

Juin 2016
volume n° 6 / numéro n° 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Regards agronomiques sur les relations entre
agriculture et ressources naturelles



Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes. L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Le recyclage agricole des résidus organiques : une ressource naturelle pour en préserver d'autres

Tom WASSENAAR^{*1} - Jérôme QUESTE²
Jean-Marie PAILLAT¹

*auteur correspondant : tom.wassenaar@cirad.fr

¹CIRAD, UPR Recyclage et risque, F-34398 Montpellier, France

²CIRAD, UPR GREEN, Antananarivo, Madagascar

Résumé

L'agronomie joue un rôle essentiel dans la co-construction de symbiose industrielle en contribuant à définir les conditions d'utilisation des résidus organiques en agriculture. Nous présentons un protocole pour une co-construction de ce type et son application sur un territoire de l'île de la Réunion. La production de fertilisants normés adaptés aux cultures locales via un recyclage de résidus organiques locaux constitue une « promesse plausible ». Cela comprend une réduction des coûts et de la consommation de ressources non-renouvelables grâce à une substitution d'engrais minéral, une croissance de la productivité au travers de l'amélioration de la fertilité du sol et une réduction de la pollution liée aux déchets et à leur mise en décharge. L'application de notre protocole à la Réunion aboutit à des scénarios focalisant sur l'intérêt « engrais » de la promesse initiale. La co-construction met en évidence que les référentiels agronomiques restent insuffisants pour élaborer une solution suffisamment crédible.

Mots-clés

Symbiose industrielle, co-construction, résidus organiques, fertilisation, La Réunion.

Abstract

Resource depletion by agriculture results from the consumption of non-renewable resources and the degradation of renewable resources. Beyond agriculture, resource conservation through industrial symbiosis, i.e. engaging traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, constitutes the core of industrial ecology. Agriculture can take part in industrial ecology and organic residue recycling constitutes a promising path for building industrial symbiosis.

The keys to industrial symbiosis are collaboration and the synergistic possibilities offered by geographic proximity. Agronomy contributes to defining organic residue's agricultural use conditions. As such it plays a key role in the co-construction of symbiotic exchange. We tested a protocol for the co-construction of integrated organic residue management scenarios by applying it to a sub region of Réunion Island. The residue-based production of commercial organic fertilizer adapted to local

crop and agricultural requirements constitutes a "plausible promise" triggering the collaborative process. For the agricultural sector, such a promise comprises the reduction of the consumption of non-renewable resources by substituting mineral fertilizer, the reduction of resource-degrading pollution induced by current waste use and discharge and the reduction of costs thanks to a soil

fertility improvement based progressive productivity increase. The Réunion case-study testifies of the yet limited capacity of agronomy to predict organic fertilizer requirements and effects, particularly under tropical conditions, which seriously hampers the credibility of co-constructed solutions. This knowledge gap is a barrier to the realization of industrial symbiosis.

Introduction

L'agriculture affecte des ressources naturelles principalement de deux manières distinctes. Elle en consomme certaines qualifiées d'intrants pour produire, ce qui rend ces ressources moins disponibles. Elle en dégrade d'autres via des flux mal maîtrisés, ce qui en diminue l'utilité pour d'autres usages, principalement au travers d'altérations qualitatives. Ces deux effets contribuent à la raréfaction de ces ressources. Au-delà de l'agriculture, cette raréfaction de ressources a suscité l'émergence d'un nouveau champ scientifique, l'écologie industrielle et territoriale (EIT). Sa traduction opérationnelle recouvre les démarches collectives menées en vue d'accroître l'efficacité de ces ressources au sein d'un métabolisme industriel en promouvant la « symbiose », i.e. l'établissement de connexions entre activités économiques au travers d'échanges de matières. En visant à la fois un développement économique et un meilleur usage des matières ou de l'énergie, l'EIT répond aux enjeux de la transition écologique (Laville, 2014).

La définition récente de métabolisme industriel (Wassenaar, 2015), un concept clé de l'EIT, englobe clairement l'agriculture : le changement de matière par médiation humaine soutenant l'activité économique d'un système productif, où le métabolisme industriel est considéré comme un sous-ensemble d'un système complexe de processus transformatifs interconnectés à travers toutes les échelles de la vie : le réseau métabolique. De plus, l'agriculture a sa place dans l'EIT en tant que principal utilisateur des ressources eau et terre, et parce qu'elle est de ce fait au contact direct avec de multiples autres ressources naturelles intervenant dans des systèmes métaboliques connexes. Enfin elle constitue le pendant historique de milieux urbains et industrialisés, premiers affectés par la « rupture métabolique » (Foster, 1999; Wassenaar et al., 2015) que l'EIT se donne pour mission de réduire.

L'agronomie peut contribuer simultanément aux trois voies de transition écologique que sont (i) la réduction de la consommation de ressources entrantes, (ii) la préservation des ressources du système et (iii) l'amélioration de la relation avec les ressources extérieures au système. Deux types de territoires où les cycles de matières subissent une « rupture métabolique » qui va en s'aggravant du fait de la mondialisation, de l'urbanisation, des changements alimentaires et de la spécialisation spatialement concentrée des secteurs agricoles, sont concernés par ces trois voies : les mégapoles à forte croissance et à élevage périurbain intensif, constituant le puits de nutriments provenant d'un hinterland agricole aux sols s'appauvrissant ; et les territoires confinés et isolés à forte croissance démographique. Dans ces situations, le recyclage de résidus organiques, de diverses origines, constitue une voie importante pour une contribution de l'agriculture à la symbiose industrielle (Wassenaar et al., 2014). Les acteurs du système productif y sont susceptibles

de s'engager dans une telle démarche car la contrainte de la coordination intersectorielle inhérente à ce type de démarche est contrebalancée par une attente de gain sectoriel.

Nous interrogeons dans cet article le rôle de la recherche, et plus particulièrement celui de l'agronomie, dans une démarche de gestion concertée développée pour le recyclage agricole de résidus organiques dans ce type de situation. Cela nous amène tout d'abord à nous intéresser au concept de « résidu organique ». Le rôle de la recherche et ses conséquences en termes de programmation scientifique sont ensuite illustrés par l'application de cette démarche à la micro-région Ouest de l'île de la Réunion. Si cette démarche s'intéresse bien aux trois voies de la transition écologique indiquées ci-dessus, nous nous focalisons dans cet article sur celles qui concernent l'agronomie et en particulier – du fait des orientations propres au territoire étudié – sur celle de la réduction de la consommation de ressources entrantes au travers de la substitution d'engrais.

Les résidus organiques au cœur de la symbiose industrielle

Envisager le recyclage des résidus organiques dans le cadre d'une démarche de symbiose industrielle au niveau territorial nécessite de prendre en compte les différentes fonctions de ces résidus et les différents points de vue portés sur eux.

Historiquement, c'est le changement dans la gestion des résidus organiques – de moins en moins restitués au sol – au cours de la révolution industrielle, dénoncé par Justus von Liebig comme le « pillage du sol », qui a emmené Marx à théoriser le concept de « rupture métabolique » : l'éloignement matériel de l'homme des conditions naturelles de son existence (Foster, 2000). La distinction entre objets naturels, techniques et culturels est progressivement remise en question, que ce soit en écologie (Lévêque, 2013), en anthropologie (Descola, 2011), en sociologie (Latour, 2015), voire même en économie (Costanza *et al.*, 1997). Le sol (cultivé) est ainsi perçu comme une partie intégrante du système productif mais on lui accorde néanmoins le statut de ressource naturelle. Paradoxalement, on conteste à la matière organique qui retournait pourtant en condition naturelle au sol ce même statut de ressource naturelle, sans doute parce que du fait de cette rupture métabolique, elle s'est éloignée – avec l'homme – de ces conditions-là, que ce soit en termes spatio-temporels ou de composition.

Considérant que ce rôle peut relever d'une restauration (partielle) des conditions naturelles, se plaçant ainsi dans un futur souhaité, joint à l'absence de définition rigoureuse de ces conditions, nous postulons que les matières organiques peuvent être gérées comme des ressources naturelles. La définition de ces dernières ne s'y oppose pas : « des ressources matérielles de richesse, comme le bois, l'eau douce, ou un gisement minéral, qui se produit à l'état naturel et dispose d'une valeur économique »¹. Ce que nous appelons résidu organique – la nécromasse de composition principalement organique – est inaliénable de la vie et se produit bien à l'état naturel. Certaines de ces matières organiques font l'objet de transactions informelles voire d'échanges

commerciaux. La valeur économique de ces matières dépend de nombreux paramètres dont la présence locale de matières fertilisantes concurrentes, leurs qualités fertilisantes et les coûts liés à leur dépollution. Les travaux présentés dans cet article démontrent cependant que le calcul de cette valeur est possible. Ainsi, Wassenaar *et al.* (2014) proposent de considérer le recyclage de résidus organiques comme appartenant à la Gestion Intégrée de Ressources Naturelles (Douthwaite *et al.*, 2002).

La valorisation des résidus organiques – considérés comme ressources naturelles – permettrait ainsi de compenser partiellement cette rupture métabolique, préservant la ressource naturelle sol en améliorant sa fertilité. Elle permettrait également d'espérer une contribution aux deux autres fonctions précitées : d'une part, réduire les impacts environnementaux liés à ce fossé métabolique, où la gestion actuelle des résidus organiques, organisée autour du principe d'une élimination de ces déchets à moindre coût, impacte diverses ressources naturelles au sein et au-delà de ces territoires (e.g. eutrophisation des eaux, contamination des sols). D'autre part, réduire les flux de ressources non-renouvelables consommées par l'agriculture (e.g. phosphate et potasse issus de ressources minières, énergie fossile pour la synthèse de l'engrais azoté), objectif premier de la symbiose industrielle. D'autres effets socio-économiques peuvent également motiver les acteurs à participer à cette démarche, dont la réduction des charges de gestion (élimination) actuelle.

Il paraît donc essentiel que la symbiose industrielle ne soit pas exclusivement pilotée par un principe d'augmentation de l'efficacité, réduisant les coûts liés à la gestion actuelle des excédents et limitant l'importation de ressources, ce qui risque de conduire à une déconnexion, une rupture métabolique accrue. Les solutions de valorisation énergétique des résidus organiques plaçant le sol cultivé en dehors du système industriel peuvent ainsi présenter un risque à long terme. Les usages potentiels des résidus organiques et les conséquences de ces usages doivent donc être considérés. D'autres demandes industrielles « symbiotiques » comme la production d'énergie, le *stripping* de nutriments destinés à l'export ou la production de *petfood* peuvent entrer en concurrence avec les usages agricoles. Il se peut aussi que les procédés visant à améliorer la fertilité des sols induisent une pollution de l'air ou une contribution au réchauffement climatique accrue.

Une démarche de gestion concertée des résidus considérés comme ressource naturelle renouvelable

Appréhender une matière organique comme un déchet ou comme une ressource implique de s'intéresser à des caractéristiques différentes de cette même substance, de l'investir dans des dispositifs distincts. Le traitement d'un déchet s'inscrit dans une logique d'élimination de la plus grande quantité possible d'une substance à moindre coût et en limitant les risques sociaux et environnementaux. L'utilisation d'une ressource a pour objectif la réalisation d'une action, ici la fertilisation agricole qui, pour être efficace, doit respecter des contraintes agronomiques et environnementales. Enfin, acquérir et conserver un statut de produit

¹ American Heritage® Dictionary of the English Language, Fifth Edition. (2011)

commercialisable impose à la matière organique d'autres contraintes comme la stabilité des caractéristiques physico-chimiques dans le temps, le respect de normes de qualité autorisant sa mise sur le marché et – en premier lieu – l'existence d'un marché, c'est à dire de consommateurs potentiels. En amont, se pose également la question de l'élaboration des normes et des critères associés pouvant rendre compte de cette qualité.

Une démarche de concertation inspirée de la gestion des ressources naturelles renouvelables

La requalification des matières organiques comme ressources naturelles renouvelables nous conduit à mobiliser les cadres théoriques et les démarches méthodologiques développées depuis plusieurs décennies pour améliorer la durabilité de l'eau, du foncier ou des forêts. La recherche sur la gestion des ressources naturelles s'est construite en réponse au problème économique classique de la « tragédie des communs » (Hardin, 1968) qui met en évidence les difficultés d'une gestion durable d'une ressource dont la propriété est imprécise en l'absence d'un système de coordination effectif. La résolution de ce problème donna lieu à une exploration fertile de nouveaux dispositifs de gouvernance, depuis la commercialisation de la Nature (Costanza *et al.*, 1997) jusqu'à la gestion intégrée à pilotage étatique qui débouchera en France sur l'institutionnalisation des Comités Locaux de l'Eau. Sur la base des travaux du prix Nobel Elinor Ostrom (1990), les tenants de la co-gestion adaptative recommandent d'une part d'impliquer l'ensemble des parties prenantes à la conception et à la mise en œuvre du système de gouvernance et d'autre part d'adopter une approche systémique consistant à appréhender l'ensemble des dynamiques de ce que l'on qualifiera de « socio-écosystème ». Cette approche nous semble cohérente avec le concept de métabolisme industriel qui consiste, lui aussi, à appréhender l'ensemble des flux de matières sur un même territoire. L'application des outils de la co-gestion adaptative des socio-écosystèmes à la thématique du recyclage des résidus organiques nous a conduits à élaborer un protocole original de concertation à l'échelle d'un territoire.

- Le recyclage des résidus organiques y est introduit comme une « promesse plausible » (Douthwaite *et al.*, 2002) proposée à l'évaluation d'un large collectif d'acteurs ;
- La constitution de ce collectif s'efforce à la fois de rassembler des représentants des différents secteurs d'activité (élevage, agriculture, transformation agro-alimentaire et traitement de déchets ménagers) et d'intégrer différentes formes d'expertise (niveau institutionnel, niveau technique et niveau empirique) (Queste et Wassenaar, n.d.) ;
- Le processus de concertation s'organise suivant la méthodologie de la modélisation d'accompagnement (Etienne, 2011). Elle consiste en un processus itératif et adaptatif de co-construction de scénarios de recyclage au cours d'ateliers participatifs et de réunions de groupes techniques ;
- La co-construction de scénarios s'appuie elle-même sur la production et la mise en circulation de modèles (diagramme conceptuel, jeux de rôles, simulations multi-agents) au sein des différentes arènes de concertation.

Ce type de démarche s'inscrit dans un paradigme post-normal (Funtowicz et Ravetz, 1993). Il s'agit de produire, de manière synchrone et coordonnée, de nouvelles connaissances scientifiques et de nouvelles solutions à des enjeux opérationnels posés sur le terrain. Les concepteurs de la démarche espèrent susciter une évolution du métabolisme industriel via la production, l'hybridation et l'échange de connaissances (Reed *et al.*, 2014), via des mécanismes indirects d'apprentissage social (Bouwen et Taillieu, 2004) et enfin via la transformation de la « promesse plausible » initiale en un « mythe rationnel » partagé susceptible d'induire une coordination non contraignante des différentes institutions en mesure d'agir sur le territoire (Holm *et al.*, 1999).

L'agronomie au centre de la démarche

Dans une telle démarche de concertation visant une symbiose industrielle centrée autour du recyclage de résidus organiques, l'agronomie est amenée à s'exprimer sur le potentiel que représentent ces résidus pour deux fonctions, qui rendent le changement de paradigme « déchet vers ressource » possible : (i) la restauration et la préservation de la qualité du sol cultivé, luttant ainsi contre la raréfaction de ressources par dégradation du sol, et (ii) la nutrition adéquate de la culture, luttant contre la raréfaction de ressources par substitution des engrais chimiques.

La « promesse plausible » consiste à explorer conjointement le potentiel de ces deux fonctions attribuées aux résidus organiques – classiquement désignés par le rôle « amendement » pour la qualité du sol et le rôle « engrais » pour la nutrition des plantes – à travers lesquelles les acteurs cherchent à satisfaire leurs intérêts particuliers (e.g. la réduction du coût lié à la gestion de résidus pour des acteurs agro-industriels, la protection de la qualité de l'eau pour les pouvoirs publics, la réduction de la dépendance aux engrais pour les agriculteurs, le déblocage de leur développement pour les filières de production animale, etc.).

Au cours de la transformation de la « promesse plausible » initiale en un « mythe rationnel » partagé, l'agronomie joue deux rôles. Le premier consiste à définir la « promesse plausible » initiale en dressant l'état des besoins agronomiques auxquels l'apport de matière organique peut pour partie répondre. Au cours du processus, cette promesse intègre peu à peu l'ensemble des contraintes logistiques, économiques, réglementaires et stratégiques qui progressivement réduisent le champ des possibles. Le second rôle consiste à éclairer au cours du processus de concertation l'ensemble des concepteurs quant à l'adéquation entre ces besoins et les orientations prises.

Ces besoins peuvent être estimés selon un schéma dichotomique amendement-engrais. Diverses méthodes de raisonnement des besoins nutritifs peuvent être mobilisées en fonction des connaissances disponibles. Le besoin d'ajustement de propriétés du sol peut être apprécié par rapport aux exigences de la culture ou par rapport à un état de référence. S'exprimer sur l'adéquation entre les apports envisagés et ces besoins est une toute autre affaire. La première difficulté est intrinsèque à la nature dichotomique de la demande d'information, car ces fonctions sont intimement liées. L'apport de matière organique au système sol déclenche un ensemble d'effets difficilement quantifiables et très localement spécifiques (Magdoff et Weil, 2004 ;

Fuchs et al., 2014). Interpréter ces effets dans un système binaire de fonctions « amendement » et « engrais » est délicat dans le sens où cela accroît la difficulté de prévision qui doit considérer la résultante d'un ensemble d'effets conjoints et de leurs interactions. Ainsi l'assimilation *in fine* par la plante de nutriments libérés lors de la minéralisation de la matière organique apportée ou temporairement organisée peut être influencée, directement et indirectement, par des changements de propriétés du sol.

S'y ajoute une difficulté concernant l'acquisition de connaissance sur ces effets et leur estimation. Face à la complexité des effets, la stratégie dominante en agronomie a consisté à considérer séparément chacune de ces deux fonctions, comme si elles étaient indépendantes, au travers de recherches empiriques focalisant sur les « réponses » systémiques. Dans certaines situations (e.g. contextes tropicaux), la production de références techniques sur la base d'expérimentations en conditions réelles reste cependant globalement faible. Ce pragmatisme a un prix : une compréhension des mécanismes sans doute insuffisante, car difficiles à isoler avec les méthodes de l'agronomie, pour accéder à une modélisation suffisamment générique des processus. La concertation en vue d'une symbiose industrielle pâtit d'un tel manque de capacité.

La co-construction de scénarios à la Réunion

L'île de la Réunion présente des caractéristiques pertinentes pour promouvoir une coordination des acteurs pour un renforcement du métabolisme industriel. Ce territoire insulaire est enclavé, soumis à une forte croissance démographique et à un développement agricole et industriel important. La quasi-totalité des volumes de résidus organiques produits est soit éliminée via des épandages agricoles plus ou moins bien contrôlés, soit disposée en centre d'enfouissement technique. On observe une augmentation en parallèle des volumes de résidus organiques produits, une diminution des surfaces agricoles disponibles et des importations d'intrants agricoles sous la forme de provende et d'engrais chimiques de synthèse. Cette situation génère des tensions.

L'exploration collective d'une solution de recyclage comme résolution de controverses sociotechniques

La démarche d'accompagnement de la symbiose industrielle est initiée par un petit collectif intersectoriel constitué par des ingénieurs, chercheurs et cadres techniques d'administrations. Elle bénéficie d'un appui institutionnel de la part de la préfecture et de la communauté de communes « Territoires de la Côte Ouest » et d'un « momentum » lié à la montée en puissance des services de l'État dans la mise en œuvre des réglementations environnementales. En 2011, l'épandage des lisiers de porc, le compostage des déchets verts et l'élimination des boues d'épuration présentent de réelles difficultés. Les porteurs du projet posent explicitement trois hypothèses :

1. Les dysfonctionnements du système tirent leurs origines d'un déficit de coordination entre producteurs et consommateurs de matières organiques.
2. La mise en concurrence des différentes filières de production de déchets, conduit à des tensions et à une ré-

partition des matières organiques inefficace d'un point de vue agronomique, économique et environnemental.

3. Les agriculteurs sont susceptibles d'adopter de nouvelles pratiques de fertilisation fondées sur des matières fertilisantes organiques aptes à se substituer aux engrais chimiques.

La promesse formulée consiste à mettre en place une ou plusieurs filières de transformation de déchets organiques en produits fertilisants organiques, si possible normés, adaptés aux contraintes des agriculteurs réunionnais.

Un dispositif de concertation est conçu autour de trois niveaux d'arènes évaluant séparément la légitimité institutionnelle, la crédibilité technique et la pertinence empirique de solutions co-construites (Queste et Wassenaar, n.d.). L'organisation du processus met également intentionnellement en œuvre des opportunités de rencontre, d'explicitation et de partage de points de vue entre participants de manière à favoriser l'émergence de phénomènes induits d'apprentissage social.

En premier lieu, un profil type des produits-cible « idéaux » est établi. Ensuite, pour chaque produit-cible, les ateliers et réunions conçoivent un circuit permettant la production d'un tel produit-cible utilisant des déchets organiques locaux comme matières premières d'un procédé industriel de transformation. Enfin, les différents circuits sont combinés pour produire des scénarios intégrés au niveau du territoire. Ces scénarios sont ensuite soumis à une évaluation économique, environnementale et logistique. Parmi les points ayant fait l'objet de controverses, la définition d'un prix de vente indicatif des produits nécessite le calcul d'un coût de fertilisation à l'hectare et en conséquence la recommandation d'une dose de produit fertilisant normé pour les principales cultures de l'île. Le référentiel technique insuffisant concernant l'usage de produits organiques sur canne à sucre ne permet pas de connaître à ce jour avec suffisamment de précision la dose de produit qui équivaut aux apports d'engrais minéral. Ceci est surtout vrai pour l'azote dont le coefficient apparent d'utilisation (azote de l'engrais directement absorbé par la plante) est approché actuellement avec beaucoup d'incertitude. Or ce dosage conditionne fortement la rentabilité à terme des unités de production conçues. Des essais agronomiques de long terme sur canne à sucre ont récemment été mis en place pour mieux caractériser l'efficacité fertilisante des produits organiques.

Les scénarios produits et le rôle clé du raisonnement agronomique

Au bout de trois années de concertation, l'ensemble des controverses a été arbitré, souvent en éliminant des options ou en retenant des estimations relativement minimales des coefficients d'équivalence engrais des apports organiques. L'aboutissement du processus a pris la forme de deux scénarios prospectifs. Ces scénarios, décrits plus en détail dans Wassenaar et al. (2015), sont conçus comme des alternatives à un scénario « tendanciel » qui correspond à une situation où aucune nouvelle installation de traitement ne serait mise en œuvre. Dans ce scénario de référence, la production de compost serait supérieure à la demande agricole et une concurrence aigüe se développerait pour la contractualisation de plans d'épandage.

Le scénario « minimal »

Dans ce scénario, une filière de production et de distribution d'un produit fertilisant nouveau serait introduite. Une station mettrait en œuvre un procédé de co-compostage d'un mélange de broyat de déchets verts, de litière de volaille et de lisier de porc pour produire un compost « enrichi » respectant la norme amendement organique NFU 44-051. Il constituerait un fertilisant « complet » utilisé par les maraîchers une fois sur deux ou trois cycles de cultures. Il pourrait également être utilisé comme fertilisant unique sur canne à sucre et prairie, mais par le biais d'un épandage mécanisé, ce qui limite fortement la portion de la sole « éligible ». Sur les prairies, plus éloignées et difficiles d'accès, le coût de transport deviendra par ailleurs vite prohibitif. Le reste des matières organiques resterait géré de la même façon qu'aujourd'hui, mais en quantité moindre pour les effluents d'élevage concernés (litière de volaille et lisier de porc) et le compost de déchets verts. La localisation de la station de co-compostage à proximité des maraîchers et d'une part importante des éleveurs de monogastriques (porcs et vo-

lailles) de la zone, permettrait l'adhésion de 14 des 22 éleveurs de poulets de chair et de 5 des 19 éleveurs de porcs les plus proches, ce qui correspondrait au besoin identifié du mélange de matières. La détermination de ce mélange, présenté dans le tableau 1, constitue un délicat compromis entre la maximisation de la richesse en nutriments du produit, le respect de la norme NFU 44-051 et le maintien de caractéristiques physiques du mélange convenant au procédé biologique. La simulation du scénario suggère que l'utilisation du produit par les agriculteurs ne représenterait qu'une faible part de la production envisagée. L'utilisation simulée concernerait très majoritairement le maraîchage. Cette évaluation aboutit donc à revoir le dimensionnement des installations à la baisse ou à envisager l'émergence d'une filière en aval. Il est à noter que l'adhésion indiquée des éleveurs correspond à la « libération » de la moitié de la surface cultivée hors prairie faisant actuellement l'objet de plans d'épandage dont le non-respect est suspecté, par certains, de contribuer au transfert de nitrates vers la ressource aquatique.

		Matières en entrée	Procédé	Matières en sortie
scénario minimal	CC-LLB : co-compost de lisier de porc, litière de volaille et de broyat de déchets verts	47% de broyat de déchets verts, soit 8400 t MB.an ⁻¹ 20% de litière de volaille, soit 3600 t MB.an ⁻¹ , hypothèse : 14/22 élevages 33% de lisier de porc, soit 6000 t MB.an ⁻¹ , hypothèse : 5/19 élevages	co-compostage en casiers avec retournement besoin surfacique : 8000 m ² besoin d'équipement : 1 tractopelle et 1 mélangeur mobile besoin de manutention : 4 jh/semaine	Co-compost normalisé NFU 44 051 teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 1,6 – 1,6 – 2,1% Estimation K _{eq} NPK : 0,4 - 0,8 - 1,0 6000 t.an ⁻¹ + 2000 t.an ⁻¹ de refus Siccité 70%
	CC-FVB : co-compost de fientes de poules pondeuses, de vinasse concentrée et de broyat de déchets verts	52% de broyat de déchets verts, soit 2300 t MB.an ⁻¹ 34% de fiente de poules pondeuse, soit 1500 t MB.an ⁻¹ , hypothèse : 1/1 élevage 14% de vinasse concentrée, soit 600 t MB.an ⁻¹ , hypothèse : projet de concentration réalisé	co-compostage en casiers avec retournement besoin surfacique : 2800 m ² besoin d'équipement : 1 tractopelle et 1 mélangeur mobile besoin de manutention : 1 jh.semaine ⁻¹	Co-compost normalisé NFU 44 051 teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 1,6 – 1,4 – 3,5% Estimation K _{eq} NPK : 0,4 - 0,8 - 1,0 1900 t.an ⁻¹ + 500 t.an ⁻¹ de refus Siccité 70%
scénario optimal	EOM-LLB : engrais organo-minéral à base de CC-LLB	~5000 t MB.an ⁻¹ de CC-LLB complément d'engrais minéral	une chaîne industrielle de mélange une chaîne de compression (à froid) et de granulation 3-5 t.h ⁻¹ : 8-12000 t.an ⁻¹ besoin surfacique : minimum 6200 m ²	~6 000 t/an d'engrais organo-minéral, en granules teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 5 – 4 – 8 % Estimation K _{eq} NPK : 0,7 - 0,8 - 1,0 NFU 42 001
	EO-FVB : engrais organique à base de CC-FVB	1900 t MB.an ⁻¹ de CC-FVB 340 t MB.an ⁻¹ de farines animales (plumes et sang)		1900 t.an ⁻¹ d'engrais organique, en granules teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 4 – 2 – 4 % Estimation K _{eq} NPK : 0,8 - 0,8 - 1,0 NFU 42 001

Tableau 1 : Principales caractéristiques techniques des procédés de transformation des circuits de valorisation.

Le scénario « optimal »

Ce scénario prolonge le premier scénario par l'émergence d'une seconde filière produisant cette fois des engrais organiques (EO) et organo-minéraux (EOM), répondant aux exigences du principal marché d'engrais identifié, la fertilisation manuelle sur canne à sucre en repousse. Le défi est ici de produire à partir de matière organique un engrais satisfaisant les besoins annuels de la canne à sucre sans dépasser la dose maximale acceptable pour une application manuelle estimée à 2 t.ha⁻¹. Cette filière serait composée de plusieurs petites stations de co-compostage dont les productions constituent des « bases organiques ». Ces matières premières seraient dans un second temps acheminées à une usine de complémentation et de granulation qui élaborerait deux engrais normalisés (NFU 42-001). L'approvisionnement de cette usine – 8 à 12 000 t.an⁻¹ dans sa première « tranche » – serait assuré par deux stations de co-compostage. La première est celle décrite dans le scénario minimal. La seconde produirait un compost, non-équilibré par rapport aux besoins des cultures, anticipant la complémentation, et cédé en totalité à l'usine. Cette deuxième station valoriserait les fientes de poules pondeuses et la vinasse de distillerie (par ailleurs concentrée, et donc stabilisée), toujours en utilisant du broyat de déchets verts comme structurant. Elle produirait près de 2000 t.an⁻¹ de co-compost criblé (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce second co-compost serait complémenté en azote organique dans l'usine d'engrais, par ajout de farine de sang et de plumes. Cela permettrait de produire 1900 t.an⁻¹ d'engrais organique EO aux teneurs N-P₂O₅-K₂O en sortie de 4-2-4 %. Le premier co-compost ne pourrait pas être enrichi en potasse par voie organique à ce stade. Il recevrait de l'azote et de la potasse sous forme minérale, débouchant en sortie sur un engrais organo-minéral. Les teneurs en N-P₂O₅-K₂O finalement retenues pour cet EOM seraient de 5-4-8 %. Elles résultent de la combinaison des critères de viabilité économique, de teneur d'azote sous forme organique requise pour atteindre la norme engrais organo-minéral, de la possibilité d'utiliser ce produit en fertilisation manuelle sur la canne et de l'efficacité agronomique estimée du produit. L'ensemble de cette production, si elle était exclusivement épandue au sein de son territoire de provenance, couvrirait entre la moitié et les deux tiers des besoins nutritionnels des cultures hors prairie en mobilisant la moitié du volume de déchets verts du territoire, encore difficilement valorisé à ce jour.

L'incertitude agronomique entourant le « mythe rationnel »

Les besoins nutritionnels des principales cultures du territoire étaient raisonnablement bien définis. Bien que de réels bilans de masse n'y aient pas été établis, plusieurs décennies d'essais ont permis d'estimer les besoins en éléments majeurs de la canne à sucre réunionnaise pour une gamme de rendements et de sols (Fillols et Chabalière, 2007). Pour les cultures maraîchères, caractérisées par une grande variabilité du besoin en fonction des cultures spécifiques composant ce groupe, le besoin nutritionnel a été approximé par la moyenne, pour les principales cultures, de l'exportation de nutriments pour des rendements, établis par la Chambre d'Agriculture de la Réunion, un peu supérieurs à la moyenne actuelle (Glachant, 2011). Concernant la prairie, le conseil a été basé sur des courbes de dilution surtout établies sur des

graminées tempérées ; il a dû être corrigé sur la base d'analyses historiques pour la prairie de la zone d'étude composée principalement de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) sur andosol car l'estimation du bilan des prairies pâturées sur la base des normes CORPEN donnait des résultats erronés pour la potasse : ces prairies « généreraient » de la potasse (Wassenaar et Queste, 2014).

En spatialisant ces estimations de besoins nutritionnels aux parcelles ou « îlots » du territoire lors de la simulation de scénarios, la représentation produite est entachée d'une imprécision conséquente. Mais la situation est encore toute autre lorsqu'on passe au raisonnement du besoin du sol en amendement. Les informations pédologiques détaillées existantes permettent de distinguer trois grandes « méta-unités » au sein du territoire où les sols présentent un fort lien génétique selon un gradient altitudinal. La plupart des paramètres chimiques d'intérêt agronomique (pH, CEC et taux de saturation en bases, carbone organique et azote total) présentent une évolution monotone avec l'altitude, tout comme les paramètres physiques (densité apparente, profondeur, réserve utile, pierrosité). Si pour le premier ensemble le besoin d'amendement de ces propriétés augmente avec l'altitude, l'inverse vaut pour le second ensemble. En dépit de la relative précision de ces données, raisonner les apports en vue d'une évolution de certaines de ces propriétés n'est encore qu'un lointain mirage. Etablir ces rapports par voie expérimentale nécessiterait l'emploi d'une multitude de matières dans ces situations contrastées sur un temps long. Des modèles, tels que AMG (Andriulo *et al.*, 1999), permettent de prédire l'évolution de la matière organique des sols en intégrant l'estimation au laboratoire de l'indice de stabilité de la matière organique, ISMO. Ils nécessitent cependant un paramétrage pour les sols de la Réunion et pour les différents produits organiques utilisés. De plus, relier l'évolution des stocks de matières organiques à celle des propriétés d'intérêt dans un sol donné est une question qui reste, depuis Magdoff et Weil (2004), toujours sans réponse.

Dans le cas présent, cette incapacité à quantifier le besoin en termes d'amendement du sol n'a pas constitué un frein pour la démarche de co-construction, car en raison de contraintes autres qu'agronomiques, la concertation s'est rapidement focalisée sur une demande agricole en engrais : hormis les maraîchers, les agriculteurs ne pouvaient espérer un rapide retour sur investissement de l'emploi d'amendements organiques dont les fortes contraintes topographiques (fortes pentes et fragmentation parcellaire) limitent par ailleurs sévèrement le potentiel d'apport.

S'exprimer sur l'adéquation entre les apports envisagés et la fonction « engrais » de nutrition devient en conséquence encore plus crucial. Et cela d'autant plus que l'évaluation économique des scénarios (GIRUS, 2013) a montré que leur viabilité dépendait étroitement de l'efficacité des produits envisagés. Mais, si les besoins en nutriments ont donc raisonnablement bien pu être quantifiés, la fourniture directe ou indirecte des nutriments à la culture par les produits organiques apportés dans les conditions tropicales humides de la Réunion demeure peu connue. Face à l'impossibilité de raisonner cette adéquation pour les conditions locales, l'institut de recherche et de développement de la filière sucre, eRcane, vient de mettre en place des essais agrono-

miques pour déterminer les coefficients apparents d'utilisation de l'azote des engrais minéraux et des produits organiques et ainsi établir les coefficients d'équivalence azote (K_{eq}) des principales matières organiques brutes. Mais, si un résultat est attendu au bout de plusieurs années, cela ne permettra pas de s'exprimer sur le cas des autres cultures, ni sur des produits issus d'un mélange et d'une transformation de ces matières brutes. La question de la phytodisponibilité du phosphore, fortement retenu dans les sols aux propriétés andiques, doit également être traitée ; une thèse est en cours au Cirad sur ce sujet. Dans le « guide de la fertilisation organique » établi pour la Réunion (Chabalière *et al.*, 2006), les recommandations restent fondées sur des K_{eq} issus d'expérimentations en conditions de France métropolitaine et portent uniquement sur des résidus bruts et des composts (Fuchs *et al.*, 2014). Pour certains produits organiques (e.g. lisiers), il a cependant été tenu compte d'une volatilisation post-épandage supérieure, aboutissant à des faibles valeurs pour ce coefficient. Vu les conditions climatiques plus favorables à la minéralisation à la Réunion, il se peut que ces recommandations, fondées sur des coefficients faibles, correspondent à des estimations réduites de l'efficacité des matières, bien que le lien entre la minéralisation et la disponibilité pour la plante demeure incertain, dans un contexte de sols tropicaux où le turn-over minéralisation-organisation joue un rôle complexe mais déterminant dans le temps et l'espace. Des expérimentations mobilisant les techniques de marquage isotopique seraient à engager pour préciser ces processus. Suivre ces recommandations pourrait ainsi correspondre à des apports excédentaires et en conséquence à une surestimation des besoins en produits bruts pour alimenter l'usine.

Le principal marché local, l'apport manuel d'engrais sur canne à sucre à la repousse, limiterait selon les participants la quantité de produit à apporter par hectare à un maximum de 2 tonnes (contre 0,8 tonne par hectare pour l'engrais minéral). **Le Erreur ! Source du renvoi introuvable.** indique qu'en employant de tels K_{eq} minimaux, cela induit une exigence en termes de concentration de nutriments qu'un engrais organique ne peut satisfaire : compléter la base organique du co-compost litière-lisier-broyat (CCLLB) du scénario optimal pour atteindre un tel objectif de concentration (à droite dans le graphique, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ferait chuter la part du co-compost dans le mélange à moins de deux tiers, et l'azote issu de cette base organique – même pas entièrement sous forme organique – ne représenterait que de l'ordre de 15% du total. Un tel produit ne satisferait donc pas les critères de la norme pour un engrais organo-minéral. Diminuer quelque peu l'objectif de concentration tout en augmentant la dose permettrait de rentrer dans les critères de la norme tout en réduisant le coût à l'hectare de la fertilisation ! Ce coût devient relativement compétitif autour d'une concentration correspondant à une dose de l'ordre de 2,8 tonnes par hectare. Mais une telle dose risque de priver de justesse la filière imaginée de son marché le plus important. Le K_{eq} très incertain jouant ainsi le rôle d'arbitre on comprend la responsabilité que l'agronomie est amenée à endosser dans la concertation. Ceci met également en lumière l'intérêt de développer la mécanisation de l'épandage là où c'est possible, pour épandre des quantités plus importantes de produits moins concentrés mais moins onéreux.

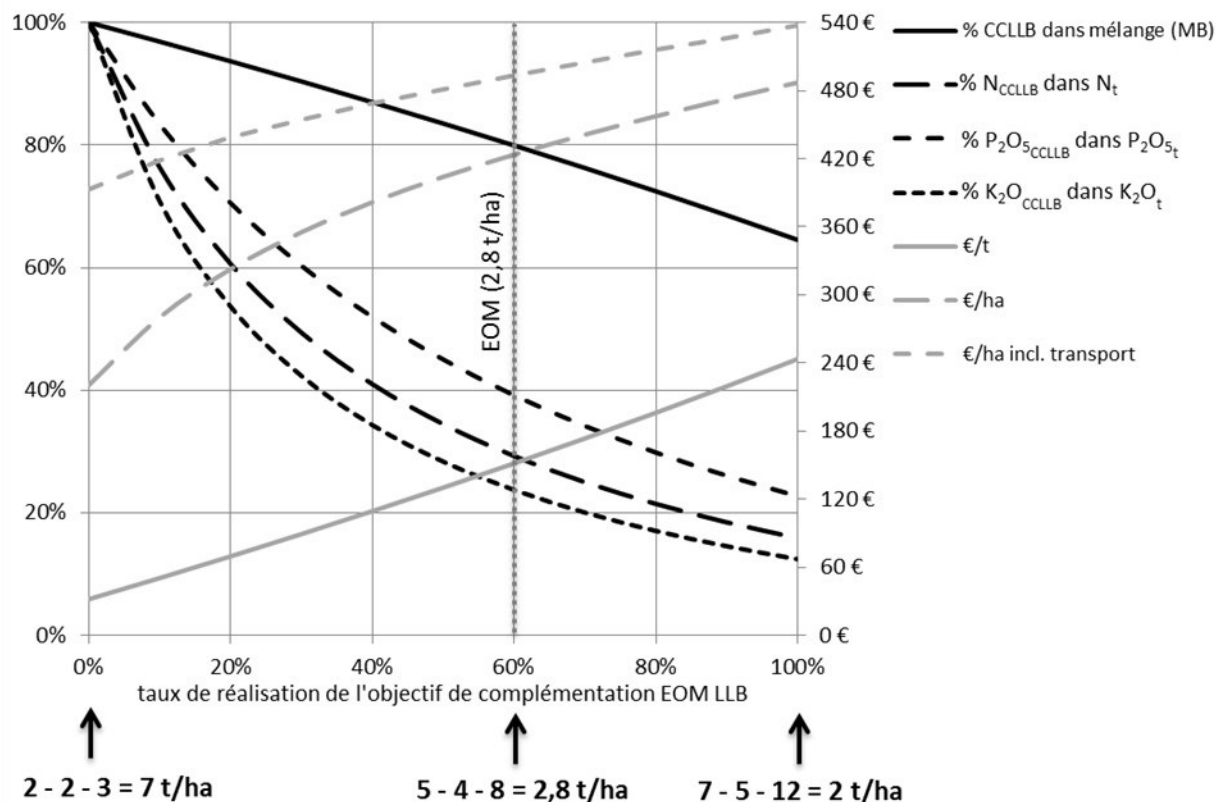


Figure 1 Effet de la complémentation minérale sur la proportion du co-compost à compléter et des éléments majeurs issus de ce co-compost dans le produit final (ordonnée de gauche), et sur le coût de la fertilisation (ordonnée de droite).

Discussion & conclusion

La pertinence de l'approche

La démarche de gestion concertée inspirée du champ de la gestion des ressources naturelles renouvelables se révèle prometteuse. Le recyclage des résidus organiques sous la forme de produits fertilisants induit une coordination entre différents secteurs d'activité constitutifs du métabolisme industriel. A l'issue du processus de concertation, on constate le développement d'échanges entre représentants de ces différents secteurs d'activité et l'émergence d'un discours partagé au sein des acteurs opérationnels, mais aussi au sein des différentes institutions sectorielles. La confrontation des points de vue des différents secteurs d'activité et la prise en compte des attentes, des contraintes sociotechniques et réglementaires de chaque secteur d'activité sont facilitées par l'introduction d'une « promesse plausible » susceptible d'apporter des bénéfices positifs à chacun. Elles facilitent un mécanisme d'enrôlement (Callon, 1981) au cours duquel la place et le rôle de chacun sont progressivement définis.

L'approche systémique mobilisée permet également de légitimer la réflexion collective comme un projet d'intérêt général au niveau territorial, d'une part en pondérant les revendications sectorielles et défenses d'intérêts corporatistes et d'autre part en justifiant la mobilisation d'autres outils de politique publique que les seuls instruments de politique agricole et de protection des captages d'eau.

Les lacunes du référentiel agronomique pour la fertilisation organique

La mise en œuvre de la démarche de concertation à la Réunion confirme l'attente précédemment exprimée : la connaissance agronomique concernant les effets des apports organiques est insuffisante. A cela s'ajoute le changement d'échelle (le passage de connaissances acquises le plus souvent à l'échelle de la parcelle à l'échelle spatiale d'un territoire intercommunal) qui doit tenir compte d'une variabilité parfois extrême dans le contexte pédoclimatique de la Réunion. L'incertitude sur la connaissance des processus biophysiques en jeu se voit donc augmentée par l'imprécision liée aux extrapolations qui s'imposent à l'échelle d'un agrosystème à variabilités peu connues. Ce n'est pas nouveau en soi. En tant que domaine de recherche systémique, l'agronomie est habituée à opérer sous le paradigme post-normal, même si elle ne s'en rend pas toujours compte : on prodigue le meilleur conseil possible dans une situation donnée, puis on l'ajuste en fonction des retours reçus. Ce qui n'est pas habituel c'est que ce conseil flou, formulé dans un espace à variation *a priori* continue, se trouve confronté à un système discret de décisions avec des seuils très nets. Que dans un système de raisonnement à multiples incertitudes on parte sur des hypothèses conservatrices pour éventuellement les ajuster ensuite est tout à fait habituel. C'est bien une telle logique de minimisation du risque – en ce qui concerne l'objectif visé d'une fertilisation efficace – qui a entraîné l'emploi de K_{eq} minimaux dans les scénarios présentés (à noter que cela ne minimise pas le risque environnemental, car ces valeurs faibles peuvent engendrer des effets de surfertilisation et de dégradation possible des ressources naturelles). Si de telles hypothèses bloquaient

l'innovation, alors, l'occasion de les ajuster ne se présenterait jamais. Comme nous l'avons décrit, l'emploi des K_{eq} minimaux dans nos estimations entraîne au bout du compte un conseil d'apport à une dose de $2,8 \text{ t.ha}^{-1}$ qui risque de rendre non viable la filière de fabrication des produits organiques, leur principal marché se situant, aux dires des acteurs présents dans la concertation, sous le seuil de $2,0 \text{ t.ha}^{-1}$. Si ce risque refroidit les entrepreneurs du secteur au point que la filière imaginée ne voit pas le jour, l'incertitude ne sera pas réduite et la situation pourrait rester dans une impasse.

Le besoin d'action dans le type de territoire illustré par le cas de la Réunion est toutefois réel, et les bénéfices potentiels en seraient importants et multiples. L'imprécision due à la variabilité spatiale peut être réduite par diverses voies de modélisation (Guerrin, 2001 ; Paillat, 2011), mais cela ne réduira pas l'incertitude entourant la viabilité du circuit d'engrais organique, liée quant à elle au raisonnement des besoins moyens. Théoriquement il existerait deux options : réduire l'incertitude de la prévision agronomique ou adapter les seuils de décision pour tenir compte de l'incertitude de prédiction. Ce dernier volet a bien été exploré dans le cas de la Réunion (Wassenaar et Queste, 2014) : un ensemble de mesures financières y est envisagé, mais les degrés de liberté sont limités et la marge de manœuvre explorée, comme l'aide à l'investissement et une mesure agro-environnementale en faveur de la fertilisation organique, suffit pour se rapprocher de la limite d'un système économiquement viable fondé sur un coefficient agronomique minimal, mais n'est pas suffisante pour entrer dans une « zone de confort » où la confiance serait de mise.

La situation étudiée à la Réunion n'est qu'un exemple de situations « à rupture métabolique » de cycles de matières qui, par l'urbanisation et l'industrialisation, deviennent rapidement plus fréquentes, surtout au Sud, et où le besoin d'action s'accroît. Et dans la plupart de ces situations règne un niveau de gouvernance et de développement qui ne donne que très peu de perspectives d'ajustement systémique. La réduction de l'incertitude de la prévision agronomique sera donc globalement au Sud encore plus nécessaire qu'à la Réunion. Comment y parvenir ? Au vu de l'état de la connaissance, de sa vitesse de progression et des enjeux cela ne paraît pas déplacé que de lancer un appel pour un investissement d'ampleur dans le domaine de la fertilisation organique et des cycles biogéochimiques.

Pour ce qui est de la fonction « engrais », de l'adéquation entre besoins nutritionnels et apports « locaux » permettant d'économiser des ressources naturelles venant de l'extérieur, il s'agirait de poursuivre avec une intensité accrue sur la voie actuelle : multiplier à la fois les expérimentations en parcelles et l'étude analytique de processus au laboratoire, dans le but d'une modélisation mécaniste – donc utilisable dans une grande variété de situations – de plus en plus exhaustive. Rapprocher les potentiels « engrais » des résidus organiques exprimés au laboratoire des rendements obtenus au champ est un enjeu de l'agronomie au Nord, mais encore davantage au Sud.

Mais, progresser dans la prévision des effets amendants ne revêt pas un enjeu moindre. Dans la situation de la Réunion, l'incapacité d'estimer ces effets, leur temporalité et les bénéfices qui en découleraient est présentée comme peu

dommageable car coïncidant avec une faible demande dans un contexte à fortes contraintes logistiques. Mais on peut regretter qu'une telle incapacité empêche de susciter cette demande. Dans beaucoup d'autres situations, d'importants bénéfices potentiels risquent ainsi de rester inexploités. Cela d'autant plus que les matières les plus aptes à les produire – tels les gisements ligneux – sont souvent également convoitées par des voies de valorisation bien plus immédiates et quantifiables telle la valorisation énergétique. Mais à part augmenter le nombre de sites d'expérimentation longue durée, avec des réponses dont la temporalité et la généralité risquent d'être peu adaptées aux besoins d'information, il est difficile d'établir les priorités de recherche. Modéliser les effets amendants en fonction des pratiques agricoles devrait toutefois être identifié comme un objectif important, non seulement pour en estimer les bénéfices directs, mais également les effets sur la fonction « engrais ». Cela permettrait à terme l'abandon du paradigme encore largement dichotomique pour raisonner ces fonctions et leurs relations conjointement dans toutes leurs dimensions.

Bibliographie

Andriulo, A., Mary, B., Guérif, J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19, pp.365-377.

Bouwen, R., Taillieu, T., 2004. Multi-party collaboration as social learning for interdependence: Developing relational knowing for sustainable natural resource management. *Journal of Community and Applied Social Psychology*, 14(3), pp.137-153.

Chabalier, P.F., Van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006. *Guide de la fertilisation organique à La Réunion*, Saint Denis, France, CIRAD.

Costanza, R., Arge, R., Groot, R. De, Farber, S., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Neill, R.V.O., 1997. The value of the World's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(May), pp.253-260.

Descola, P., 2011. *L'écologie des autres. L'anthropologie et la question de la nature*, Paris, France, Éditions Quae.

Douthwaite, B., de Haan, N.C., Manyong, V., Keatinge, D., 2002. Blending “hard” and “soft” science: the “follow-the-technology” approach to catalyzing and evaluating technology change. *Conservation Ecology*, 5(2), p.13.

Etienne, M., 2011. *Companion modelling - a participatory approach to support sustainable development* Etienne, M. (Ed.), Versailles, France, éditions Quae.

Fillols, É., Chabalier, P.-F., 2007. *Guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion*, Saint Denis, La Réunion, France, CIRAD.

Foster, J.B., 2000. *Marx's ecology: materialism and nature*, New York, Monthly Review Press.

Foster, J.B., 1999. Marx's theory of metabolic rift?: Classical foundations for environmental sociology. *American Journal of Sociology*, 105(2), pp.366-405.

Fuchs, J., Génémont, S., Houot, S., Jardé, É., Ménasseri, S., Mollier, A., Morel, C., Parnaudeau, V., Pradel, M., Vieublé, L.,

2014. Effets agronomiques attendus de l'épandage des Mafor sur les écosystèmes agricoles et forestiers. , in Houot, S. et al. (Eds.), *Rapport de l'ESCo Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier, impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques*, France, INRA-CNRS-Irstea, 364-567.

Funtowicz, S., Ravetz, R., 1993. Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), pp.739-755.

GIRUS, 2013. *Etude d'évaluation économique et réglementaire de circuits de valorisation organique dans le cadre du projet GIROVAR - Phases 3-4 : Evaluation économique des circuits de valorisation organique*, Rapport TCO.

Glachant, A., 2011. *Le raisonnement de la fertilisation des principales cultures de l'Ouest de la Réunion*, Saint Denis, La Réunion, France.

Guerrin, F., 2001. MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33, pp.35-54.

Hardin, G., 1968. The tragedy of the commons. *Science*, 162(June), pp.1243-1248.

Holm, D.B., Eriksson, K., Johanson, J., 1999. Value Through Mutual Creating To Business Network Commitment. *Strategic Management Journal*, 20(5), pp.467-486.

Latour, B., 2015. *Face à Gaïa Les Empêch.*, Paris, France, La Découverte.

Laville, D., 2014. L'écologie industrielle et territoriale, un levier pour mobiliser les acteurs de terrain en faveur de la transition écologique. *Le Point sur ...*, 185, pp.1-4.

Lévêque, C., 2013. *L'écologie est-elle encore scientifique?*, Paris, France, Editions Quae.

Magdoff, F., Weil, R.R., 2004. *Soil organic matter in sustainable agriculture*, Boca Raton, Florida, USA, CRC Press.

Ostrom, E., 1990. *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*, Cambridge, MA, USA, Cambridge University Press.

Paillat, J.M., 2011. *Relation agriculture-élevage. Combinaison d'approches analytiques et systémiques*. Université de la Réunion.

Queste, J., Wassenaar, T., A stakeholder matrix to co-design plausible solutions : A dialogue protocol for adaptive co-management. *Ecology & Society*, sous press.

Reed, M.S., Stringer, L.C., Fazey, I., Evely, A.C., Kruijssen, J.H.J., 2014. Five principles for the practice of knowledge exchange in environmental management. *Journal of Environmental Management*, 146, pp.337-345.

Wassenaar, T. et Queste, J., 2015. La co-construction de filières de recyclage de résidus organiques à la Réunion. *Innovations Agronomiques*, 43, pp.161-175.

Wassenaar, T., 2015. Reconsidering industrial metabolism: From analogy to denoting actuality. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), pp.715-727.

Wassenaar, T., Doelsch, E., Feder, F., Guerrin, F., Paillat, J., Thuriès, L., Saint Macary, H., 2014. Returning Organic

Residues to Agricultural Land (RORAL) – Fuelling the Follow-the-Technology approach. *Agricultural Systems*, 124, pp.60-69.

Wassenaar, T., Queste, J., 2014. *Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à La Réunion - compte-rendu final du projet GIROVAR (2011-2014)*, contrat MAAP/DGER/SDI/BIPI 1004, Saint-Denis, La Réunion.