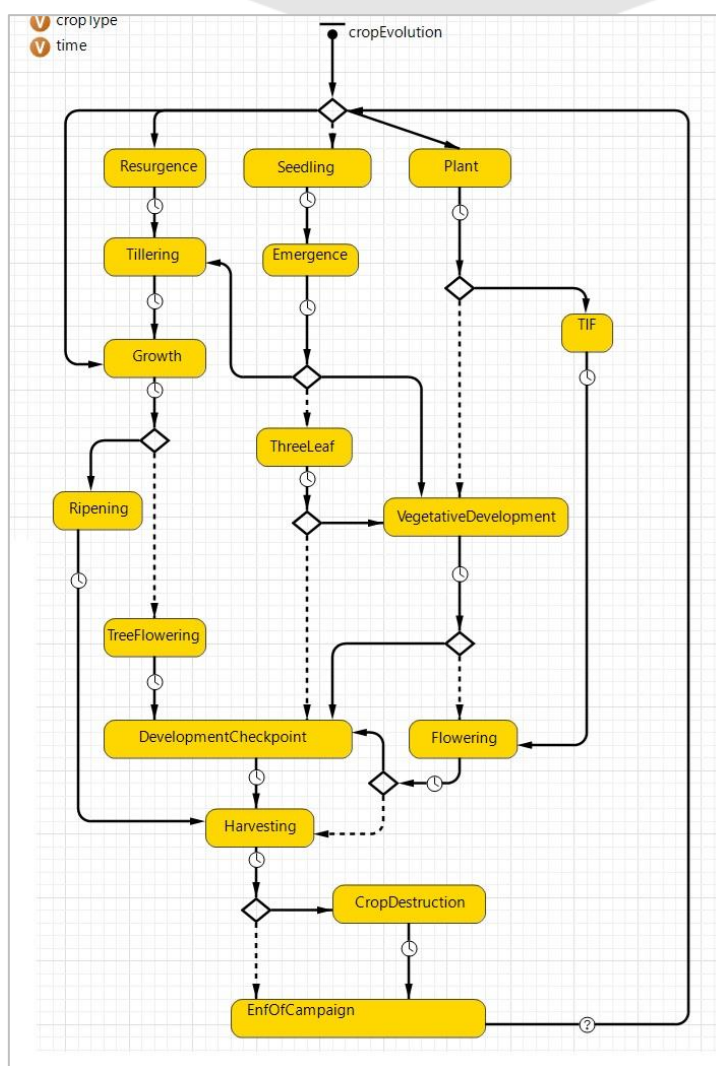


Figure 12 : Statechart de la classe Farmland

Evolution de l'état : Les agents évoluent dans le statechart (cf. Figure 12) en fonction de la durée de développement entre chaque état. Cette durée dépend de la catégories type assignée à la parcelle (cf. II.4.2). Une fois la totalité de leur cycle cultural effectué, l'état *NewCampaign* va soit faire évoluer la culture en année n+1 pour les cultures pluriannuelles (banane, ananas, canne à sucre), en année de repousse (verger) ou en une autre culture afin de mimer une rotation culturale (cultures maraichères). Par exemple, une parcelle de canne en plantation (catégorie 8) traverse les états : *Seedling*, *Emergence*, *Tillering*, *Growth*, *Ripening* *Harvest* et *NewCampaign*. Au moment de rentrer en *NewCampaign* la parcelle va évoluer en cannes à sucre en cours de repousse (catégorie 9).

Besoins en matière organique : Chaque agent envoie une demande de matière organique définies selon : un moment et une source de matières dépendant de la catégories type assignée à la parcelle, une quantité dépendant de la culture de la parcelle. (cf. II.4.3). Reprenons l'exemple d'une parcelle de canne à sucre en plantation : à l'initialisation la parcelle est en état *NewCampaign* et envoie donc une demande en compost adaptée selon la surface de la parcelle puis lorsqu'elle rentre dans l'état *Growth* elle envoie une demande de digestat liquide adaptée à la taille de sa parcelle.

9. CLASSE (AGENT) DELIVERYPLANNER

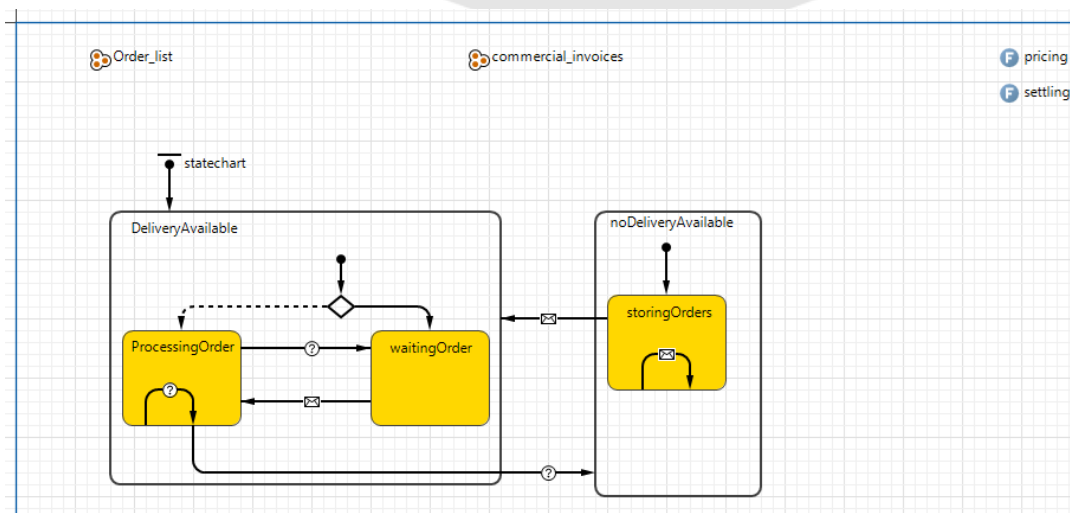


Figure 13 : Interface graphique de la classe DeliveryPlanner

9.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

Cette classe représente une entité hypothétique qui permettrait de gérer la distribution du compost créé à partir des biodéchets (cf. Figure 13). On l'a construite en miroir de l'entité *CollectingPlanner*.

9.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

Le Tableau 7 présente les attributs de la classe DeliveryPlanner.

Tableau 7 : Présentation des attributs de la classe DeliveryPlanner

Variable	Type	Détails
Order_list	ArrayList<Message>	Liste des commandes à traiter (stockées sous la forme des messages envoyés par les instances de la classe <i>Farmland</i>)
Commercial_invoices	ArrayList<Invoices>	Liste des commandes passées et traitées. Tient lieu de comptabilité.

9.3. DESCRIPTION DU STATECHART

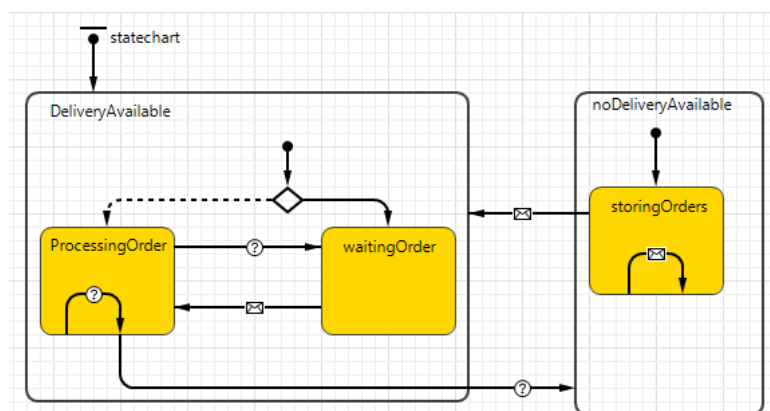


Figure 14 : Diagramme d'états de la classe DeliveryPlanner

La Figure 14 présente les différents états par lesquels les instances de la classe DeliveryPlanner peuvent passer. L'état de base de cet agent est « **waitingOrder** » : l'agent attend de recevoir une commande. A l'instant où il reçoit une commande, l'agent va la traiter dans l'état « **ProcessingOrder** » :

évaluer si des réserves suffisantes en compost sont disponibles, et si oui, émettre une facture avec un prix et donner un ordre de livraison à un camion *Delivery* disponible.

Tant qu'il a des commandes à traiter et des camions disponibles, il boucle dans cet état. S'il termine la liste de commandes, il repasse dans l'état « **waitingOrder** ». S'il n'y a plus de camions de livraison disponibles, il passe dans l'état « **storingOrders** » où il enregistre simplement les commandes au sein de la variable *Order_list*. Quand un camion *Delivery* se rend disponible, il lui émet un message qui lui permet de repasser directement dans l'état « **ProcessingOrder** », s'il a reçu des commandes dans l'entretemps.

10. CLASSE (AGENT) DELIVERY

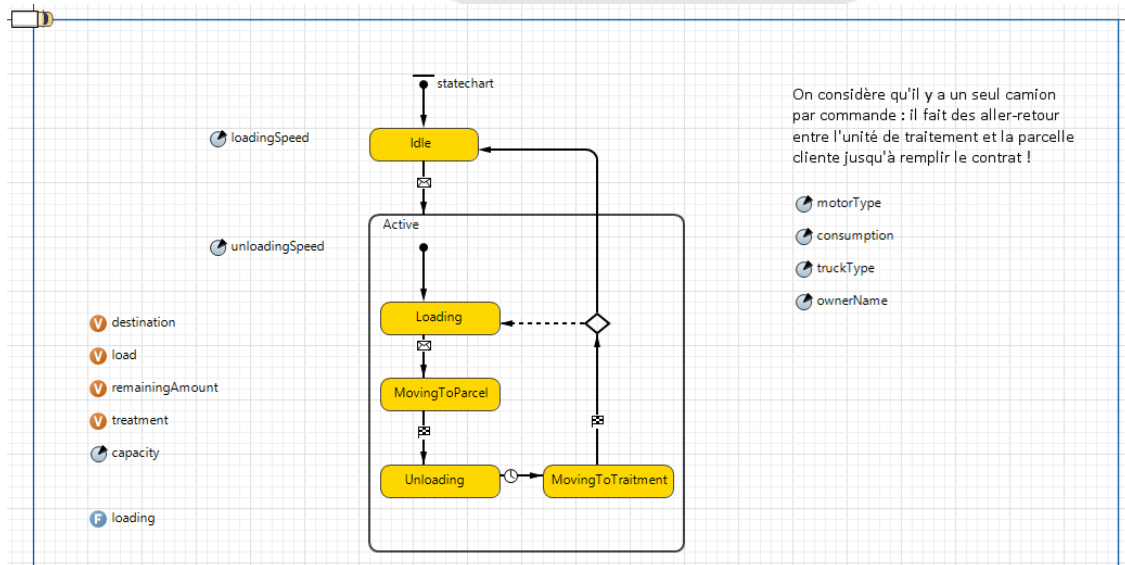


Figure 15 : Interface graphique de la classe Delivery

10.1. DESCRIPTION GENERALE ET CHOIX DE MODELISATION

Cette classe représente des camions de transport de marchandises agricoles, à capacité importante, propres à transporter du compost (cf. Figure 15).

10.2. DESCRIPTION DES ATTRIBUTS

En dehors des attributs hérités de la classe *AbstrakTruckErreur ! Source du renvoi introuvable.* (II.2.2), la classe présente les attributs suivants (cf. Tableau 8).

Tableau 8 : Présentation des attributs de la classe Delivery

Variable	Type	Détails
Identification de l'agent		
treatment	Treatment	Unité de traitement de référence pour cet agent <i>Delivery</i> : le camion à l'état de repos est situé à cette unité de traitement et distribue en priorité les déchets de cette station.
Variables de fonctionnement		
load	double	Quantité de déchets (en kg) transportée actuellement par l'agent <i>Delivery</i> (< <i>capacity</i>).
destination	Producer	<i>Farmland</i> traité en ce moment. Tant que la commande n'est pas entièrement satisfaite, la destination ne change pas.
remainingAmount	double	Quantité de compost restante à distribuer

10.3. DESCRIPTION DU COMPORTEMENT

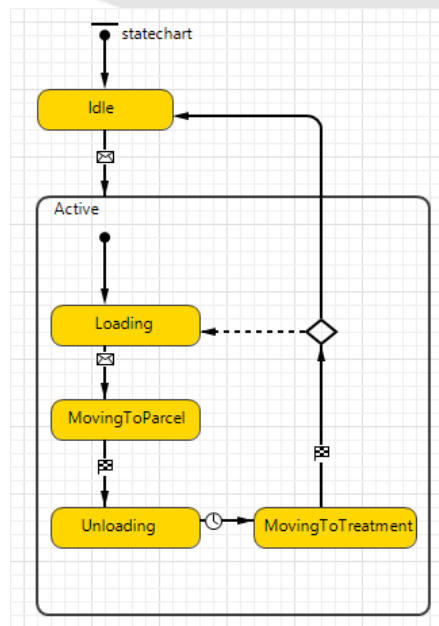


Figure 16 : Statechart de la classe Delivery

La Figure 16 présente le diagramme d'état de la classe *Delivery*. L'agent est initialisé à l'état « **Idle** », où il patiente jusqu'à ce qu'il reçoive un ordre de mission. A cet instant, il se charge d'une quantité de compost égale au maximum entre sa capacité et la quantité commandée (« **Loading** ») puis se met en route vers sa destination (« **MovingToParcel** »). Une fois arrivé, il se décharge de tout ce qu'il transporte (« **Unloading** ») puis se remet en route vers la station de traitement (« **MovingToTreatment** »). Une fois arrivé, soit la mission est remplie et il attend une nouvelle mission (« **Idle** »), soit il reste de la matière à livrer, et il repasse dans l'étape de chargement, en chargeant le maximum entre sa capacité et le reste à livrer (« **Loading** »).

II. DETAIL DU MODELE : CONSTRUCTION ET HYPOTHESES DE MODELISATION DES AGENTS

1. LES PRODUCTEURS DE BIODECHETS ET DECHETS VERTS

1.1. IDENTIFICATION DES PRODUCTEURS A LA REUNION

Les types de producteurs considérés dans PoVaBiA sont :

- Les ménages et collectivités ;
- Les établissements de restaurations collectives :
 - Scolaires ;
 - Medico-sociaux ;
 - Pénitenciers ;
 - Commerciales ;
- Les commerces alimentaires ;
 - De détail ;
 - De gros ;
- Les Grandes et Moyennes Surfaces (GMS) ;
- Les industries agro-alimentaires.

Le travail de récolte de données se fait auprès de 3 principales sources d'informations :

- la collecte de données auprès des acteurs eux-mêmes est privilégiée autant que possible. Cette méthode est utilisée principalement pour la restauration collective notamment des établissements scolaires de niveau collège et lycée ;
- les données récoltées grâce aux rapports 2017 des Services Publics d'Elimination des Déchets Ménagers (SPED) des différentes EPCI de l'île (CASUD, 2017) ;
- la collecte de données en open data pour les entreprises privées regroupant la restauration commerciale, les commerces de gros, de détails et les industries agro-alimentaires. La majorité des informations proviennent de la base Sirene : Fichier StockEtablissement 2019, publiée par l'Insee sur le site (Data.gouv, 2019). Les sites de référencement d'informations juridiques sur les entreprises societe.com (Societe.com, 2020) et manageo.fr (manageo.fr, 2020) ont également permis de récupérer de nombreuses données, notamment les effectifs de salariés.

Au total c'est 7131 établissements producteurs de biodéchets qui ont été identifiés (cf. Tableau 9).

Tableau 9 : Dénombrement des producteurs par gisements

Type de producteurs	Nombres identifiés
Commerce de produits alimentaires	1724
IAA (hors sucreries)	1002
Restauration collective	4405

Tous les producteurs non ménagés sont géolocalisés grâce à l'outil *MonGéocodeur* proposé par l'IGN (IGN, 2020) .

1.2. CALCUL DES GISEMENTS DE PRODUCTION

1.2.1 Par producteurs

Cette partie concerne les biodéchets de commerces alimentaires, des industries agro-alimentaires et de la restauration collective.

La quantité de biodéchets i produite par chaque producteur p est calculée suivant l'Équation 1.

Équation 1 : Méthode générale de l'estimation des gisements de biodéchets

$$ProdBO_i(p) = Vref_p * rb_i$$

$Vref_p$: valeur de la variable de référence propre à chaque type de producteur

rb_i : ratio de production de biodéchet par unité de la variable de référence

Les « variables de références » varient selon le type de gisement :

- **Effectifs d'habitants par IRIS** pour les biodéchets ménagers et les déchets verts,
- **Effectifs de salariés** pour les IAA et les commerces alimentaires,
- **Surface** pour les GMS,
- **Nombre de repas** servis pour la restauration collective scolaire, médicale et sociale et la restauration des hébergements touristiques,
- **Nombre d'exposants** pour les marchés forains.

Pour évaluer la totalité des biodéchets collectables, un ratio de mobilisation est utilisé. La méthode d'évaluation de ce ratio est inspirée de la méthode exposée dans *Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation*, (ADEME, 2013). Le ratio de mobilisation varie selon les types de producteurs et est décomposé selon les ratios suivants :

- **Le taux d'accessibilité** : part du gisement où la mise en place de mesure de collecte adaptées est envisageable ;
- **Le taux de participation** : part des producteurs dont les pratiques sont adaptées à la collecte envisagée ;
- **Le taux de tri** : part des producteurs effectuant le tri de leurs déchets de manière adéquates ;
- **Le taux de valorisation** : part des biodéchets des industries agro-alimentaires valorisé en co-produits dans d'autres secteurs d'activité.

Dans notre cas la collecte envisagée est une collecte en porte-à-porte, avec tri préalable et avec déconditionnement ultérieur (en station de traitement). Les taux utilisés sont issus des estimations d'ici à 2030 décrit dans le document de l'ADEME précité.

1.2.2 Par IRIS

Deux gisements sont calculés à l'échelle des IRIS : la FFOM et les déchets verts azotés et carbonés. La Figure 17 illustre la méthode utilisée pour quantifier ces gisements.

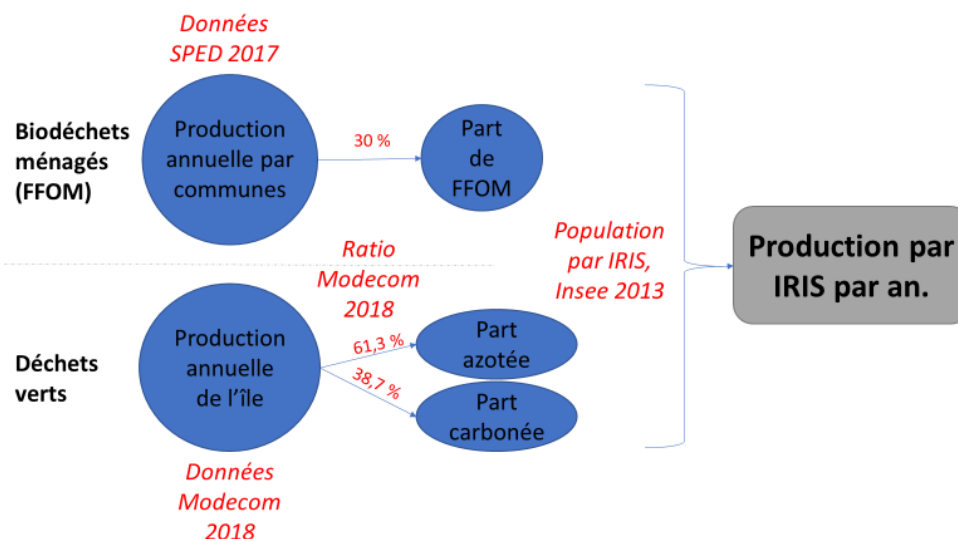


Figure 17 : Calcul de la production de déchets ménagers et déchets verts par IRIS

1.2.3 Compte-rendu des gisements

Les 10 gisements identifiés (cf. Tableau 10) produisent, selon notre base de données, 166 852 tonnes de biodéchets et déchets verts par an (cf. Figure 18 ; Tableau 11). La part collectable d'ici 2030 (cf. Figure 19) est estimée à 113 456 tonnes par an.

Tableau 10 : Présentation des différents gisements modélisés dans PoVaBiA

Code déchets	N°	Type
FFOM	1	Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères
Alim	2	Déchets de produits alimentaires issus de la restauration et des commerces
IAA 1	3	IAA produits amidonnés
IAA2	4	IAA produits végétaux stables
IAA3	5	IAA graisses végétales et HAU
IAA4	6	IAA produits végétaux frais
IAA5	7	IAA viande & poissons
IAA6	8	IAA lait et produits à base de lait
DVa	9	Déchets verts azotés
DVc	10	Déchets verts carbonés

Tableau 11 : Résultats de la quantification des gisements

Gisement	Production (t/an)
FFOM	53 220
Restauration collective	17 384
Commerces alimentaires	3 903
IAA	6 761
Total (1)	81 268
Déchets verts	85 584
Total (2)	166 852

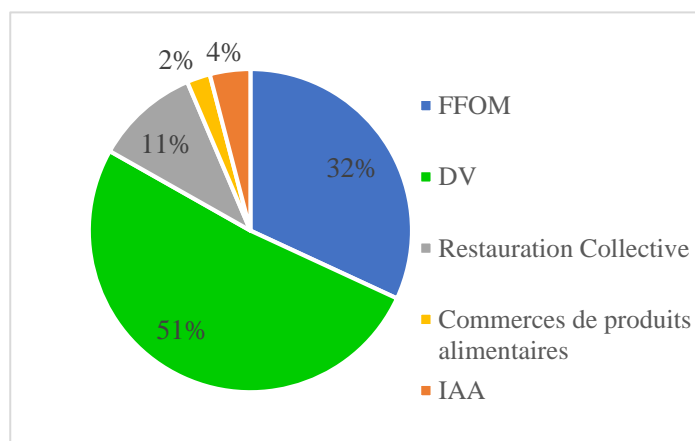


Figure 18 : Répartition de la production selon les gisements

Les principaux gisements identifiés sur la carte ci-dessous (cf. Figure 20) permettent :

- De comparer les données de production (gauche) et de part collectable (droite) ;
- De localiser les zones susceptibles d'accueillir les unités de transformations.

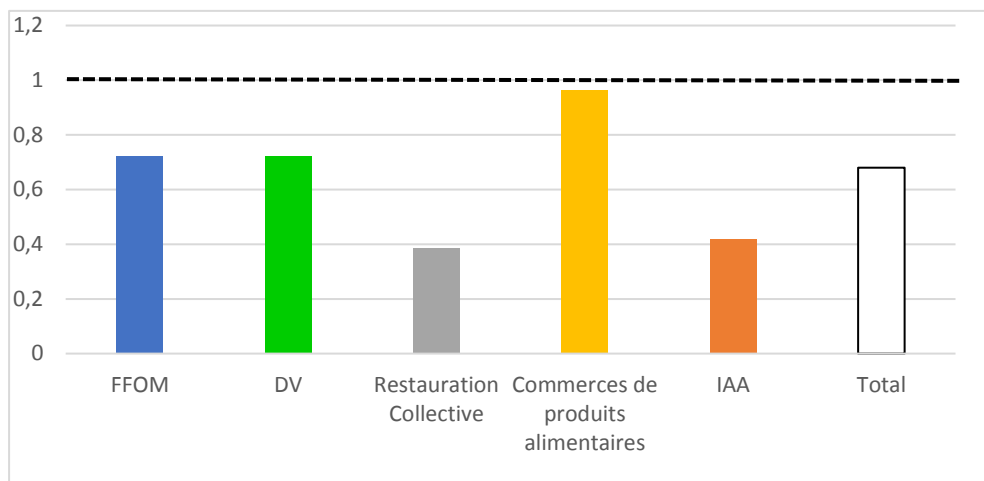


Figure 19: Ratio de la part collectable sur la production totale de biodéchets par gisement

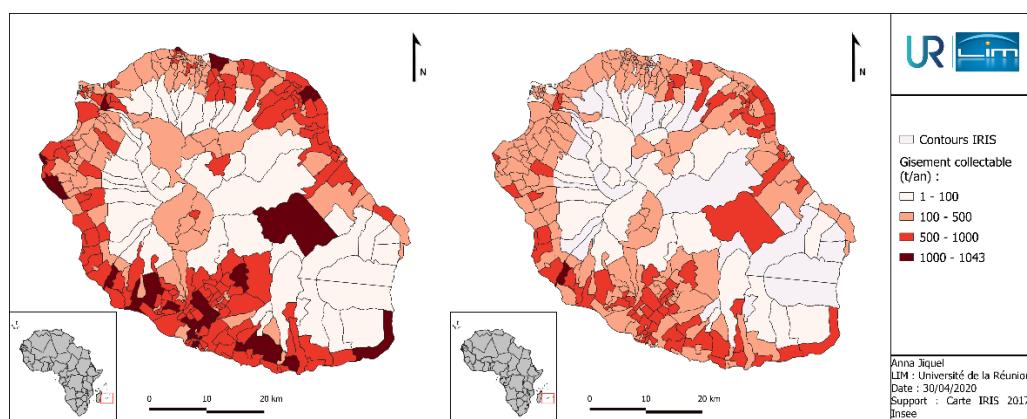


Figure 20 : Carte des gisements par IRIS de la production (à gauche) et de part collectable (à droite) des biodéchets et déchets verts à la Réunion

1.3. CARACTERISATION DES GISEMENTS

1.3.1 Choix des critères de qualités des déchets

La caractérisation des biodéchets est une étape importante pour la mise en place de filière de gestion des biodéchets. Définir les qualités des produits en entrée (cf. Tableau 12), c'est prévoir la production de biogaz dans les unités de méthanisation mais aussi la qualité des produits issus de la transformation (digestats & composts). Ce dernier point est essentiel afin de répondre aux besoins des agriculteurs de la Réunion.

Tableau 12 : Sélection des critères qualifiant les biodéchets et déchets verts

Critères	Sigle	Unité	Rôle
Matière sèche	MS	%MB	Technique : contrôle l'entrée en digestion.
Matière organique	MO	%MB	Amendement : rend compte de la richesse en carbone des produits transformés (composts et digestats).

Potentiel méthanogène	Met Pot	m ³ CH ₄ /tMB	Energie : permet de calculer la production d'énergie par unités de méthanisation.
Teneur en NPK	N, P, K	kg/tMB	Fertilisation : Définie la valeur agronomique des matières transformées (compost & digestats).
Ratio C/N	C/N	/	Technique : contrôle l'entrée en digestion.

*MB : matières brutes faisant référence aux biodéchets et déchets verts.

1.3.2 Méthode d'identification des qualités

Une synthèse bibliographique reprenant une cinquantaine de publications scientifiques à propos de la caractérisation des biodéchets a été faite. L'étude du contexte et une brève analyse statistique permettent d'attribuer des valeurs moyenne pour chacun des paramètres.

Seules les données sur les biodéchets non transformés sont relevées. Les études européennes et les études les plus récentes possibles sont privilégiées puisque la composition des biodéchets, surtout ménagers, varie selon la législation en place et les habitudes des populations propres à chaque pays (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

Les industries agro-alimentaires sont souvent spécialisées dans un type de production, ainsi leurs biodéchets ont des compositions très variables selon l'activité économique principale de l'établissement. Afin de communiquer sur la variabilité des types de biodéchets (31 codes APE référencés dans la base SIRENE 2019) et de garder un esprit de synthèse, nous avons distingué 5 groupes de biodéchets agro-industriels (*cf. PoVaBiA, 2020*).

1.3.3 Compte-rendu de la qualité des différents déchets

Le Tableau 13 : Résultats de la synthèse bibliographique sur la qualification des catégories de biodéchets

Tableau 13 : Résultats de la synthèse bibliographique sur la qualification des catégories de biodéchets

Déchets	MS (%MB)	MO (%MB)	MetPo (m ³ CH ₄ /tMB)	N (kg/tMB)	C/N	P (kg/tMB)	K (kg/tMB)	pH
FFOM	40	46	76	14	33	5	4	7,2
Restauration collective et biodéchets commerciaux	38	28	85	13	20	2	4	4,8
IAA1 – produits amidonnés	56	39	56	19	19	2	2	4,8
IAA2 – produits végétaux stables	84	79	75	9	37	6	2	6,5
IAA3 – graisses	91	89	75	20	120	4	5	4,6
IAA4 – produits végétaux frais	18	15	11	7	37	1	7	4,6
IAA5 – viande & poisson	27	23	16	17	1	4	1	4,8

IAA6 – produits mixtes	10	22	30	30	12	5	11	4,8
DV azotés	33	33	100	10	33	5	4	7,2
DV carbonés	46	60	100	17	33	5	4	7,2

2. LES TRANSPORTEURS

2.1. ORGANISATION DES FILIERES DE COLLECTE

A la Réunion, ce sont 5 Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) qui sont en charge de la gestion des déchets : la CINOR, la TCO, la CIVIS, la CASUD et la CIREST. Chaque EPCI possède sa propre flotte de véhicules capable d'effectuer la collecte des déchets. Pour optimiser les circuits de collecte, des organismes planificateurs étudient et organisent la collecte par les véhicules.

Afin de rendre plus accessibles les matières organiques produites dans les différentes unités de transformation, un système de livraison est modélisé. Ce système est basé sur une organisation similaire à la gestion de la collecte des biodéchets et déchets verts.

Dans le modèle PoVaBiA nous avons représenté d'une part les planificateurs par les classes *CollectingPlanner* et *DeliveryPlanner* et d'autre part les flottes de camions en charge du transport des matières par les classes *Collecting* et *Delivery*.

2.2. REPRESENTATION GENERALE DES CAMIONS

Afin de simplifier la modélisation une classe abstraite *AbstractTruck* est créée. Elle permet de représenter des camions dans leur forme la plus générale. Elle regroupe les paramètres communs (cf. Tableau 14) à toutes les classes instanciées représentant des camions : *Collecting* et *Delivery*.

Tableau 14 : Attributs de la classe *AbstractTruck* commun aux classes *Collecting* et *Delivery*

Variable	Type	Détails
idNumber	int	Numéro d'identification de l'instance
ownerName	String	Nom de l'epci dont dépend le camion
motorType	String	Calibrage du moteur (pour le calcul des consommations)
truckType	String	Nom de modèle du camion
capacity	double	Capacité (en kg) du camion
consumption	double	Consommation moyenne (en L/100km) du camion
loadingTime	double	Grandeur permettant de calculer le temps de chargement de matière. Si le camion est un objet de la classe <i>Collecting</i> , ce nombre représente une durée par km.
unloadingTime	double	Temps de déchargement de matière (dans l'unité de traitement ou sur le terrain agricole selon que l'agent est <i>Collecting</i> ou <i>Delivery</i>)
statistics	HashMap <String, ArrayList<Double>>	Table regroupant les statistiques du camion sur la simulation (nombre de missions, kilométrage, consommation...)

2.3. IDENTIFICATION DE LA FLOTTE PAR EPCI

Les camions utilisés pour la collecte des biodéchets sont appelés Bennes à Ordures Ménagères (BOM) et peuvent avoir des capacités variables :

- BOM : 12 t (Ouest-France, 2019);
- Mini BOM : 3,5 t (BM, 2019) ;
- Micro BOM : moins de 3,5 t.

Le nombre de véhicule par EPCI est calculé à partir des données fournies par le *SPED 2017* de la CIVIS. On néglige l'apport des camions de type Micro-BOM qui correspondent au plus à 3,4 % de la capacité de la flotte (CIVIS, 2017). On peut modéliser la flotte comme :

- 17 camions BOM ;

- 14 camions mini-BOM ($11^3+1^4+2^5$).

On a donc **31 camions** d'une capacité additionnée de 253 t, pour **48 809,4 t de déchets ramassés sur l'année**. On suppose que le ratio BOM/mini-BOM est constant selon l'EPCI.

CASUD

29138 t d'OMR ramassées en 2017 → **18.5 camions dont 10 BOM et 8 mini-BOM** (tronqué)

CIREST

33726 t d'OMR ramassées en 2017 → **21.4 camions dont 12 BOM et 9 mini-BOM** (tronqué)

CINOR

57246 t d'OMR ramassées en 2017 → **36.3 camions dont 20 BOM et 16 mini-BOM** (tronqué)

TCO

56424 t d'OMR ramassées en 2017 → **35.8 camions dont 19 BOM et 16 mini-BOM** (tronqué)

Cas particulier : la TCO indique le nombre de véhicules roulants réellement utilisés par le prestataire Nicollin OI : 36 (Nicollin, 2020) . Cette affirmation est en adéquation avec le résultat de l'estimation précédente et nous conforte dans la validité de la méthode. Pour se rapprocher de la réalité, on rajoute toutefois 1 BOM à la flotte de la TCO (soit 20 BOM et 16 mini-BOM finalement).

2.4. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DES VEHICULES

La valeur retenue pour la consommation des BOM classiques (26T) est donc de 68 L/ 100 km parcourus. On garde le facteur d'émission de CO₂ de 3.17 CO₂ eq par litre de carburant. (SUEZ, 2019)

En l'absence de données sur les mini-BOM, on estime au surplus la consommation et l'émission de GES équivalentes à celles du modèle classique.

³ Nombre attesté de camions mini-BOM.

⁴ Modélisation des Camions micro-BOM négligés.

⁵ Modélisation de la demi-unité de camion BOM tronquée.

3. LES UNITES DE TRANSFORMATION

Cette partie traite de la méthode et des hypothèses de modélisation considérée pour les classes *Methanation* et *Composting*.

3.1. LES RECETTES D'ENTREE

But : Etablir des recettes d'entrées précises permettra d'orienter les flux au sein du modèle et de dimensionner les unités de transformation. De plus, c'est un point essentiel de la filière afin d'assurer un bon recyclage organique des différents types de biodéchets et déchets verts

3.1.1 Les contraintes à respecter

La transformation de la matière organique est encadrée par à deux axes principaux :

- 1) les contraintes règlementaires concernant les types de substrats utilisables pour les différents types de traitements étudiés ;
- 2) les contraintes de procédés, portant sur les caractéristiques physico-chimiques des recettes en entrée.

Tableau 15 : Synthèse des substrats autorisés par type de traitements

Catégorie	Traitements demandés	Id déchets (cf. II.1.2)
1	Destruction	Exclu du projet
2	Stérilisation à 133°C pendant 20 minutes	IAA 5, IAA 6
3	Hygiénisation à 70°C pendant 1h	FFOM, Com_Alum, Res_Coll IAA 1, IAA 2, IAA 3, IAA 4
Déchet verts	Aucun	DVn, DVc

Tableau 16 : Conditions physico-chimiques des substrats en entrée

Méthanisation	Source	Compostage	Source
pH initial [6,5 -7]	(Expertise, 2007)	pH [5,5 ;8]	(Environnement, 2010)
C/N [10-30]		C/N [20 ; 35]	
MS > 35 %		MS [50-70 %]	

3.1.2 Les différents scénarios testés

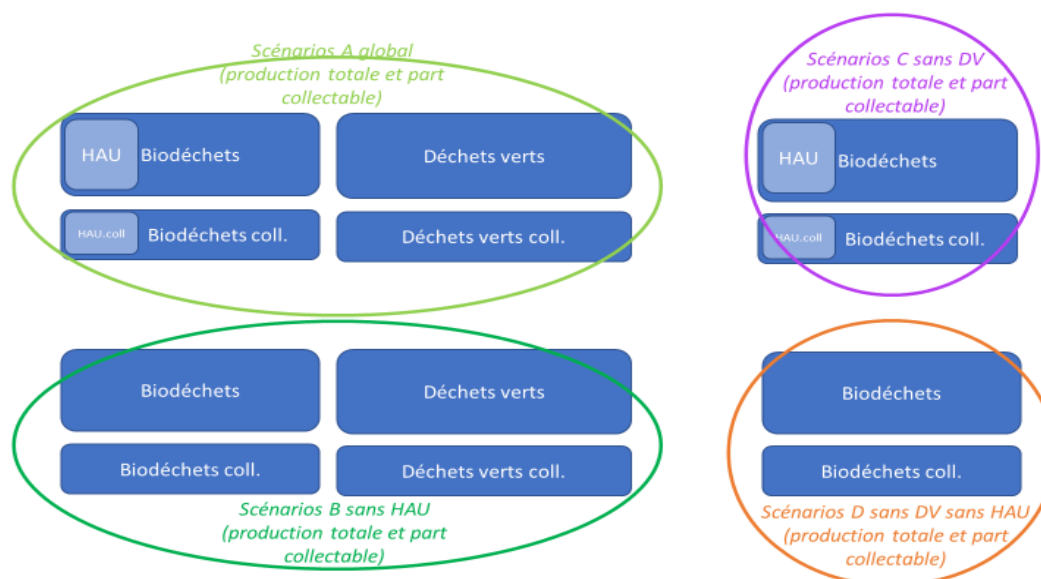


Figure 21 : Présentation des différents gisements envisageables (partie haute : gisement de production, partie basse : gisement collectable)

3.1.3 La recette sélectionnée

Nous estimons par le calcul les valeurs moyennes de pH, C/N et MS de différents mélanges de biodéchets et déchets verts.

Il apparaît que les recettes du scénario C et D ne sont pas compatibles avec les contraintes de procédés. Le scénario A est également difficilement applicable puisque la composition particulière des HAU fait augmenter de très significativement la variable C/N du substrat d'entrée.

Dans le scénario B, la recette permettant de répondre à la fois aux contraintes des traitements de méthanisation et de compostage a été identifiée : 50 % DV, 30% FFOM, 15% Alim et 5% IAA. Cette recette prend en compte la spécificité des biodéchets d'industries agro-alimentaires autorisée sans stérilisation préalable des biodéchets. Cette recette est applicable pour les gisements de production de déchets et pour la part collectable (cf. Figure 22 : Proportion des différents gisements Figure 22).

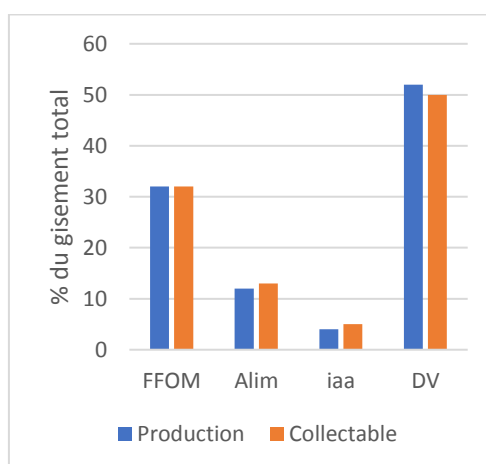


Figure 22 : Proportion des différents gisements

3.2. FONCTIONS DE TRANSFORMATION

But : formuler des équations simples représentant les variations de qualité entre les biodéchets et déchets verts en entrée d'unité de traitement et les matières organiques en sortie d'unité.

3.2.1 Méthode de travail

Afin de pouvoir calculer chacune des propriétés des digestats et des composts à partir des paramètres des déchets en entrées, nous avons mené une étude bibliographique dans deux buts :

- Relever des formules et des ratios déjà établis lors d'expérimentations ;
- Faire une synthèse des valeurs expérimentales de la bibliographie.

3.2.2 Les fonctions de transformation du modèle

3.2.2.1 *La méthanisation*

À la suite de la revue bibliographique, les variations de qualité des matières au cours de la méthanisation par voie sèche ont été clarifiées. Les résultats sont exprimés en % de perte par rapport aux teneur initiale des différents substrats (cf. Tableau 17).

Tableau 17 : Evolution de la matière au cours de la méthanisation

	FFOM	Alim.	DV	iaa1	iaa2	iaa3	iaa4	iaa5	iaa6	Sources
OM, Poids	-31%		-20%	-32%	-30%	-36%	-10%	-35%	-32%	(Carlos-Pinedo, 2020)
N	-									(Fisgativa, 2018)
Nacc	$-2,79 + 1,04 * Norg(s)$									
C/N	$(0,51*(MO -1)+0,48)/(N-Nacc)$									(Navaroo, 1992)
P	-									(Jakubus, 2016)
Pacc	70%									
K	-									
Kacc	100%									
pH	8	7,8								Moyenne de multiples source
	8,2									

3.2.2.2 *Le compostage*

À la suite de la revue bibliographique, les variations de qualité des matières au cours du compostage ont été clarifiées. Les résultats sont exprimés en % de perte par rapport aux teneur initiale des différents substrats (cf. Tableau 18).

Tableau 18 : Evolution de la matière au cours du compostage

	FFOM	Alim.	DV	iaa1	iaa2	iaa3	iaa4	iaa5	iaa6	Sources
OM, Poids	-40%									(Antil., 2011)
N	-36%	-57%	-20%	-57%						(Guardi, 2009).
Nacc	20%									Iglesis-Jimenez <i>et al.</i> , 1993
C/N	15									
P	-									Monika J., 2016
Pacc	15%									
K	-									
Kacc	100%									
pH		8,7	8,5							Moyenne de multiples source
	7,8									

3.2.2.3 La séparation de phase

La méthode de séparation de phase envisagée est la séparation de phase par centrifugation (cf. Tableau 19 : Répartition des qualités du digestat brut entre la phase liquide et la phase solide) (Drosg, 2015).

Tableau 19 : Répartition des qualités du digestat brut entre la phase liquide et la phase solide

Fonction de séparation de phase (liquide) (% digestat brut)	Poids	92
	DM	14
	OM	35
	N	75
	Nacc	80
	P	22
	K	93
Fonction de séparation de phase (solide) (% digestat brut)	Poids	8
	DM	86
	OM	65
	N	25
	Nacc	20
	P	78
	K	7

3.3. FONCTION DE PRODUCTION D'ENERGIE

But : générer une sortie du modèle permettant de transcrire l'énergie électrique produite par les biodéchets et déchets verts envoyés en méthanisation.

Le calcul présenté dans cette partie est inspiré du *Guide méthodologique de l'outil DIGES* (Cemagref, 2009).

La production de méthane (CH₄) peut être utilisée afin de générer de l'électricité. La production de méthane est estimée grâce au potentiel méthanogène de chaque substrats (PotMet).

L'électricité produite peut être décrite selon l'équation suivante :

Équation 2 : Production d'électricité (1)

$$\mathbf{Electricité = PotMet * Ep(CH_4) * Fv * Fc}$$

- PotMet : le potentiel méthanogène de chaque substrat (m³CH₄/kg MB)
- Ep (CH₄) : l'énergie primaire du CH₄ (kWh/m³), c'est-à-dire l'énergie dégagée lors de sa combustion. **Ep (CH₄) = 9,94 kWh/m³**
- Fv : facteur de valorisation du méthane (%). Dans notre cas on considère que 5% du biogaz est brûlé en torchère. **Fv = 95 %**
- Fc : facteur de conversion du méthane valorisé (%). Dans notre cas, nous modélisons une installation de production électrique. **Fc = 0,3.**

Équation 3 : Production d'électricité (2)

$$\mathbf{Electricité = PotMet * 2,8329}$$

4. LES CONSOMMATEURS DE MATIERES ORGANIQUES

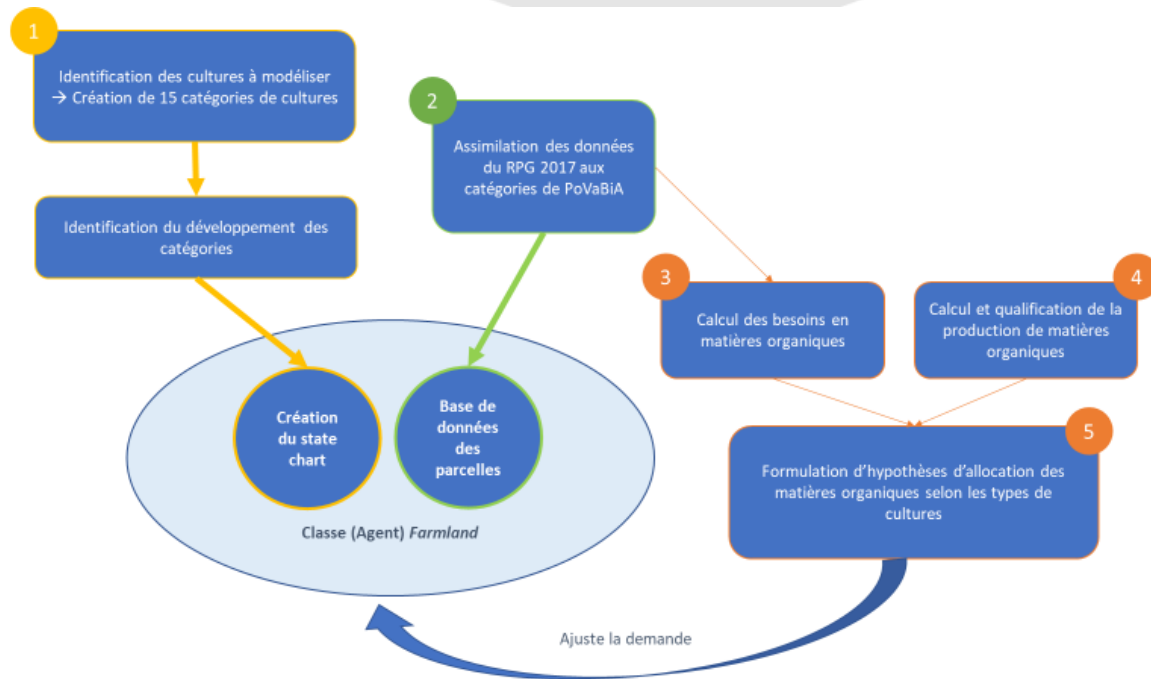


Figure 23 : Schéma de la construction de la classe (Agent) Farmland

4.1. CONSTRUCTION DU STATECHART

But : modélisation d'un statechart représentant les évolutions culturelles d'une parcelle agricole réunionnaise.

La méthode utilisée pour réunir toutes les hypothèses de modélisation est décrite en Figure 23.

4.1.1 L'identification des différents types de cultures

Le but de la modélisation est de simplifier les systèmes complexes observés, on fait donc le choix d'identifier les cultures les plus représentatives du territoire.

Un état des lieux de l'occupation des parcelles agricoles à la Réunion (*Registre Parcellaire Graphique (RPG)*, (data.gouv, 2017)) permet d'identifier les grands groupes de cultures :

- La canne à sucre avec plus de 26 000 ha cultivés à la Réunion ;
- Le maraîchage de plein champ avec 1000 ha cultivés ;
- Les vergers avec plus de 2700 ha cultivés ;
- La culture de l'ananas.

Pour pouvoir modéliser de manière fidèle le développement des parcelles en maraîchage et en arboricultures, des sous-groupes de cultures plus précis sont identifiés par la suite.

4.1.2 Les cultures maraîchères

4.1.2.1 Identification des cultures représentatives

Le maraîchage comprend de manière générale 7 sous-groupes majoritaires (fondation-bonduelle, 2018) :

- Les racines (Carotte, Pomme de terre, Navet, Patate Douce, Gingembre, Manioc, etc.),
- Les bulbes (Ail, Oignon, Echalote, etc.),
- Les tiges (Asperge, Cardon, etc.),

- Les légumineuses maraîchères (Pois chiche, Haricots, Fèves *etc.*),
- Les fleurs (Artichaut, Brocolis, *etc.*),
- Les feuilles (Bettes, Bred, Choux, Laitue, Mâche, Poireaux, *etc.*),
- Les fruits (Tomates, Courgettes, Concombre, Aubergine, Chouchou *etc.*).

Les cultures les plus représentées dans la Réunion sont les légumes racines, les bulbes, les légumineuses maraîchères, les légumes feuilles et les légumes fruits (SAINT MACARY H., 2002). Chacun de ces sous-groupes suis un schéma de développement culturel propre. Nous allons les modéliser état de développement par état de développement, puis nous allons les recouper afin de simplifier le statechart et d'éviter la redondance de certains états commun à différents sous-groupes (ex : semis, floraison, *etc.*).

La modélisation de chaque sous-groupe s'appuie sur une culture de ce sous-groupe répandue à la Réunion (SAINT MACARY H., 2002), c'est-à-dire :

- Les racines avec comme culture référente la pomme de terre,
- Les bulbes avec comme culture référente l'oignon,
- Les légumineuses avec comme culture référente le haricot,
- Les feuilles avec comme culture référente la laitue,
- Les fruits avec comme culture référente la tomate.

4.1.2.2 Etats de développement et temps de transition

Les principaux états de développement de ces cultures sont répertoriés et classifiés dans les échelles BBCH disponibles sur le site de la compagnie Syngenta (Syngenta, 2015) Nous avons pu identifier les états communs aux différentes cultures pour constituer le statechart.

Les transitions d'un état à un autre sont modélisées par des durées en jour, mimant la croissance des cultures. Les durées identifiées ont fait l'objet d'une synthèse bibliographique (*cf.* Tableau 20). Les parcelles en agricultures biologiques ne pouvant pas utiliser des engrais chimiques de synthèse (Agriculture.gouv., 2008) elles sont de grandes consommatrices potentielles de matières organiques. C'est pour cela que nous avons choisis de sélectionner les besoins des cultures en agriculture biologique.

Tableau 20 : Sources bibliographiques utilisées pour identifier les cycles de production et les temps de transition des cultures maraîchères modélisées

Culture	Source principale	Contexte
Laitue	(Agribio, 2010)	Bretagne, culture d'été
Oignon	(LCPBio, 2013)	Métropole, cultures précoce
Haricots	(CDDR.SAILD, 2016)	Nord Cameroun
Pomme de terre	(LCPBio, 2011)	Métropole, variété Ditta (précoce)
Tomates	(GRAB, 2012)	Région PACA

L'ensemble des temps de transitions sont répertoriés dans des fichiers Excel reliés au statechart et qui permettent son fonctionnement (*cf.* Données en entrées du modèle : *Parcel agent.xls*).

4.1.3 La culture d'ananas

La culture d'ananas est menée à la Réunion avec la pratique du TIF (l'induction florale forcée). Cette pratique dicte le moment de l'apport de matières fertilisantes, de floraison et donc de récolte. Les principaux stades de la culture de l'ananas sont : la plantation, le TIF, la floraison, la récolte et la destruction.

Les temps de transitions ont été établis grâce aux expérimentations et suivis du CIRAD de Mayotte/la Réunion sur l'ananas Victoria (CIRAD, 2015).

Le document apporte aussi des informations importantes quant à la modélisation des cultures puisque des différences de temps de développement sont remarqués selon l'altitude de la parcelle cultivée. Notre choix a été de délimiter l'altitude entre les zones cultivées inférieures ou supérieures à 200 m d'altitude.

4.1.4 La culture de canne à sucre

La culture de la canne à sucre est pluriannuelle, le tronçon de canne planté en première année va repousser tous les ans après la récolte pour donner une nouvelle canne. La durée conseillée entre deux replantations des tronçons de canne est de 5 à 7 ans.

Pour les besoins de fonctionnement de notre modèle sur AnyLogic, l'ensemble des états cultureux des différentes cultures sont intégrés à un unique statechart. La plantation des tronçons de canne est considérée comme l'état *Seedling*.

Le guide de la fertilisation de la Canne à sucre à la Réunion (Chabalier, 2007) permet d'identifier clairement les méthodes culturales de la canne à sucre à la Réunion et ainsi d'intégrer au modèle des temps de transitions entre état adaptés au contexte local.

4.1.5 L'arboriculture

4.1.5.1 *Identification des cultures représentatives*

D'après le document *La production fruitière à la Réunion* (DAAF, 1014) les principales cultures fruitières issues de l'arboriculture sont :

- les letchis
- les bananes (culture semi-permanente)
- les mangues
- les agrumes (mandariniers et ses hybrides, Pamplemousse, orangers et ses hybrides, Citrons, Lime, Combava *etc.*) Pour modéliser la culture d'agrumes nous avons choisi l'oranger qui représente avec ses hybrides 112 ha (DRAAF, 2010).

4.1.5.2 Etats de développement et temps de transition

A ce stade du projet, nous considérons toutes les cultures comme en phase de production. Nous ajusterons ce développement grâce à des dire d'experts. Les cultures en vergers passent donc par les états : repousses, floraison, nouaison (development checkpoint), récolte et taille (effectuée après la récolte) et suivent les temps de transitions identifiés grâce aux recherches bibliographiques effectuées (*cf.* Tableau 21).

Tableau 21 : Bibliographie utilisée pour identifier le cycle cultural et les temps de transitions des cultures en verger

Culture	Source principale	Contexte
Letchi	(Province Sud, 2005)	Nouvelle- Calédonie
Manguier	(CIRAD, Guide de Production Intégrée de Mangues à la Réunion., 2009)	La Réunion
Bananier	(CIRAD, Guide Technique pour la production de bananes, 2009)	Guyane Française
Agrume (oranger)	(CIRAD, La culture des agrumes à l'île de la Réunion., 1993)	La Réunion

La recherche bibliographique a permis d'identifier des facteurs influençant la culture selon l'altitude (agrumes) ou l'âge des cultures (bananiers). Ils font l'objet de cas particuliers dans notre modèle.

Pour faire fonctionner l'agent *Farmland* il est important d'établir des règles de transition entre les différents types de culture.

Ces choix cultureux seront identifiés clairement à l'aide des entretiens avec des acteurs agricoles ou des experts. En l'état actuel, les vergers ne changent pas de culture, en revanche un producteur de

cultures maraîchères peut se mettre à produire de la canne à sucre et inversement. En effet le système de cultures basé sur la rotation canne à sucre/ananas est répandue à la Réunion.

Le statechart modélisé dans AnyLogic est conceptualisé en Figure 24.

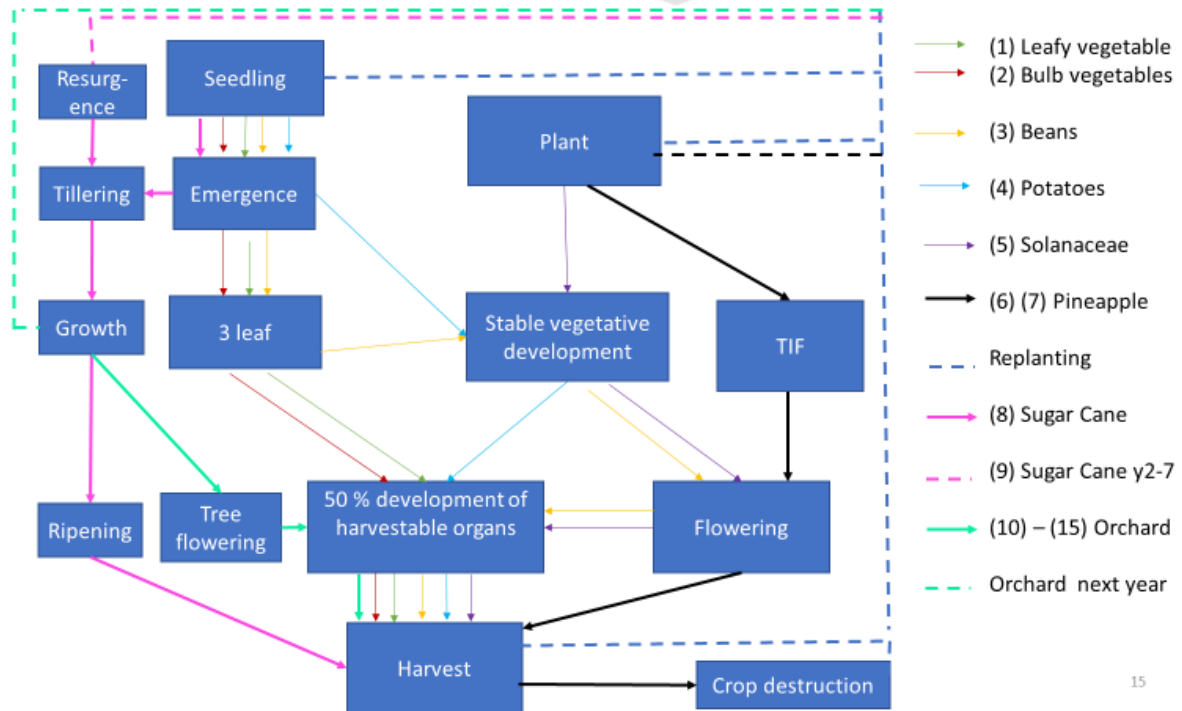


Figure 24 : Schéma conceptuel du state chart de la classe Farmland et représentation des stades cultureux des 15 catégories modélisées

4.2. INTEGRATION DES DONNEES DU RPG 2017

But : regrouper les cultures présentées dans le RPG dans les catégories type de notre modèle.

Voici pour rappel, en Tableau 22, la liste des catégories types de cultures modélisées dans PoVaBiA.

Tableau 22 : Les cultures types dans PoVaBiA

Famille	N° catégorie	Catégorie type de PoVaBiA
Maraîchage	1	Leafy Veg
	2	Bulb Veg
	3	Legums
	4	Potatoes
	5	Solanaceae
Ananas	6	Pineapple (y1-2) <200m
	61	Pineapple (y3) <200m
	7	Pineapple(y1-2) >200m
	71	Pineapple(y3) >200m
Canne à sucre	8	Sugar cane (y1)
	9	SugarCane (y2-y7)
Vergers	10	Litchi
	11	Mango
	12	Banana (y1)
	13	Banana (y2-y5)
	14	Citrus <400 m
	15	Citrus >400 m

Afin d'identifier les cultures en place sur les parcelles agricoles réunionnaises, nous utilisons le Registre Parcellaire Graphique (RPG) 2017 (data.gouv, 2017). Ce document est un système d'information géographique produit par l'Institut Géographique National (IGN) mis à jour annuellement. Il contient entre autres la localisation des parcelles agricoles et des données sur l'occupation du sol. L'occupation du sol correspond aux cultures déclarées par les exploitants agricoles.

Nous sélectionnons dans le RPG 2017, les groupes contenant les vergers (code groupe 20), la cannes à sucre (code groupe 26) et les légumes ou fleurs (code groupe 25). Le Tableau 23 présentent l'ensemble des cultures de ces 3 groupes et leur répartition au sein des catégories modélisées dans PoVaBiA Nous détaillerons ensuite quelles hypothèses nous avons formulé pour faire cette répartition.

Certaines cultures sont exclues de notre projet :

- Les cultures horticoles (HPC, HSA) et de Géranium (GER) : PoVaBiA ne considère que les cultures alimentaires ;
- Les cultures hors-sols (CSS) : elles ne peuvent pas bénéficier des matières organiques produites ;
- Les cultures d'avocats (AVO): culture mineure (4,92 ha) et à contre-saison des cultures types modélisées (pic de production Mars-Avril) rendant difficile sa modélisation.

Tableau 23 : Les cultures sélectionnées dans le RPG 2017

Données du RPG			Adaptation à PoVaBiA	
Code groupe	Code culture	Nom culture	N° catégorie	Catégorie(s) type(s) de PoVaBiA
20	AGR	Agrume	14 ; 15	Citrus
25	AIL	Ail	2	Bulb Veg.
20	ANA	Ananas	6 ; 61 ; 7 ; 71	Pineapples
25	ART	Artichaut	5	Solanaceae
25	AUB	Aubergine	5	Solanaceae
20	AVO	Avocat	/	/
20	BCA	Banane créole (fruit et légume) - autre	11 ; 12	Bananas
20	BCF	Banane créole (fruit et légume) - fermage		
20	BCI	Banane créole (fruit et légume) - indivision		
20	BCP	Banane créole (fruit et légume) - propriété ou faire valoir direct		
20	BEF	Banane export - fermage		
20	CAC	Café / Cacao	11	Mango
25	CAR	Carotte	4	Potatoes
25	CCN	Concombre / Cornichon	5	Solanaceae
25	CCT	Courgette / Citrouille		
25	CHU	Chou	1	Leafy Veg.
25	CMB	Courge musquée / Butternut	5	Solanaceae
26	CSA	Canne à sucre - autre	8 ; 9	Sugar cane
26	CSF	Canne à sucre - fermage		
26	CSI	Canne à sucre - indivision		
26	CSP	Canne à sucre - propriété ou faire valoir direct		
25	CSS	Culture sous serre hors sol	/	/
25	FLA	Autre légume ou fruit annuel	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5	Leafy ; Bulb ; Legums ; Potatoes ; Solanaceae
25	FLP	Autre légume ou fruit pérenne	1 ; 2 ; 3 ; 5	Leafy ; Bulb ; Legums ; Solanaceae
25	FRA	Fraise	5	Solanaceae

25	GER	Géranium	/	/
25	HAR	Haricot / Flageolet	3	Legums
25	HPC	Horticulture ornementale de plein champ	/	/
25	HSA	Horticulture ornementale sous abri	/	/
25	LBF	Laitue / Batavia / Feuille de chêne	1	Leafy Veg.
25	LSA	Légume sous abri	5	Solanaceae
25	OIG	Oignon / Échalote	2	Bulb Veg.
25	PAS	Pastèque	5	Solanaceae
25	PFR	Petit fruit rouge		
25	POR	Poireau	2	Bulb Veg.
25	PTC	Poivron / Piment	5	Solanaceae
25	PVP	Pomme de terre de consommation	4	Potatoes
25	TOM	Tomate	5	Solanaceae
20	VGD	Verger	10 ; 11	Letchi ; MAngo
20	VRG	Verger (DOM)		

Voici les hypothèses de travail permettant de répartir les cultures du RPG entre les catégories modélisées dans PoVaBiA :

- Pour les cultures annuelles (AIL, ART, AUB, CAR, CCN, CTT, CHU, CMB, FRA, HAR, LBF, OIG, PAS, PFR, POR, PTC, PVP, TOM) la catégorie associée est celle qui est de la même famille botanique ou qui s'en rapproche le plus.
- Pour les cultures « Autre légume ou fruit annuel » (FLA) les parcelles sont réparties de manière aléatoire et égale entre les catégories 1, 2, 3, 4 et 5.
- Pour les cultures « Autre légume ou fruit pérenne » (FLP) les parcelles sont réparties de manière aléatoire entre les catégories 1, 2, 3, 5.
- Pour les cultures sous abris (CSA) les parcelles sont attribuées à la catégorie 5. Cette hypothèse est formulée puisque les cultures sous serre à la Réunion (Armefflor, 2010) sont principalement les tomates, les fraises, les melons et les courgettes.
- Pour les catégories du modèle dont le cycle de développement dépend de l'altitude (6, 7, 14 et 15) nous avons pu sélectionner les parcelles selon leur position géographique grâce à l'outil de cartographie QGIS. (CIRAD, Carte : Courbes de niveaux par pas de 10m – Région Réunion., 2020)
- Pour les cultures pluriannuelles (BCA, BCF, BCI, BCP, BEF, CSA, CSF, CSI, CSF) le nombre de parcelles en cours de plantation est proportionnel à la durée du cycle de plantation, à la durée du cycle total et au nombre de parcelles allouées à cette culture.

Afin de sélectionner de « manière aléatoire » les parcelles du groupe FLA et FLP ou les parcelles en année de plantation des cultures pluriannuelles, nous procédons à une sélection aléatoire par tirage au sort dans notre tableur. Lors de cette sélection, nous respectons les proportions présentées dans le Tableau 24 en accord avec les hypothèses de travail décrites. Les résultats de cette répartition sont présentés en

Tableau 25.

La répartition globale des cultures renseignée dans le RPG au sein des catégories de PoVaBiA est illustré en Figure 25.

Par exemple pour les bananiers, sachant que la durée du cycle modélisée est de 5 ans ce qui représente 1823 jours dont 360 jours en année de plantation et qu'il y a 401 parcelles allouées à cette culture d'après le RPG on peut estimer le nombre de parcelles en cours de plantation.

Nombre de parcelle en année de plantation = (Durée du cycle de plantation/ Durée totale de la culture) * Nombre de parcelles

Ici : $(360/1823) * 401 = 79$

On considère que 79 parcelles sont en cours de campagne de plantation et 322 parcelles sont

Tableau 24 : Proportions respectées pour la répartition aléatoire des parcelles

Code culture	N° catégories	Part (%)	Source & hypothèse
FLA	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5	20	Hypothèse : répartition égale puisque les cultures qui pourraient être prépondérantes (Pomme de Terre, Tomates <i>etc.</i>) sont déjà identifiées dans des catégories du RPG.
FLP	1 ; 2 ; 3 ; 5	25	Hypothèse : répartition égale entre les légumes type bréde, gingembre, pouds d'angole mais aussi chouchou, <i>etc.</i>
VRG et VGD	10	60	(DRAAF, 2010)
	11	40	

Tableau 25 : Présentation des résultats de répartition des cultures du RPG dans les catégories types de notre modèle

N° catégorie modèle	Nom catégorie modèle	Code RPG associé	Nombre de parcelles		Surface (ha)	% de SAU
1	Leafy Veg	CHU, LBF, POR, FLA, FLP	415		245	6
2	Bulb Veg	AIL, OIG, FLA, FLP	416		245	
3	Legums	HAR, FLA, FLP	417		240	
4	Potatoes	PTC, CAR, FLA	414		267	
5	Solanaceae	ART, FRA, AUB, CCN, CCT, CMB, PVP, TOM, LSA, FLA, FLP	790		337	1
6	Pineapple (y1-2) <200m	ANA	60	38	62	
61	Pineapple (y3) <200m			22	20	
7	Pineapple(y1-2) >200m		252	162	139	
71	Pineapple(y3) >200m			90	83	
8	Sugar cane (y1)		CSA, CSF, CSI, CSP	8528	1437	3 547
9	SugarCane (y2-y7)	7091			17 739	
10	Litchi	VER	525		505	5
11	Mango	VER, CAC	400		345	
12	Banana (y1)	BCA, BCF, BCI, BCP, BEF	72		39	
13	Banana (y2-y5)		329		229	
14	Citrus <400 m	AGR	259	70	41	
15	Citrus >400 m			189	86	

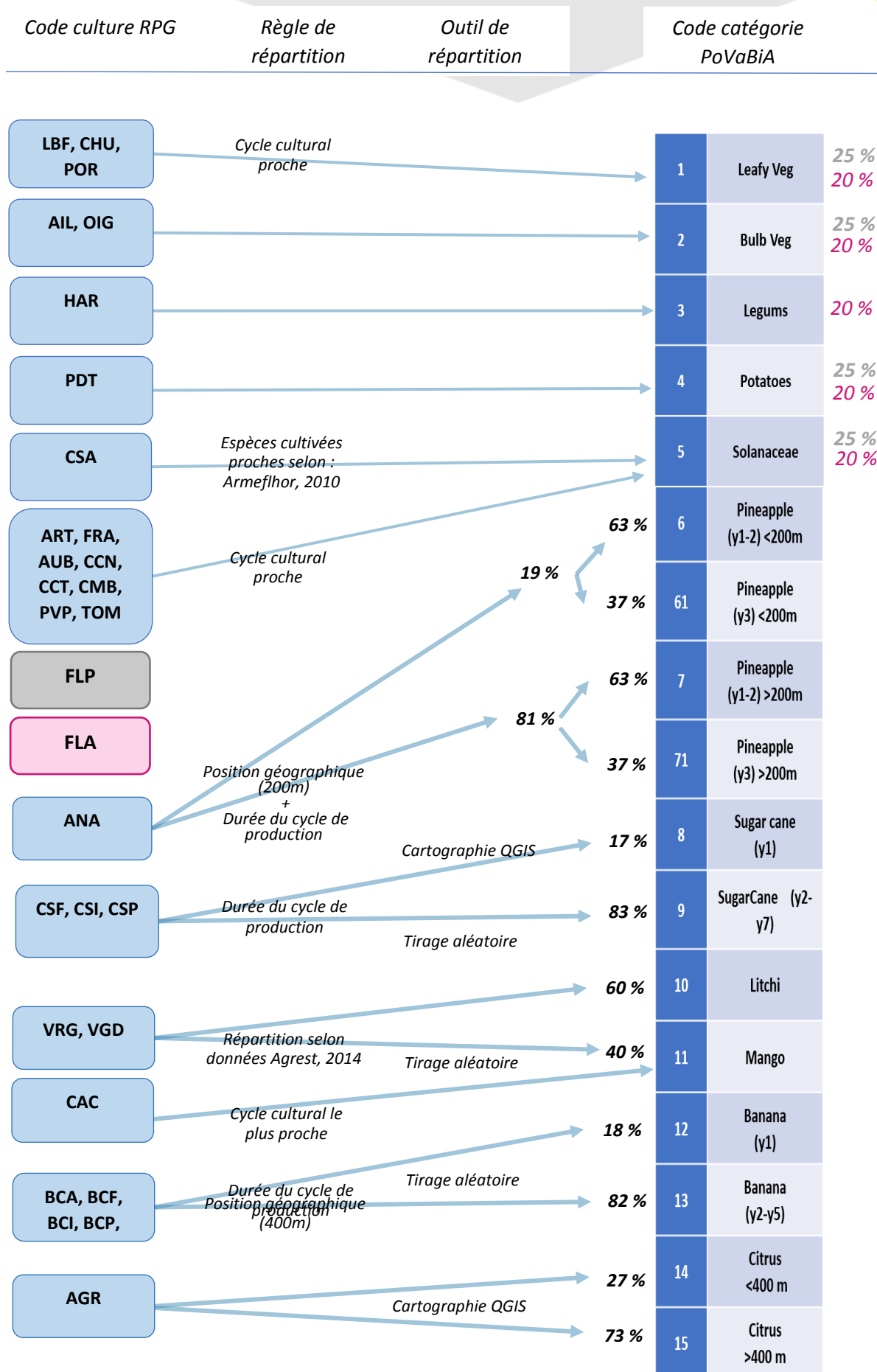


Figure 25 : Schéma de répartition des cultures du RPG au sein des catégories PoVaBiA

4.3. IDENTIFICATION DE LA DEMANDE

4.3.1 Identification des facteurs de la demande

L'évolution des cultures dans le modèle dépend de la catégorie type associée identifiée 4.1. Les schémas présentés ci-dessous (cf. Figure 26 ;

Figure 28 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des cultures d'Ananas et des Bananes.

; ;

Figure 29: Schéma illustrant les moments de demande en matière organique des cultures de Cannes à sucre d'un système de production défini.

; Figure 31) illustre le moment de demande pour chaque catégorie modélisée. Ces schémas ont été établis grâce à la bibliographie réalisée (cf. Figure 26).

Tableau 26 : Sources utilisées pour déterminer les moments et les besoins des cultures type du modèle PoVaBiA

N° type de culture	Source
1-2-3-4-5	(CIRAD, Guide de la Fertilisation à la Réunion. , 2006)
6-61-7-71	
8-9	
12-13	(CIRAD, Guide de Fertilisation de la Canne à sucre., 2007)
10-11-14-15	(CIRAD, Guide de la Fertilisation à la Réunion. , 2006)

Légende des figures 2 à 6 :

- Apport non modélisés
- Apport de fond
- Apport d'entretien

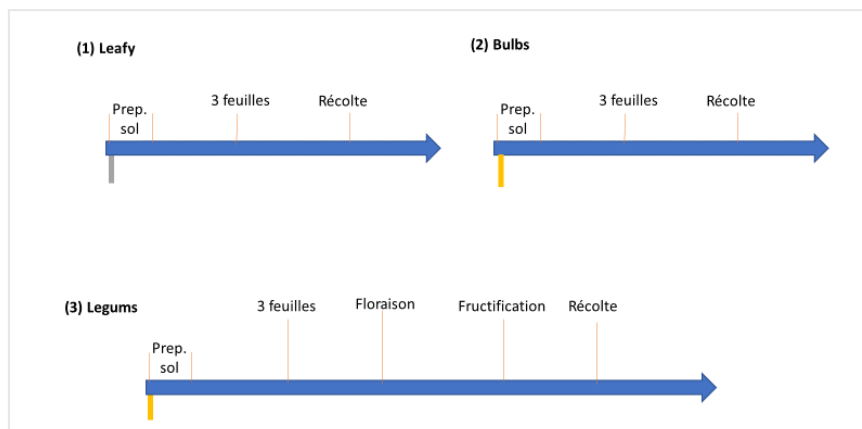


Figure 26 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des culture maraîchères de (1) légumes feuilles, (2) légumes à bulbes, (3) légumineuses

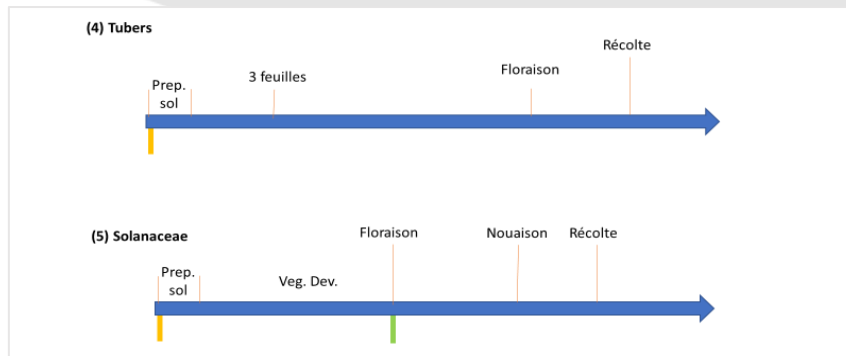


Figure 27: Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des culture maraîchères de (4) tubercules, (5) de légumes fruits.

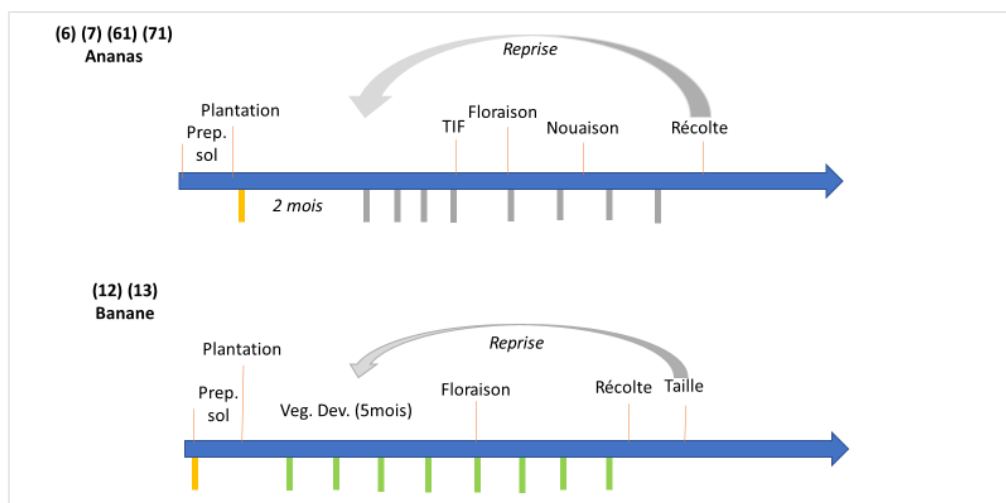


Figure 28 : Schéma illustrant les moments de demande en matières organiques des cultures d'Ananas et des Bananes.

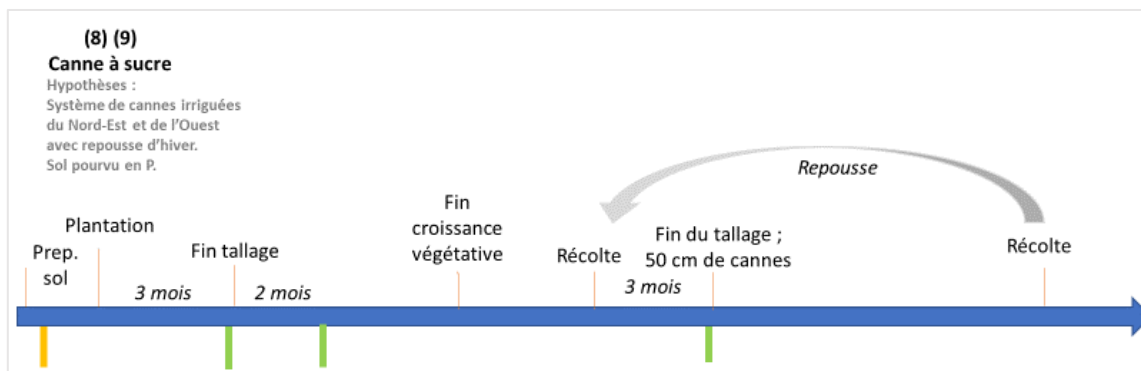


Figure 29: Schéma illustrant les moments de demande en matière organique des cultures de Cannes à sucre d'un système de production défini.

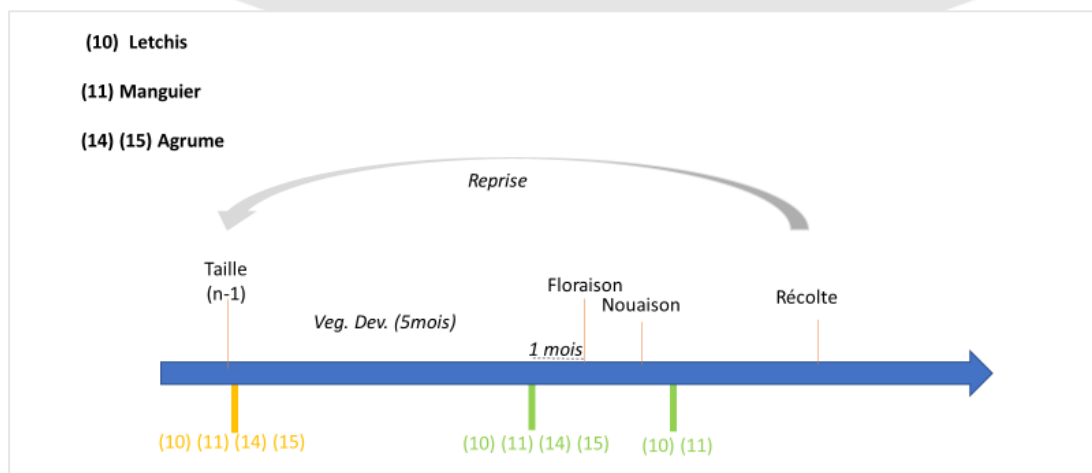


Figure 30 : Schéma illustrant les moments de demande en matière organique des verges de letchis, de manguiers et d'agrumes.

4.3.2 La source de matière organique demandée

Aux différents moments d'apport correspondent à des demandes de différentes sources de matière organiques. Les sources de matières organiques du modèle sont : le digestat solide ou liquide et le compost. La qualité de ces matières organiques varie selon les déchets traités dans notre modèle (*cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.*). On fixera la demande :

- en fonction de la quantité d'éléments NPK demandé ;
- en fonction du type de matière demandée.

Tableau 27 : Présentation des différentes natures de matière demandée par culture

Culture	Type apport de fond recommandé	Type de matière organique d'entretien recommandé
Maraîchage	Compost	Digestat liquide (facultatif)
Ananas 6 & 7	Compost ou digestat solide	/
Bananes 12		Digestat liquide
Cannes à sucre 8	Compost	Digestat liquide
Cannes à sucre 9	/	Digestat liquide
Verger 10, 11, 13 & 14	Compost ou digestat solide	Digestat liquide

4.3.3 Fractionnement des besoins

On a montré que les catégories type peuvent nécessiter plusieurs sources de matières organiques et à plusieurs moments du cycle de la culture. Afin d'identifier clairement la quantité de NPK demandée à chacun de ses moments, il est nécessaire d'étudier le fractionnement des besoins (*cf. Tableau 28*).

Sources :

- Le manuel d'utilisateur de l'outil FertiRun (CIRAD C. &., 2008)
- (CIRAD, Guide de Production Intégrée de Mangues à la Réunion., 2009)
- Fiche technique – La production des Letchis à la Réunion. (IRFA/SUAD, 1999)

Tableau 28 : Fractionnement des besoins NPK (en % des besoins totaux identifiés dans les sources bibliographiques)

Culture type	N° culture type	Apport de fond (%tot)	Apport entretien 1 (%tot)	Apport entretien 2 (%tot)
--------------	-----------------	-----------------------	---------------------------	---------------------------

Maraichère	1 à 4	100		
Maraîchère	5	100	50 (demande une fois sur deux)	
Ananas plantation	6 & 7	100		
Ananas repousses	61 & 71			
Cannes plantation	8	100 PK	50 N	50 N
Cannes repousses	9		100 NPK	
Bananes plantation	12	*	50 (% besoin entretien)	50 (% besoin entretien)
Bananes repousse	13		50 (% besoin entretien)	50 (% besoin entretien)
Letchis	10	50 NK, 100 P	25 NK	25NK
Manguier	11	*	*	
Agrumes	14 & 15	25 NK, 100P	50NK	25NK

4.3.4 Ajustement des besoins selon le type de sol

La Réunion présente différents types de sols qui influencent la nutrition des plantes (cf. Figure 32). On considère que les andosols ont une plus grande capacité de fixation du phosphore, l’hypothèse faite est de doubler les apports de phosphore pour les parcelles sur ce type de sol. (*Manuel d'utilisateur de l'outil FertiRun* (CIRAD C. &., 2008). Les autres types de sol n’influence pas spécifiquement la fertilisation.

Pour cartographier ses types de sols nous avons utilisé la carte Pédologie de la Réunion au 1/50000 selon M. Raunet – (RAunet, 2016).

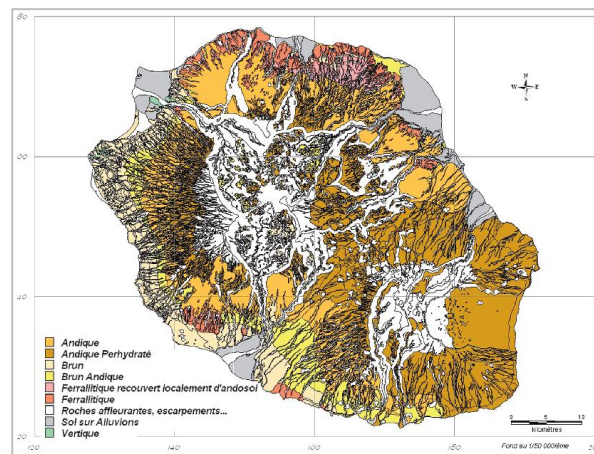


Figure 32 : Carte pédologique de la Réunion, selon CIRAD 2003.

4.4. QUANTIFICATION DE LA DEMANDE

4.4.1 Approche NPK

Les quantités de nutriments demandées sont propres à la culture renseignée dans le RPG, les données utilisées viennent majoritairement du *Manuel d'utilisateur de l'outil FertiRun* (CIRAD C. &., 2008), les données manquantes ont été identifiées dans les sources présentées en

Code culture RPG (n°type)	Culture considérée	Source d'information
FLP (5)	Chouchou - Cucurbitacee	
CAC (11)	Café sur sol volcanique peu évolué	

PFR (5)	Fraise	
VGD	Letchis	
FLP (3)	Pois d'Angole	

Tableau 29 : Sources utilisées pour identifier les besoins des cultures non-renseignés dans le guide FertiRun

Code culture RPG (n°type)	Culture considérée	Source d'information
FLP (5)	Chouchou - Cucurbitacee	(CIRAD, Guide de la Fertilisation à la Réunion. , 2006)
CAC (11)	Café sur sol volcanique peu évolué	(CIRAD, Fertilisation du caféier Arabica au Cameroun., 1995)
PFR (5)	Fraise	(Lot-et-Garonne, 2005)
VGD	Letchis	(CIRAD, Guide de Production Intégrée de Mangues à la Réunion., 2009)
FLP (3)	Pois d'Angole	(Koutouan, 2017)

4.4.2 Approche matière organique

4.4.2.1 *Caractérisation des matières organiques produites*

D'après les qualités des biodéchets et des déchets verts déterminées préalablement, la recette d'entrée prévue et les fonctions de transformations de chacun des processus de compostage et de méthanisation, nous sommes en mesure d'estimer la qualité des matières organiques générées par notre modèle et donc la quantité que chaque culture peut en demander selon ses besoins.

La recette prévue en entrée d'unités de traitement est : 50% de déchets verts, 30% de FFOM, 15% de déchets alimentaires et 5% de biodéchets des industries agro-alimentaire (tous types pour la méthanisation, uniquement les produits végétaux pour le compostage).

Les qualités des matières organiques produites sont décrites en Tableau 30.

Tableau 30 : qualités agronomiques des matières organiques produites dans PoVaBiA

Sources de MO	MS (%MB)	OM (%MB)	Nacc (g/kgMB)	C/N	Pacc (g/kgMB)	Kacc (g/kgMB)	pH
Compost	22	24	9,46	15	3,13	7,14	7,8
Digestat brut	22	27	11,50	9	2,16	7,02	8,2
Dig. Liquide	3	10	9,2	4	0,48	6,52	/
Dig. Solide	19	18	2,3	23	1,68	0,49	/

4.4.2.2 Calcul des besoins en MO par parcelles

Etant donné la valeur fertilisante très faible du digestat solide, afin de minimiser l'impact écologique de son transport, il est alloué aux cultures d'agrumes et d'ananas situés dans les bas (catégorie 6 et 14).

On considère que les coefficients d'équivalent engrais sont égaux à 1 puisque les valeurs en NPK sont exprimées en quantité d'élément accessible. Nous utilisons l'Équation 4 afin de calculer ces besoins.

Équation 4 : Calcul de la dose de matière organique à appliquer selon les besoins. Source : (DAAF, Guide de Bonnes Pratique Agricole à la Réunion., 2016)

$$Q = (U/d) \times 100$$

Q = dose d'engrais à épandre par hectare
 U = besoin de la culture en élément fertilisant par hectare
 d = teneur en élément nutritif de l'engrais

Par exemple pour la demande en apport de fond d'une parcelle de **1,43 ha d'oignon NPK** (200-114-329) kg, la demande se fera sous forme de compost NPK (9,46-3,13-7,14) g/kg

On calcule le recouvrement des besoins par un apport satisfaisant 100% des besoins en azote (risque de perte de rendement si trop faible, et de pollution si trop élevé).

Quantité demandée : $200/9,46 = 21$

Partie des besoins PK comblée par la demande : $21 * 3,13/114 = 0,45$; $21 * 7,14/329 = 0,45$

On envoie ici une demande de 21 000 kg, soit **21 tonnes de compost**. Cet apport recouvre 100% des besoins en azote, 45% des besoins en phosphore et 45% des besoins en potassium.

4.5. SELECTION DE LA PRISE EN CHARGE DES BESOINS

4.5.1 Objectif de diversification

Afin de soutenir les exploitants agricoles qui se tournent vers des cultures diversifiées, les cibles prioritaires des matières organiques produites dans PoVaBiA sont les cultures maraîchères, et arboricoles d'ananas et de banane. Le reste des matières disponibles est destiné à la culture de la canne à sucre selon les disponibilités de matières.

4.5.2 Bilan de matières organiques

D'une part, nous évaluons les matières produites sur le territoire (cf. Tableau 31), puis d'autre part les besoins en matières organiques (cf.

Tableau 32).

Tableau 31 : Production de matière organique selon différents scénarios (à partir des biodéchets produits)

Scénario	Scénario 100% compostage	Scénario 100% Méthanisation			Scénarios 50% compostage 50% méthanisation			
	Compost	Digestat brut	Digestat liquide	Digestat solide	Compost	Digestat brut	Digestat liquide	Digestat solide
Matières organique								
Quantité (t)	98975	123922	114009	9914	49487	62955	57919	5036

Tableau 32 : Demande totale en matière organique basée sur les besoins en azote

Catégorie de culture	Compost(t)	Digestat Liquide(t)	Digestat Solide (t)
1	2836	0	11664
2	3630	0	14930
3	2265	0	9317
4	2061	0	8478
5	5034	2588	20704
6	238	0	979
7	972	0	3999
8	0	51635	0
9	0	282682	0
10	24349	25038	100150
11	8315	4390	34199
12	1317	1679	5417
13	0	7326	0
14	491	1513	2018
15	1027	3167	4223
61	0	0	0
71	0	0	0
Total général	52535	380018	216077

Afin de cibler précisément l'utilisation du digestat solide (produit en petite quantité), nous proposons de l'utiliser afin de combler les besoins en apports de fond que le compost ne peut pas couvrir.

Un scénario mixte semble plus adapté à notre contexte. Grâce à ces premières estimations, nous pouvons avancer que la valorisation des biodéchets et des déchets verts produits à La Réunion permettrait de répondre à :

- 100% des apports en de fond sous forme de compost ou de digestat solide ;
- 100% des apports d'entretiens sous forme de digestat liquide hors cannes à sucre ;
- 80 % des apports d'entretiens de la canne à sucre en années de plantation.

4.6. MISE EN PLACE DES FACTURES

La classe Invoice permet de représenter les factures qui tiendront lieu de comptabilité pour la partie aval du modèle. Ces attributs sont présentés en Tableau 33.

Tableau 33 : Présentation des attributs de la classe AbstrackTruck

Variable	Type	Détails
Identification des agents		
invoiceNumber	int	Numéro de référence de la commande
customer	Farmland	Exploitant agricole client pour cette commande

Variables de fonctionnement		
materialAmount	double	Quantité de compost commandée
price	double	Prix de la commande
orderDate	Date	Date de commande
settled	boolean	Etat de la commande : régularisée ou non
settlingDate	Date	<i>null</i> si non régularisée, date de régularisation sinon
totalInvoicesNumber	int	Nombre total de commandes

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. (2013). Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation.
- Agribio, B. (2010). Fiche technique du réseau GAB/FRAB.
- Agriculture.gouv. (2008). RÈGLEMENT (CE) No 889/2008 DE LA COMMISSION du 5 septembre. Récupéré sur https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/PJ3-Nvx_R_CE_889-2008_cle41a61d.pdf
- Antil., D. R. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes.
- Arnefhlor. (2010). Les cultures légumières sous abris.
- BM, m. d. (2019). Nos gammes de matériel. Récupéré sur <https://www.bmvoirie.com/materiel-de-voirie-balayeuses-laveuses-bennes-caissons-a-feuilles-vaucuse>
- Carlos-Pinedo. (2020). Study of the digestion process at full-scale solid-state biogas plant using ORWARE: Model modification and implementation.
- CASUD. (2017). Rapport sur le prix et la qualité du Service Public de collecte et de l'Élimination des Déchets ménagers de la CASUD (SPED).
- CDDR.SAILD. (2016). Culture du haricot rouge ou haricot commun. Récupéré sur <https://docplayer.fr/21482781-Culture-du-haricot-rouge-ou-haricot-commun-phaseolus-vulgaris.html>
- Cemagref. (2009). Guide méthodologie de l'outil DIGES.
- Chabalière, E. F. (2007). Le guide de la fertilisation de la Canne à sucre à la Réunion. CIRAD, QUAE.
- CIRAD. (1993). La culture des agrumes à l'île de la Réunion. QUAE.
- CIRAD. (1995). Fertilisation du caféier Arabica au Cameroun.
- CIRAD. (2006). Guide de la Fertilisation à la Réunion. . QUAE.
- CIRAD. (2007). Guide de Fertilisation de la Canne à sucre.
- CIRAD. (2009). Guide de Production Intégrée de Mangues à la Réunion. Récupéré sur https://reunion-mayotte.cirad.fr/content/download/7766/80992/version/1/file/obj_6900_file_Guide-PFI.pdf
- CIRAD. (2009). Guide Technique pour la production de bananes. Récupéré sur . https://coatis.rita-dom.fr/osiris/files/GuideTechniquePourLaProductionDeBananesE_fichier_ressource_11678-cirad-2015-guide_technique_pour_la_production_de_bananes_en_guyane_francaise.pdf%20p6
- CIRAD. (2015). CIRAD La Réunion, La culture de l'ananas Victoria à la Réunion pour l'exportation – Recueil de bonnes pratiques. QUAE.
- CIRAD. (2020). Carte : Courbes de niveaux par pas de 10m – Région Réunion.
- CIRAD, C. &. (2008). Le manuel d'utilisateur de l'outil FertiRun.
- CIVIS. (2017). RAPPORT ANNUEL 2017 sur le prix et la qualité du service public de prévention et de gestion des déchets. .
- DAAF. (1014). La production fruitière à la Réunion.
- DAAF. (2016). Guide de Bonnes Pratique Agricole à la Réunion. Récupéré sur http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_des_Bonnes_Pratiques_Agricoles_cle4a82cc.pdf
- data.gouv. (2017). Data.gouv.fr, 2017. Registre parcellaire graphique (RPG) : contours des parcelles et îlots cultureux et leur groupe de cultures majoritaire. Récupéré sur

<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

Data.gouv. (2019). Base Sirene des entreprises et de leurs établissements (SIREN, SIRET). Récupéré sur data.gouv.fr.

DRAAF. (2010). La production fruitière à la Réunion : Document Agrest.

Drosg, B. F. (2015). Nutrient Recovery by Biogas Digestate.

Drosg, B., Fuchs, W., Seadi, T. Al, Madsen, M., Linke, B. (2015). . Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. .

Environnement, B. d. (2010). Le compostage. Récupéré sur <http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe1/node/51.html>

Expertise, P. M. (2007). Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides. Récupéré sur https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Methapi_Guide_Methodo_FR.pdf

Fisgativa, H. M.-L. (2018). Physico-chemical, biochemical and nutritional characterisation of 42 organic wastes and residues from France. . Data Brief 19, 1953–1962 .

fondation-bonduelle. (2018). Grouper les légumes selon les familles botaniques. Récupéré sur <https://www.fondation-louisbonduelle.org/faire-son-potager/grouper-les-legumes-selon-les-familles-botaniques/>

GRAB. (2012). Tomate de plein champ en agriculture biologique. . Récupéré sur https://www.grab.fr/wp-content/uploads/2014/08/L12PACA19_IrrigationTomatePleinChamp.pdf

Guardi, A. d. (2009). Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic.

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. . Urban development series;knowledge papers no. 15. .

IGN. (2020). Mon géocodeurs : guide utilisateur. . Récupéré sur <https://geoservices.ign.fr/documentation/applications/mon-geocodeur.html>

IRFA/SUAD. (1999). Fiche technique – La production des Letchis à la Réunion. .

Jakubus, M. (2016). Estimation of phosphorus bioavailability from composted organic wastes, Chemical Speciation & Bioavailability, 28:1-4, 189-198,. doi: DOI: 10.1080/09542299.2016.1227687

Koutouan, P. (2017). Effet de la fertilisation phospho-potassique sur le rendement grainier et la qualité des semence sdu *Cajanus Cajan L. Millsp.*

LCPBio. (2011). Récupéré sur <http://itab.asso.fr/downloads/fiches-lpc/lpc-pdt.pdf>

LCPBio. (2013). Cultiver l'oignon en plein champ en agriculture biologique : repères technico-économiques. Récupéré sur <http://www.lpcbio.org/PDF/fiche-lpc-ITK-oignon.pdf>

Lot-et-Garonne, C. (2005). Guide Technique Fraise. Récupéré sur <https://www.yumpu.com/fr/document/view/47921439/guide-technique-fraise-chambre-dagriculture-de-lot-et-garonn>

manageo.fr. (2020). Informations entreprises. Fiche établissements. Récupéré sur <https://www.manageo.fr/>

Navaroo, A. (1992). Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. . Bioresource Technology 44 , 203-207.

Nicollin, O. (2020). Echange téléphonique. (M. Medmoun, Intervieweur)

Ouest-France. (2019). Un Nouveau Camion benne de 26 tonnes. Ouest-France.

PoVaBiA. (Avril 2020). Estimation de la production de biodéchets à la Réunion : Méthodologie. Laboratoire d'Informatique et de Mathématique, Saint-Denis.

Province Sud. (2005). Calendrier cultural des litchis. Récupéré sur http://www.formagri.nc/users_private/olivierg/calendrier%20cultural%20litchi%20janvier05.pdf

RAunet, M. (2016). Carte : Pédologie de la Réunion au 1/50000 selon M. Raunet. CIRAD.

SAINT MACARY H., M. J. (2002). Systèmes de culture de la Réunion : Typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel. Actes du séminaire, . Montpellier.

Societe.com. (2020). Fiche établissement. Récupéré sur [societe.com: https://www.societe.com/etablissement/](https://www.societe.com/etablissement/)

SUEZ, T. F. (2019, Avril 15). Retour d'expériences sur les Energies Nouvelles pour Bennes à Ordures Ménagères. Récupéré sur http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2019-05/prsentation_h_grange.pdf

Syngenta. (2015). BBCH : une échelle universelle pour identifier le stade des cultures. Récupéré sur [Syngenta.fr:](http://www.syngenta.fr)

https://www.google.com/search?q=syngenta+%C3%A9chelle+BBCH&rlz=1C1CHBF_frRE903RE903&oq=syngenta+%C3%A9chelle+BBCH&aqs=chrome..69i57.3352j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8