

SOMMAIRE

Liste des abréviations et définitions	E
Avant-propos	G
Introduction	1
1. Contexte et problématique	2
1.1. L'industrie sucrière sud-africaine	2
1.1.1. Organisation de la filière	2
1.1.2. Organisation des approvisionnements à l'échelle d'un bassin cannier	3
1.2. Les interactions entre acteurs au sein des bassins d'approvisionnement agro-industriels	4
1.3. Intérêts de la modélisation pour améliorer les performances d'un bassin d'approvisionnement	5
1.3.1. La modélisation comme outil de prospection et de négociation	5
1.3.2. Les modèles d'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne	6
1.3.3. Les modèles logistiques	7
1.4. Conclusion : problématique de mon étude	7
2. Matériels et méthodes de travail	10
2.1. Choix de la sucrerie	10
2.2. Collecte des données et analyse de la situation actuelle	10
2.2.1. Les planteurs	11
2.2.2. Les hauliers	11
2.2.3. Le miller	11
2.3. Les étapes de la modélisation	11
2.3.1. Choix des outils de modélisation	11
2.3.2. Conceptualisation et construction du modèle	14
2.3.3. Elaboration des scénarios et évaluation des résultats	14
3. Résultats	15
3.1. Situation actuelle à Noodsberg	15
3.1.1. Description succincte du bassin d'approvisionnement	15
3.1.2. L'approvisionnement de la sucrerie de Noodsberg	17
3.1.3. Description des chaînes logistiques : construction d'une typologie	20
3.2. L'Unité de Production : un concept commun aux deux modèles	26
3.3. Modélisation et simulation de l'organisation des approvisionnements	29
3.3.1. Intérêts et limites d'une réduction de la LOMS	29
3.3.2. Scénarios envisagés	30
3.3.3. Résultats : gains de sucre attendus	31
3.4. Modélisation logistique	34
3.4.1. Présentation générale du modèle	34
3.4.2. Les principes de la modélisation	35
3.4.3. Variables de sortie du modèle	36
3.5. Simulations des scénarios et configurations logistiques	36
3.5.1. Principe des simulations	36
3.5.2. Situation actuelle et validation partielle du modèle	37
3.5.3. Taux de mécanisation 75% - infrastructure actuelle	41
3.5.4. Récolte mécanique 75% - infrastructure plus importante	44
3.5.5. Synthèse du modèle logistique	45
3.6. Synthèse : liens entre modèle d'approvisionnement et modèle logistique	46
4. Discussion	48

4.1. Intérêts et limites de la modélisation appliquée et du lien entre modèle d'approvisionnement et modèle logistique.....	48
4.1.1. Principes de simplification et limites du modèle.....	48
4.1.2. Difficultés à définir et à calculer les notions de potentiel et d'efficacité.....	49
4.1.3. Variables non prises en compte dans les modèles.....	49
4.2. Perspectives : scénarios envisageables par rapport à la mécanisation de la récolte.....	50
4.2.1. Généralisation de la récolte en vert.....	51
4.2.2. Autres scénarios d'intérêt.....	51
4.3. Possibilités d'utiliser cette approche comme aide à la décision.....	52
Conclusion.....	53
Notes.....	54
Bibliographie.....	55
ANNEXES	58

Liste des abréviations et définitions.

Bundle : forme de livraison de la canne à la sucrerie. En anglais ce terme désigne un ballot de canne chaîné de 6 tonnes environ. Par extension on utilise le terme « bundle » pour désigner la canne livrée sous cette forme, les véhicules adaptés au transport de la canne en ballots et les exploitations qui livrent la canne sous cette forme.

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

DRD (Daily Rateable Delivery) : volume de livraison alloué quotidiennement ou droit à livrer. Bien que défini littéralement pour une journée, le DRD désigne souvent, dans le langage des acteurs de la filière et dans les modèles utilisés, le droit à livrer d'un planteur ou d'un groupe de planteurs pour la semaine. On le calcule en divisant le volume livré par le planteur au cours de la saison (estimation) par le nombre de semaines dans la saison.

Haulier : Terme anglais désignant le prestataire de service s'occupant du transport de la canne par camion de la parcelle jusqu'à l'usine.

Hyster : Terme anglais désignant les engins de type monte-chARGE qui sont utilisés dans le centre de réception de la canne de la sucrerie pour décharger les ballots chaînés des camions bundle (cf. Annexe 12).

Livraison directe / livraison indirecte : On différencie deux grands types d'organisation logistique pour la livraison de la canne. Dans la livraison « directe », les véhicules chargés au champ vont directement à l'usine. Dans la livraison « indirecte », les véhicules chargés au champ rejoignent une loading zone où la cargaison est transférée vers des véhicules de plus grande capacité qui assurent l'acheminement de la canne jusqu'à la sucrerie.

Loading zone : littéralement, « zone de chargement ». Désigne l'endroit plat et non cultivé d'une exploitation où les véhicules de livraison de la canne sont chargés. Toutes les exploitations n'ont pas forcément de loading zone, car la canne peut être chargée directement au champ dans certains systèmes logistiques. L'utilisation d'une loading zone différencie les systèmes de livraison « indirects » des systèmes de livraison « directs ». Notons que la canne peut être stockée temporairement sur la loading zone.

LOMS (Length Of Milling Season) : durée de la campagne, c'est-à-dire durée de la période au cours de laquelle la sucrerie reçoit et broie de la canne. Elle se mesure en semaines.

LSG (Large Scale Growers) : littéralement, « planteurs de grande échelle ». Désigne les planteurs dont la production est suffisamment importante pour livrer de la canne tout au long de la saison (concrètement, il faut livrer plus de 225 tonnes RV au cours de la saison). Ce sont généralement des planteurs blancs.

MCP (Miller Cum Planter) : planteurs salariés travaillant dans des exploitations appartenant à l'industriel. Par extension, ces exploitations détenues par l'industriel.

Mill Group Board : conseil d'administration étendu de la sucrerie. Il regroupe des représentants de l'industriel et des planteurs, dont certains membres d'autres conseils plus spécifiques comme le Transport Efficiency Committee.

Miller : terme anglais désignant l'industriel qui possède et qui gère l'activité de la sucrerie. Dans notre étude basée à Noodsberg, le miller est Illovo Sugar Limited.

Millyard : terme anglais désignant le centre de réception de la canne à la sucrerie. Le millyard dispose d'un espace et des infrastructures permettant de peser les véhicules de livraison, de les faire circuler et de décharger la canne sur les tables à canne pour la broyer ou sur le ciment pour la stocker.

RV (Recoverable Value) : littéralement, « valeur récupérable ». Désigne la valeur calculée par l'industriel après analyse de la canne pour déterminer en déterminer la qualité. Ce RV prend en compte non seulement la richesse en sucre de la canne mais également la facilité d'extraction de ce sucre. Le RV est généralement donné en pourcentage du poids total de la canne. (Voir annexe 4 pour plus de détails).

SACGA : South African Cane Growers' Association. En français, « association des planteurs de canne sud-africains ».

SASA : South African Sugar Association. En français, « association sud-africaine du sucre ». C'est l'entité qui organise l'industrie sucrière en Afrique du Sud.

SASMA : South African Sugar Millers' Association. En français, « association des producteurs de sucre sud-africains ».

SASRI : South African Sugar Research Institute. En français, « Institut Sud-Africain de Recherche sur le Sucre ». C'est une sous-entité de la SASA chargée de la recherche agronomique sur la canne à sucre et de la recherche industrielle sur la production de sucre.

Spiller : terme anglais utilisé pour désigner la canne livrée en vrac à la sucrerie, et par extension les véhicules adaptés à ce genre de livraison et les planteurs livrant la canne sous cette forme. Ce terme vient du mot « spill » : déversement en anglais. La canne Spiller est en effet versée en vrac directement sur les tables à canne de la sucrerie.

SSG (Small Scale Growers) : littéralement, « planteurs de petite échelle ». Désigne les planteurs dont la production n'est pas suffisante pour livrer de la canne tout au long de la saison (concrètement, ils récoltent moins de 225 tonnes RV au cours de la saison). Ce sont pour la plupart des planteurs noirs disposant de très faibles surfaces.

Tonnes RV : la multiplication du %RV par le volume de canne livré (en tonnes), donne un tonnage en RV qui est utilisé pour le paiement des planteurs.

Transport Efficiency Committee : Comité regroupant des représentants des planteurs et du « miller » pour traiter des questions stratégiques liées au transport de la canne.

VIMS (Visual Interactive Modelling and Simulation systems) : anglais pour « système de modélisation et de simulation avec interactivité visuelle ». Ces logiciels utilisent une interface graphique comme élément fondamental du processus de modélisation.

Avant-propos

Cette étude a été réalisée en Afrique du Sud, à Pietermaritzburg et dans le bassin d'approvisionnement de la sucrerie de Noodsberg. Elle s'inscrit dans le cadre du projet PROTEA : « Integrated Supply Chain Modelling and Application in Sugar Cane » financé conjointement par l'Etat français (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et Ministère des Affaires Etrangères et Européennes) et par le National Research Fund sud-africain.

Ce projet, d'une durée de deux ans, est mené conjointement par le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et l'University of KwaZulu-Natal (UKZN), en collaboration avec la SASRI (South African Sugar Research Institute).

Commencé en 2006, il fait suite à des travaux de recherche sur l'organisation des approvisionnements agro-industriels menés entre 2002 et 2005 par le CIRAD et la SASRI sur le site de la sucrerie de SEZELA.

Introduction

L'industrie sucrière sud-africaine est à la recherche de nouveaux gains d'efficacité pour rester compétitive sur un marché international de plus en plus concurrentiel. Exportant la moitié de sa production, le pays se retrouve en concurrence avec les plus grands producteurs mondiaux et notamment le Brésil, qui dicte les cours mondiaux en transformant plus ou moins de canne en éthanol en fonction des prix du pétrole. Le contexte évolue également sur le plan national, avec des coûts de production en hausse, une main-d'œuvre moins disponible, l'apparition de la mécanisation dans certaines zones de production et des rendements en baisse ces dernières années à cause de conditions climatiques peu favorables. Chacun des acteurs de la filière cherche donc à augmenter la rentabilité de sa propre activité. Une autre approche consiste à améliorer les relations entre les acteurs pour obtenir une meilleure productivité à l'échelle de la chaîne de production dans son ensemble (Eliashberg et Steinberg, 1987). Le plus souvent, c'est à travers les questions de l'organisation de la filière et de la planification de la production et des approvisionnements que les relations entre acteurs sont abordées. Pour l'agro-industrie sucrière, dont la production est un processus continu, l'organisation de l'approvisionnement des sucreries constitue de fait des opportunités intéressantes d'amélioration de la rentabilité (Iannoni et Morabito, 2006). Plusieurs études ont ainsi montré l'importance des systèmes logistiques pour assurer une livraison continue et uniforme de la canne aux sucreries (Higgins et Munchow, 2003 ; Iannoni et Morabito, 2006).

Que ce soit pour traiter des questions de planification de la production ou d'organisation logistique, la modélisation a été très largement utilisée ces dernières années pour optimiser des systèmes en place ou pour explorer des scénarios alternatifs grâce à la simulation. Dans certains cas, il s'agit d'étudier l'organisation logistique des flux de canne au quotidien grâce à des modèles dits « logistiques ». Dans d'autres cas, il s'agit plutôt d'étudier l'organisation des approvisionnements au pas de temps de la campagne grâce à des modèles dits « d'approvisionnement ». Ces deux types de modèles ont été utilisés en Afrique du Sud pour simuler les flux de canne dans les bassins d'approvisionnement d'usine (Le Gal et al., à paraître ; Barnes, 1998 ; Klein, 1997) mais aucune étude ne traite de leur articulation au sein d'un même site. L'objectif est donc ici d'explorer les possibilités et l'intérêt de coupler un modèle d'approvisionnement à un modèle logistique pour répondre à un problème concret, en l'occurrence l'extension de la mécanisation de la récolte sur le bassin d'approvisionnement de Noodsberg. Cette évolution touche en effet à l'organisation logistique des flux de canne et permet une flexibilité dans les règles d'approvisionnement de la sucrerie. Pour ce faire des enquêtes de terrain ont été réalisées puis des scénarios alternatifs ont été simulés à l'aide d'un modèle d'approvisionnement déjà utilisé par le passé et d'un modèle logistique développé pour l'occasion.

Dans la première partie de cette étude, nous présentons le contexte particulier de l'industrie sud africaine et les travaux déjà existants dans le domaine de la modélisation de l'approvisionnement de la canne aux sucreries. Nous décrivons ensuite la démarche que nous avons suivie, en détaillant le choix des outils de modélisation, puis nous présentons les résultats de l'étude, en commençant par l'analyse de la situation actuelle et la construction des modèles. Dans un deuxième temps, les sorties des modèles sont commentées, ainsi que les principales observations concernant l'articulation entre les deux types de modèle. Enfin, nous revenons en discussion sur l'intérêt et les limites de cette approche, qui ouvre des perspectives pour des études futures.

1. Contexte et problématique

1.1. L'industrie sucrière sud-africaine

1.1.1. Organisation de la filière

La zone de culture de la canne à sucre en Afrique du Sud s'étend du nord du Pondoland, dans la Province de l'Eastern Cape, aux plaines irriguées de la province de Mpumalanga. Des 412000 hectares de canne, près de 68% sont situés sur la frange côtière du KwaZulu-Natal et 17% dans les zones plus arrosées et fraîches des plateaux des Midlands dans la même province (voir la carte de la figure 4).

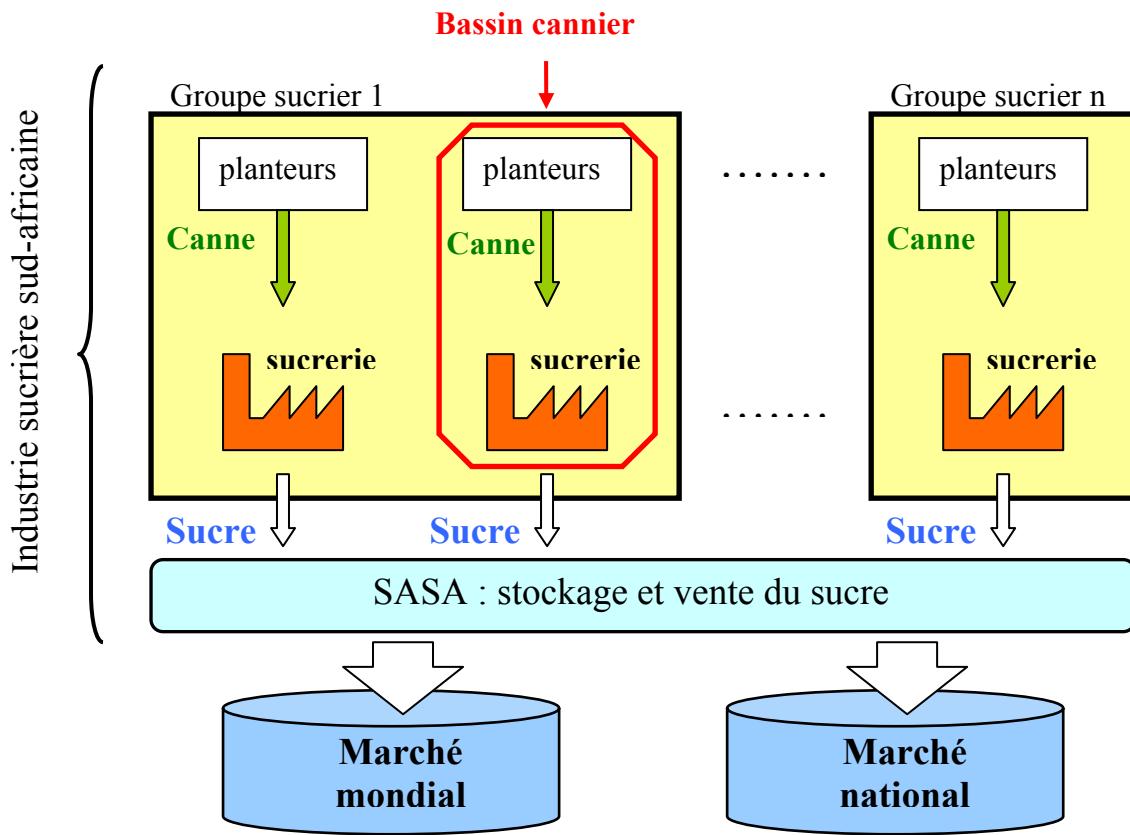
La production annuelle de canne à sucre fluctue autour de 22 millions de tonnes (source : SASA). Près de 80% de ce volume sont produits par des exploitations commerciales de grande taille, ou LSG pour « Large Scale Growers » (1729 en 2006) et 10% reviennent aux exploitations possédées par les groupes sucriers. Ces « Miller-Cum-Planter » (MCP) sont de moins en moins nombreux, les entreprises revendant leurs terres peu à peu. De fait, la grande majorité des planteurs de canne en Afrique du Sud (plus de 45 000) possèdent de toutes petites surfaces (ils sont regroupés sous le titre de « Small Scale Growers » - SSG) si bien qu'ils ne livrent que de très faibles volumes aux sucreries.

Les sucreries sont au nombre de 14 et définissent autant de bassins canniers (figures 1 et 4). Hormis les deux sucreries du groupe Tsb Sugar RSA Ltd, situées dans la province de Mpumalanga, toutes ces sucreries se sont installées dans la province du KwaZulu-Natal. De grands groupes sucriers comme Illovo Sugar Ltd (propriétaire entre autres des usines de Sezela et de Noodsberg) peuvent posséder plusieurs sucreries mais chaque planteur fournit théoriquement l'une des sucreries de façon exclusive. Toutefois, les industriels effectuent parfois des transferts de canne entre sites et peuvent demander à certains planteurs d'une sucrerie de livrer la canne à une autre usine. On parle alors de canne de « diversion ». Les 22 millions de tonnes de canne livrées chaque années donnent environ 2,5 millions de tonnes de sucre. Un peu moins de 50% de ce volume sont vendus sur le marché national. Le reste est destiné à l'exportation et vendu principalement sur les marchés de l'Afrique, du Moyen Orient et de l'Asie.

L'industrie sucrière sud-africaine est organisée autour du partenariat établit en 1935 entre les planteurs de canne et les groupes sucriers industriels et qui réunit la South African Cane Growers' Association (SACGA) et la South African Sugar Millers' Association (SASMA). La South African Sugar Association (SASA) est chargée de gérer ce partenariat ; elle s'occupe notamment de la commercialisation des produits de l'industrie sucrière et de la distribution du montant des ventes entre les différents acteurs de la filière.

La SASA est une organisation financièrement autonome qui opère sans contrôle du gouvernement selon les termes du Sugar Act et du Sugar Industry Agreement tous deux promulgués en 1936. Les diverses activités administratives et industrielles de la SASA (l'association gère notamment la recherche agronomique sur la canne à sucre à travers la SASRI – South African Sugar Research Institute) sont financées par des prélèvements sur la vente du sucre et des mélasses sur les marchés nationaux et internationaux. Le produit net est ensuite réparti entre planteurs et industriels selon un ratio fixe de l'ordre de 64% pour les planteurs et 36% pour les groupes sucriers (cf. Annexe 1).

Figure 1 : L'organisation de l'industrie sucrière sud-africaine (Guilleman, 2002).



La part du produit net qui revient aux planteurs doit être redistribuée en fonction de la quantité de matière première apportée par chacun et du prix de cette matière première. Plutôt que de se baser sur le volume de canne livré – valeur obtenue aisément à l'entrée de la sucrerie – l'apport de chaque agriculteur est mesuré en tonnes de RV (Recoverable Value). Ceci permet de prendre en compte la qualité de la canne dans le paiement et de favoriser ainsi les livraisons de canne riches en sucres extractibles et facilement broyées (taux de pureté élevé). Avant la saison 2000/2001 le paiement était basé uniquement sur le taux de saccharose de la canne. Depuis sept ans maintenant, le système basé sur le RV (cf. annexe 4) permet de prendre en compte les effets de la teneur de la canne en saccharose, en autres sucres (non-saccharose) et en fibre sur la production de sucre. Notons cependant que cet indice rend plus difficile encore la compréhension des impacts des pratiques agronomiques sur la qualité ainsi mesurée du produit brut.

1.1.2. Organisation des approvisionnements à l'échelle d'un bassin cannier

En début de saison, les planteurs font une estimation du volume de canne qu'ils pensent pouvoir livrer à l'usine lors de la campagne. De son côté, l'industriel tente d'estimer la capacité moyenne de broyage que la sucrerie peut atteindre au cours de la saison. En théorie, la LOMS s'obtient tout simplement en divisant le volume estimé par la capacité hebdomadaire de l'usine. Néanmoins, en pratique, le choix de la LOMS est au cœur de nombreux enjeux et la cause de débats permanents entre la sucrerie et les planteurs dont les intérêts peuvent être divergents ; déterminer une valeur optimale de la LOMS pour un bassin cannier donné n'est pas chose aisée (Moor et Wynne, 2001).

Les planteurs réclament généralement une réduction de la LOMS. Leur argument repose sur les variations de la teneur en sucre de la canne au cours de la saison. La courbe RV typique suit en effet une trajectoire en cloche, passant par un maximum pendant les mois d'hiver en milieu de saison. La teneur en sucre de la canne (ou le %RV) est par contre plus faible en début ou en fin de campagne. En concentrant les livraisons lors de la période de forte richesse en sucre, on peut espérer obtenir une production plus élevée et par conséquent de meilleurs revenus. Mais cela suppose de mettre en place des capacités de récolte, de transport et de transformation élevées. La valeur de la LOMS résulte donc de la recherche d'un optimum économique entre ce que l'on perd en production de sucre si l'on étend la durée de campagne et ce que l'on gagne en réduction de capacités le long de la chaîne.

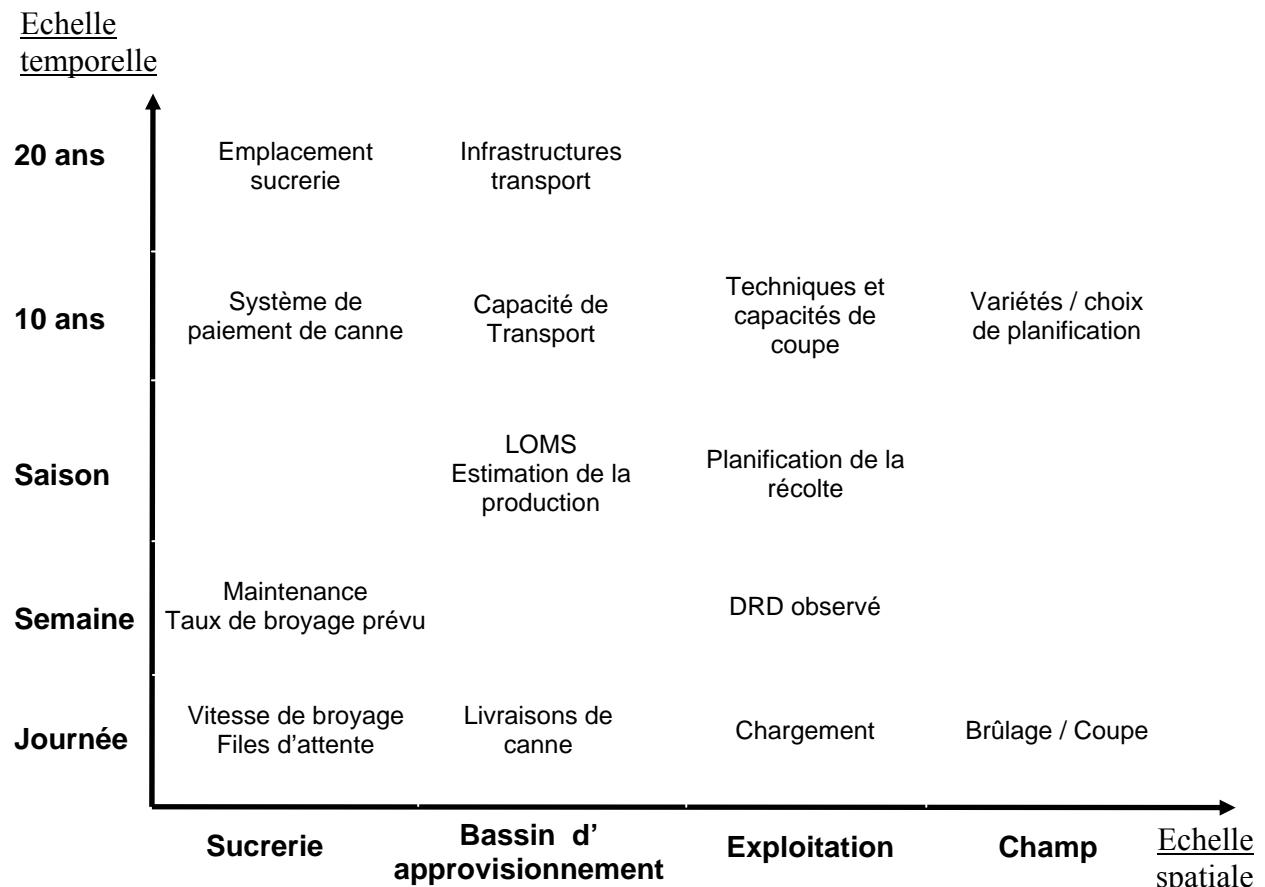
La capacité de broyage d'une sucrerie étant fixée (300 t/h pour Noodsberg), l'industriel ne peut pas s'adapter à des variations importantes du volume de canne qui lui est livré. Le groupe sucrier tient donc à ce que tous les planteurs ayant une production suffisante (LSG) livrent leur canne de façon uniforme au cours de la saison. On accorde par contre aux SSG une certaine flexibilité car ils ne peuvent récolter des volumes suffisants pour livrer tous les jours. Avant le début de la campagne, chaque planteur donne une estimation du volume de sa récolte pour la saison qui commence. Ce tonnage est alors divisé par la LOMS afin d'obtenir le droit à livrer de chaque planteur (en tonnes par semaine). Bien que défini à l'échelle de la journée, on emploiera le terme anglais DRD pour désigner ce volume de canne devant être livré par un planteur chaque semaine. Ces DRD sont recalculés au cours de la saison, en fonction du tonnage déjà livré et des nouvelles estimations concernant le volume de canne qu'il reste à couper.

1.2. Les interactions entre acteurs au sein des bassins d'approvisionnement agro-industriels

La recherche de gains d'efficacité au sein d'un bassin d'approvisionnement agro-industriel est souvent cloisonnée et se limite à des améliorations à l'un de ses échelons. Dans le cas de l'industrie sucrière, par exemple, le planteur essaie d'augmenter ses rendements ou la qualité de ses cannes tandis que l'industriel tente de maximiser l'utilisation de sa sucrerie. Bien que les efforts de chacun contribuent généralement à augmenter la productivité de l'ensemble, il convient d'étudier le système dans son ensemble en s'intéressant notamment aux interactions complexes entre les acteurs qui comptent tout autant pour la rentabilité de l'ensemble que les actions individuelles (Eliashberg et Steinberg, 1987). On travaille alors à l'échelle de la « supply chain », définie comme « un ensemble de relations entre des fournisseurs, des industriels, des distributeurs et des revendeurs qui facilite la transformation de la matière première en produits finis » (Beamon, 1998). Ces relations concernent aussi bien les modalités de paiement, la planification et la gestion des flux de matière première et d'informations que les activités logistiques tout au long de la chaîne (Chen et Paulraj, 2004). La supply chain se retrouve alors au cœur de l'analyse de compétitivité et de l'amélioration de l'efficacité d'une filière (Croom et al., 2000).

Dès lors que l'on travaille au niveau de tout ou partie d'une supply chain, on se doit d'avoir une vision d'ensemble qui intègre les décisions prises par différents acteurs sur des pas de temps très variables et leurs interactions (cf. figure 2). Ainsi, les décisions concernant la planification de l'approvisionnement de la sucrerie doivent prendre en compte les éléments qui caractérisent le bassin d'approvisionnement (de l'exploitation à la sucrerie) sur un pas de temps allant de la semaine au moyen terme.

Figure 2 : décisions prises par les acteurs de l'industrie sucrière à différentes échelles du temps et de l'espace.



Les décisions prises par l'industriel, comme la capacité et la localisation de la sucrerie jouent sur les choix réalisés par les planteurs en matière de mécanisation et d'organisation de la récolte. A l'inverse, les choix réalisés par les planteurs concernant les variétés, les capacités de récolte et l'organisation du travail ont un impact sur l'utilisation de la sucrerie (Gaucher et al., 2004). Typiquement, la valeur de la LOMS résulte d'un compromis entre les souhaits et les contraintes des différents acteurs et n'a donc de sens qu'à l'échelle du bassin d'approvisionnement dans son ensemble.

1.3. Intérêts de la modélisation pour améliorer les performances d'un bassin d'approvisionnement

1.3.1. La modélisation comme outil de prospection et de négociation

Un bassin d'approvisionnement est un système complexe au sein duquel interagissent des acteurs autonomes aux intérêts parfois divergents. Pour analyser ces situations la modélisation s'avère être un outil appréciable et permettant d'apporter des solutions aux problèmes rencontrés (Georgiadis et al., 2005). A l'échelle du bassin d'approvisionnement, les questions de planification qui se posent s'inscrivent souvent dans le moyen terme ou le long terme et s'apparentent alors à de la prospection. Bien des questions nous obligent à nous projeter vers des scénarios très différents de la situation actuelle, voire inédits. La modélisation présente de ce point de vue plusieurs avantages : elle permet de tester des scénarios qu'il serait

impossible, ou du moins difficile, de mettre en place dans la réalité, de tester un nombre élevé d'hypothèses dans un temps relativement court, le tout avec des risques et un coût réduits.

De nombreux chercheurs soulignent par ailleurs l'intérêt de la modélisation comme outil de communication ou de rapprochement entre les acteurs d'une même filière (Roy, 1992 ; McCown, 2002) en comparant des scénarios « what-if » où les caractéristiques clés de leurs relations sont étudiées (Gaucher et al., 2004). Pour Nakhla et Soler (1996), la modélisation peut ainsi faciliter les négociations et contribue, in fine, à augmenter la rentabilité de la filière dans son ensemble. Par ailleurs, l'étape de construction du modèle permet de mettre le doigt sur les points de désaccords et les interfaces critiques entre les acteurs au sein du bassin d'approvisionnement (Dube, 2007). De nombreuses études ont été effectuées au cours des dernières années sur la création de valeur dans les industries sucrières mondiales, notamment en Australie, en Afrique du Sud et au Brésil (Higgins et al., *in press*). La modélisation y est très souvent utilisée, en particulier dès qu'il s'agit de problèmes logistiques, d'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne ou de modes de paiement.

1.3.2. Les modèles d'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne

La plupart des outils de modélisation utilisés pour traiter des questions d'organisation des approvisionnement dans l'industrie sucrière sont basés sur l'optimisation et consistent à trouver la « one best way » (Dube, 2007). Plusieurs études menées en Australie visent à maximiser la production de sucre et le revenu global à l'échelle du bassin en déterminant les meilleures dates de récolte et la longueur des cycles de culture pour une série d'unités de production (Higgins et al., 1998 et 2003). Le modèle fournit une solution optimale de planification des récoltes, pour une structure et une capacité de la supply chain donnés. Plus récemment, des modèles d'optimisation ont été utilisés au Venezuela afin de déterminer les meilleures façons d'assurer un approvisionnement régulier d'une sucrerie au moindre coût (Grunow et al., 2007). Si ces modèles permettent de proposer une solution « optimale », celle-ci est généralement difficile à mettre en place car les intérêts et les contraintes des planteurs et des industriels sont souvent divergents. Dans la situation sud-américaine où la sucrerie possède et gère les exploitations, il est plus aisément de mettre en application des solutions qui ont été calculées à l'origine pour être optimales à une échelle collective. En Afrique du Sud, l'organisation de la filière ne se prête pas vraiment à l'utilisation de modèles d'optimisation car les planteurs sont indépendants et ne sont pas prêts à renoncer à leur liberté de planifier leurs propres chantiers de récolte.

Une approche différente a été développée à la Réunion pour traiter des cas où de nombreux acteurs indépendants interagissent (Gaucher et al., 2004). Le principe est d'évaluer et de comparer des scénarios d'approvisionnement différant par leurs capacités tout au long de la chaîne d'approvisionnement et par les règles d'approvisionnement qui sont envisagées. Le modèle permet de comparer les scénarios sur la base de la production de sucre à l'échelle du bassin cannier. L'objectif de ce genre de simulation n'est pas de fournir une solution idéale, qui serait de toutes façons difficilement applicable dans le contexte étudié, mais d'explorer plusieurs voies et d'alimenter une discussion entre les acteurs. Ce type de modélisation, déjà utilisé avec succès à Sezela (Le Gal et al., *à paraître*), nous semble mieux convenir pour traiter de l'organisation des approvisionnements des sucreries sud-africaines. A Sezela, l'application d'une démarche de simulation de l'organisation des approvisionnements a ainsi montré qu'une intégration de la qualité de la canne, par un découpage du bassin de collecte et une gestion différenciée des droits à livrer, pourrait être à l'origine de gains de production.

1.3.3. Les modèles logistiques

Bien que les modèles d'optimisation soient très appréciés en logistique, la simulation est généralement utilisée quand le problème étudié est trop complexe pour être traité par des modèles analytiques tels que les « queuing theory » ou par des techniques d'optimisation numérique comme la programmation linéaire (Turban and Meredith, 1981). La simulation s'avère particulièrement utile pour les modélisations de files d'attente dans des systèmes dynamiques (Robinson, 1992).

Les simulations logistiques peuvent être effectuées sur des supports très différents. Une méthode de type Monte Carlo a été utilisée par Lee (1978) pour modéliser le système d'approvisionnement de la canne en Jamaïque. Barnes (1998) donne quelques détails sur des études logistiques réalisées à l'aide de simulation « pas à pas » sur tableau ou d'algorithme en langage de programmation générique. D'une façon générale, l'utilisation de l'une de ces trois méthodes demande une connaissance approfondie en programmation. Par ailleurs, les simulations « pas à pas » ne conviennent pas aux pas de temps trop courts.

D'autres outils de modélisation semblent mieux convenir aux exigences et aux contraintes de travaux sur des systèmes complexes. Il s'agit notamment des VIMS (Visual Interactive Modelling and Simulation systems). Ces logiciels utilisent une interface graphique comme élément fondamental du processus de modélisation. ARENA™ a par exemple été utilisé en Afrique du Sud pour modéliser le transport de canne à sucre par Cargo Carriers à la sucrerie de Komati. L'objectif était d'envisager des scénarios permettant de mieux utiliser la flotte de camions de l'entreprise de transport (Klein, 1997). Sur l'usine de Sezela, une première étude a porté sur l'organisation du milliard pour réduire les temps de déchargement des camions (Schaller, 1997). Barnes (1998) s'est intéressé à la diminution du délai entre coupe et broyage (HTCD, pour Harvest To Crush Delay) à l'échelle du bassin d'approvisionnement. Ce même logiciel a également été utilisé au Brésil pour analyser les performances du système de réception des cannes d'une sucrerie de l'Etat de São Paulo (Iannoni et Morabito, 2006). L'étude de scénarios alternatifs d'organisation de la sucrerie a montré que de petites modifications dans les règles de décision peuvent entraîner des changements importants dans le fonctionnement du système. A La Réunion et à l'Île Maurice, le logiciel Witness© a été utilisé pour évaluer l'impact de changements logistiques sur les capacités de transfert des planteurs (Loison, 1999). D'autres travaux ont également été effectués pour dimensionner les capacités de récolte en fonction de la capacité de broyage de la sucrerie (Arjona et al., 2001).

1.4. Conclusion : problématique de mon étude

Une multitude d'études ont été menées sur les aspects logistiques sur du court terme (day-to-day), mais très peu se sont penchées sur cette question en tenant compte de l'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne (Grunow et al., 2007). En effet, les travaux réalisés en logistique s'intéressent essentiellement au problème du transport en soi, avec une mesure de la réussite basée sur une réduction des délais ou du nombre de véhicules nécessaires. Par ailleurs, les études portant sur des questions d'organisation des approvisionnements telles que celles réalisées à Sezela n'attachent pas autant d'importance aux aspects logistiques au quotidien pour se concentrer sur la définition de scénarios d'organisation et de règles d'approvisionnement à l'échelle de la campagne. Evidemment, ces scénarios prennent en compte des données logistiques, comme les capacités de récolte ou de transport, afin d'assurer la cohérence et la faisabilité des scénarios proposés (Le Gal et al.,

2004). Néanmoins, le détail des chaînes logistiques qui permettent d'acheminer la canne dans chacun des scénarios n'est pas abordé.

A travers cette étude, nous souhaitons donc avant tout explorer l'intérêt (et la possibilité) de couplage entre un modèle d'approvisionnement et un modèle logistique pour répondre à une question d'organisation du bassin d'approvisionnement. L'objectif méthodologique est de comprendre les articulations qui existent entre ces deux types de modèles et d'identifier les difficultés ou les limites de leur intégration à l'échelle du bassin d'approvisionnement.

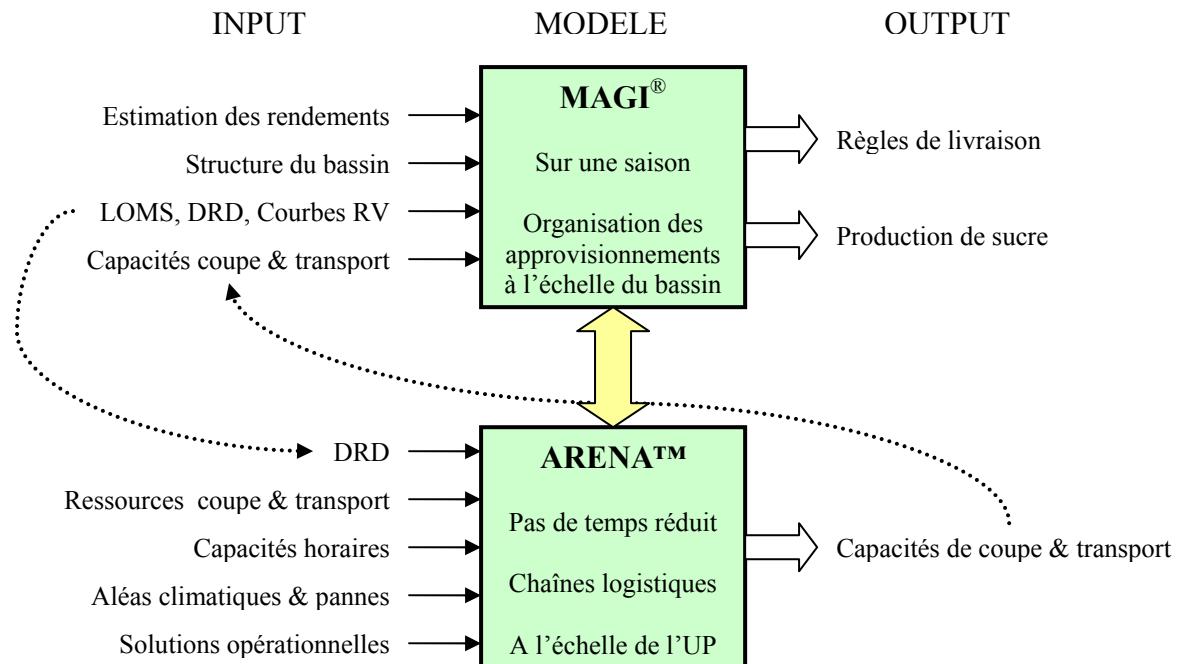
La question que nous traitons est celle de l'évolution de la mécanisation de la récolte car les enjeux soulevés se situent à la fois sur le plan de l'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne et sur le plan de la logistique. En effet, cette importante modification technique bouleverse l'organisation du bassin cannier à bien des niveaux et en font un excellent domaine d'application pour notre étude. Par ailleurs, l'impact de la mécanisation sur l'organisation des approvisionnements des sucreries est un des sujets les plus en verve au sein de la recherche sur la canne à sucre et parmi les acteurs de l'industrie sucrière sud-africaine.

La mécanisation de la récolte devrait amener une plus grande capacité de coupe et une flexibilité supérieure dans l'organisation des approvisionnements. Dès lors, nous pouvons envisager de mettre en place des scénarios d'approvisionnements différents de ceux qui existent aujourd'hui. Les questions qui se posent alors sont les suivantes :

- quels scénarios de planification peut-on envisager à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement pour tirer profit de la capacité de coupe importante des machines de récolte ?
- quelles seraient les conséquences de la mise en place de tels scénarios sur l'organisation logistique du bassin ?
- peut-on dimensionner le système logistique correspondant sous différentes hypothèses de taux de mécanisation ?

La figure 3 ci-dessous introduit de façon schématique quelques uns des points sur lesquels nous devons nous pencher pour répondre à ces questions dans un effort d'articulation de deux modèles. Il nous faut mettre en relation des concepts définis à des pas de temps et à des niveaux de détail différents. En outre, les questions posées dans notre problématique ne peuvent être résolues qu'en utilisant les sorties d'un modèle comme variables d'entrée de l'autre. Ainsi, les résultats du modèle d'approvisionnement n'ont de sens que si les capacités tout au long de la chaîne sont correctement déterminées. Pour ce faire, nous devons utiliser le modèle logistique en prenant soin d'être cohérents dans la façon dont nous adaptons d'un modèle à l'autre les concepts qui sont au cœur de notre problème. L'un des enjeux de l'étude consiste notamment à trouver au modèle logistique un pendant aux notions de LOMS et de DRD, qui sont traditionnellement définies à l'échelle de la campagne.

Figure 3 : cadre théorique du couplage entre un modèle d'approvisionnement (MAGI[®]) et un modèle logistique (ARENATM).



2. Matériels et méthodes de travail

Nous présentons ici la démarche qui a été suivie pour la réalisation de cette étude ; l'occasion de revenir sur le choix de la sucrerie et les grandes étapes du travail réalisé : une étude diagnostique de la situation actuelle a permis de conceptualiser le bassin cannier afin de pouvoir le modéliser sous deux modèles différents. Une fois les deux modèles construits, des scénarios alternatifs mêlant logistique et règles d'organisation des approvisionnements ont été élaborés autour des questions de mécanisation de la récolte.

2.1. Choix de la sucrerie

La sucrerie de Noodsberg a été retenue comme terrain d'étude pour notre travail. Les dirigeants de la sucrerie ayant approché la SASRI et l'Université du KwaZulu Natal pour travailler sur des problèmes de logistique, nous étions tout naturellement amenés à travailler sur ce site. Les problèmes soulevés par le *transport efficiency committee* de Noodsberg montrent que les préoccupations actuelles des différents acteurs de la zone sont bien en relation avec les questions de mécanisation de la récolte et de problèmes logistiques concernant le transport de la canne. Il faut dire que le bassin cannier de l'usine de Noodsberg, situé sur les plateaux des Midlands, dispose de conditions favorables à un accroissement de la mécanisation de la récolte, ce qui n'est pas vraiment le cas à Sezela, situé dans une zone de forts reliefs sur la côte.

D'un point de vue pratique, la proximité de la sucrerie (35 km de Pietermaritzburg) fait de Noodsberg le terrain d'application idéal aux recherches menées par l'Université du KwaZulu-Natal. D'autres projets lancés au cours de l'année et traitant de divers aspects du transport de la canne y seront conduits également.

2.2. Collecte des données et analyse de la situation actuelle

Etant donné que notre travail se situe à l'échelle de tout le bassin d'approvisionnement, il a fallu recueillir des informations sur chacun des acteurs intervenant dans la chaîne d'approvisionnement et se forger également une vision d'ensemble permettant de comprendre les interactions qui organisent la filière.

La consultation de la bibliographie, et notamment des documents de la SASA et de la Noodsberg Canegrowers' Association, a offert un premier aperçu de la situation actuelle. Ces informations ont été complétées ensuite par des entretiens sur le terrain avec les planteurs, les responsables de la sucrerie de Noodsberg, des conseillers et des chercheurs de la SASRI. Ces entretiens ont été menés sur le mode d'une conversation libre mais raisonnée qui permet de reconstruire pas à pas les objectifs, le fonctionnement, les paramètres technico-économiques et les problèmes du système étudié. Ils ont été réalisés en ayant déjà à l'esprit certaines hypothèses ou pistes de réflexion pour la modélisation. Aucun questionnaire rigide à questions fermées n'a été utilisé afin de faciliter la discussion spontanée. Néanmoins, certains points récurrents et caractéristiques essentielles pour la modélisation ont systématiquement été abordés. De nouvelles visites ont été effectuées en cours de modélisation afin de compléter certaines données, de confirmer ou d'infirmer quelques points clés. Enfin, certaines données sous forme informatique ont été recueillies auprès de la sucrerie, de la SASA et de la SASRI avant d'être retravaillées avec les outils appropriés.

2.2.1. Les planteurs

Dix entretiens avec des planteurs (Tableau 1) ont permis de découvrir les différentes chaînes logistiques existant dans le bassin de Noodsberg et d'en comprendre les rouages. Les exploitations visitées ont été choisies avec l'aide d'un conseiller de la SASRI afin d'avoir une diversité de situations dans un échantillon réduit.

Tableau 1 : liste des exploitations visitées.

Nom du planteur	Ecozone	Récolte Mécanique ?	Distance ferme-usine	Superficie en canne (ha)	Autre source de revenus ?
P.S.	4	Oui – en propre	~ 10 km	450 (50%) ^a	oui ^b
K.J.K.	4	Oui – en propre	~ 8 km	240 (52%)	oui
R.F.	8	Oui – en propre	30 km	280 (65%)	oui
E.G.	3	Oui - contractualisé	23 km	220 (52%)	non
B.M.	4	Oui - contractualisé	8 km	165 (52%)	non
R.V.	1	Non	50 km	550 (55%)	oui ^b
S.H.	4	Non	~ 25 km	800 (51%)	oui ^b
E.S.	5	Non	< 4 km	415 (50%)	non
V.R.	8	Non	28 km	260 (60%)	non
S.T.	7	Non	24 km	90 (100%)	oui ^b

^a : pourcentage de la superficie en canne qui est coupée chaque année.

^b : planteur de canne exploitant par ailleurs plus de 10 ha de pins, eucalyptus ou acacia

2.2.2. Les hauliers

Pour des raisons historiques l'essentiel du transport de la canne est réalisé par les planteurs eux-mêmes. Cette situation très spécifique de Noodsberg est néanmoins en train de changer, les planteurs choisissant de plus en plus de faire appel à d'autres planteurs, ou plus rarement à des entreprises, spécialisés dans le transport. Les informations concernant le transport ont donc été recueillies auprès des planteurs cités ci-dessus, S.T. étant l'un des planteurs offrant ses services pour le transport de la canne grâce à sa flotte de camions AgriTrans.

2.2.3. Le miller

Les informations concernant la sucrerie, ses caractéristiques et son fonctionnement nous ont été transmises par le responsable des approvisionnements de Noosdberg, qui a pu éclaircir quelques points concernant l'organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne ou de la semaine. Le responsable du milliard (centre de réception) nous a fourni les explications concernant l'organisation du milliard au cours de deux visites à la sucrerie.

2.3. Les étapes de la modélisation

2.3.1. Choix des outils de modélisation

a) MAGI® : définition des concepts et objectifs

Pour traiter de l'organisation des approvisionnements et simuler différents scénarios à l'échelle du bassin de collecte, nous utilisons un outil dont les bases conceptuelles ont été conçues par le CIRAD à la Réunion (Gaucher, 1996-1997) et qui a été développé ensuite sur

les cas réunionnais et sud-africains : MAGI®. Il permet de simuler la production de sucre d'une sucrerie en fonction des capacités de récolte et de transport tout au long de la chaîne, de la qualité de la canne livrée et des règles de décision adoptées pour organiser les approvisionnements. Ce modèle, fonctionnant sur un pas de temps hebdomadaire, est basé sur une représentation simplifiée des différents acteurs du bassin cannier, de leurs contraintes et de leurs interrelations. La première étape de modélisation consiste donc à caractériser les trois groupes d'acteurs qui structurent le bassin d'approvisionnement : les unités de production, les opérateurs intermédiaires et l'usine.

L'usine est définie par sa capacité de broyage hebdomadaire, sa capacité technologique d'extraction et son temps de fonctionnement. Ces deux caractéristiques varient respectivement en fonction de la qualité de la canne et des arrêts dus à l'entretien ou aux pannes. Etant donné que l'industriel cherche à saturer la capacité de la sucrerie, celle-ci peut être vue comme une demande en canne (Guilleman, 2002).

Les unités de production (UP) sont définies comme des « entités élémentaires traitées comme étant homogènes du point de vue de la qualité des cannes livrées, de leur débit potentiel de chantier et des règles qui leur sont appliquées par l'usine pour planifier et gérer les approvisionnements » (Le Gal et al., 2006). Chaque UP est caractérisée par un tonnage de canne à livrer à l'usine au cours de la saison et par une courbe de qualité de la canne récoltée.

Enfin, on regroupe sous le terme opérateurs intermédiaires (OI) tous les prestataires de service qui contribuent à acheminer la canne depuis les UP jusqu'à l'usine. Harvest contractors (chargés de récolter la canne pour certains planteurs) et hauliers (entreprises ou planteurs spécialisés dans le transport de la canne) sont caractérisés par leur capacité de transfert de la canne entre les UP et l'usine. Une description des acheminements permet d'attribuer chaque OI à une UP particulière.

Une fois le bassin cannier correctement défini, la campagne peut être planifiée. MAGI® offre la possibilité de personnaliser chaque règle de décision et de simuler des aléas en cours de saison, notamment des pannes à l'usine ou des chutes de capacité au niveau de la récolte ou du transport. Par défaut, le modèle calcule la durée de la saison et les DRD pour chaque UP en fonction (i) du volume de canne total devant être broyé à l'usine, (ii) de la capacité de l'usine et (iii) du volume de canne livré par chaque UP (Lejars et al., *accepté*). Le modèle respecte la règle de répartition uniforme des DRD tout au long de la saison.

Calcul de la durée de saison (DS) :

$$DS = (\sum Ton_i) / \max (CrushMillWk_k)$$

Calcul des droits à livrer (DRD) :

$$DRD_i = Ton_i / DS$$

Avec

DS = durée de saison calculée par MAGI ou LOMS simulée (semaines)

DRD_i = 'Daily' Rateable Deliveries de l'UP_i (tonnes/semaine)

Ton_i = tonnage total livré par l'unité de production i

CrushMillWk_k = capacité de broyage de l'usine (t/h) au cours de la semaine k

La durée de campagne DS est généralement inférieure à la LOMS observée sur le terrain car en réalité, l'usine ne tourne pas toujours à pleine capacité lorsqu'elle est en fonctionnement. MAGI® nous donne donc la possibilité d'utiliser la LOMS réelle plutôt que la LOMS calculée.

La simulation permet finalement de calculer une production de sucre à la fin de la campagne, en fonction des volumes de canne livrés, de la richesse en sucre de celle-ci, et de la capacité technologique d'extraction de l'usine. Les épisodes de sous capacité du système sont signalés à la fin de la simulation, mais les résultats ne sont pas corrigés pour prendre en compte ces problèmes de dimensionnement (Lejars et al., *accepté*).

b) Modélisation logistique avec ARENA™

Le nombre excessif de véhicules qui approvisionnent la sucrerie et les problèmes d'attente à l'entrée du site qui en résultent font partie des préoccupations principales à Noodsberg (*Rapport Efficiency Committee*, 2006). Le modèle logistique que nous devons utiliser doit donc être capable de représenter des structures de type « file d'attente » dans un système qui évolue dans le temps. Pour traiter des aspects logistiques, nous privilégions donc une approche par simulation.

La modélisation a été réalisée avec le logiciel de simulation industrielle : ARENA™, déjà utilisé par Barnes à l'Université du KwaZulu Natal en 1998. ARENA™ est construit autour d'un réseau le long duquel circulent des entités qui progressent de nœud en nœud. Le mot « entité » est un terme générique utilisé pour désigner une personne, un objet ou unité de base – qu'elle soit réelle ou abstraite – dont les déplacements à travers le réseau peuvent provoquer des changements d'état du système (Barnes, 1998). A chaque point du réseau les entités sont retenues pendant un certain temps (éventuellement nul) correspondant au délai nécessaire à une opération ayant lieu en ce point.

ARENA™ utilise un langage de programmation SIMAN/Cinema. Ce modèle est divisé en deux composants : un composant qui décrit les éléments physiques du système et les liens logiques qui les relient et un composant qui décrit les conditions expérimentales. Dans notre étude, ces conditions expérimentales, qui varient d'un scénario à l'autre, peuvent être des volumes de canne à récolter, des distances ou des vitesses de transport, ...etc. On peut donc toucher aux conditions expérimentales sans modifier la base du modèle.

Lorsque l'utilisateur construit son modèle grâce à l'interface graphique, le programme en SIMAN/Cinema qui gère la simulation est automatiquement généré. Cela facilite la modélisation pour un utilisateur qui n'a pas le bagage nécessaire en programmation. Par contre, la conceptualisation d'un modèle sous interface graphique peut être assez coûteuse, en temps aussi bien que financièrement. Par ailleurs, il est primordial que le modélisateur comprenne les principes sous-jacents du modèle et sache interpréter les résultats des simulations à la vue du système qu'il a construit. Comme tout modèle, celui-ci a une logique qui peut être bien différente de la situation réelle.

L'un des intérêts majeurs d'un logiciel comme ARENA réside dans la possibilité d'animer le modèle et de donner une représentation visuelle, dynamique et spatiale des flux et des éléments du modèle. Très appréciable, cette fonctionnalité permet entre autres au programmeur de vérifier au cours de la construction du modèle que celui-ci fonctionne bien comme il l'entend. Si la validation globale n'est pas aisée, nous avons tenté de réaliser une validation partielle du modèle au fur et à mesure de sa construction en vérifiant systématiquement qu'aucune distorsion excessive de la réalité n'apparaissait, notamment au niveau des délais à différents niveaux de la chaîne d'approvisionnement.

2.3.2. Conceptualisation et construction du modèle

L'étude réalisée dans un premier temps a permis de constituer une typologie d'acteurs et de comprendre la complexité du système dans son ensemble. Complexité qu'il a fallu simplifier et conceptualiser avant de chercher à modéliser le bassin d'approvisionnement. Nous avons cherché à rendre cette conceptualisation du bassin suffisamment flexible pour convenir à la fois au modèle d'approvisionnement et au modèle logistique, sans en compromettre la simplicité. C'est notamment à ce stade que se construit le lien entre modélisation logistique et organisation des approvisionnements. Une fois établie la base conceptuelle qui nous permet de représenter le bassin de façon simplifiée, nous avons pu construire les deux modèles puis les utiliser pour les simulations.

2.3.3. Elaboration des scénarios et évaluation des résultats

a) Elaboration des scénarios

Le principe est d'étudier des alternatives tranchées, voire des situations extrêmes, afin de mettre en évidence les points critiques du système étudié. L'objectif consiste également à explorer des scénarios qui aient des répercussions sur la logistique et l'organisation des approvisionnements. Dans ce cas, une réflexion permettant de relier modèle logistique et modèle d'approvisionnement s'avère nécessaire, notamment en ce qui concerne les capacités de coupe et de transport. Etant donné le temps réduit dont nous disposons pour construire le modèle et lancer les simulations, nous nous limitons aux scénarios suivants :

- Faible taux de mécanisation. Ce scénario permettant essentiellement de comprendre la logique du système d'approvisionnement et de valider en quelque sorte le modèle, ne serait-ce que dans la cohérence des réactions du système à différents changements d'organisation.
- Fort taux de mécanisation de la récolte. Ce scénario nous permet de tester les limites de certains systèmes dans des situations extrêmes.
- A l'échelle de la saison, nous avons comparé des scénarios différant sur le plan de la durée de campagne (LOMS)
 - avec l'infrastructure actuelle (capacité de broyage de l'usine : 300 t/h)
 - avec une infrastructure supérieure (capacité de broyage de l'usine : 340 t/h)

b) Evaluation des résultats obtenus

Les scénarios simulés ont été évalués sur la base de critères simples :

- les configurations logistiques permettent-elles de répondre à la demande de la sucrerie, en offrant des capacités de coupe et de transport suffisantes ? En d'autres termes, chaque unité de production est-elle capable de livrer sur une journée le volume de canne qui lui est alloué ?
- quelle est la production de sucre attendue pour chacune des LOMS simulées ?

Par ailleurs, une présentation des résultats organisée le 25 juillet 2007 devant les principaux intéressés a permis de confronter les résultats à la réalité du terrain. Ont participé à la discussion le Mill Group Board et le Transport Efficiency Committee de Noodsberg, des chercheurs de la SASRI et de l'Université du KwaZulu Natal, ainsi que les personnes interrogées au cours de l'étude.



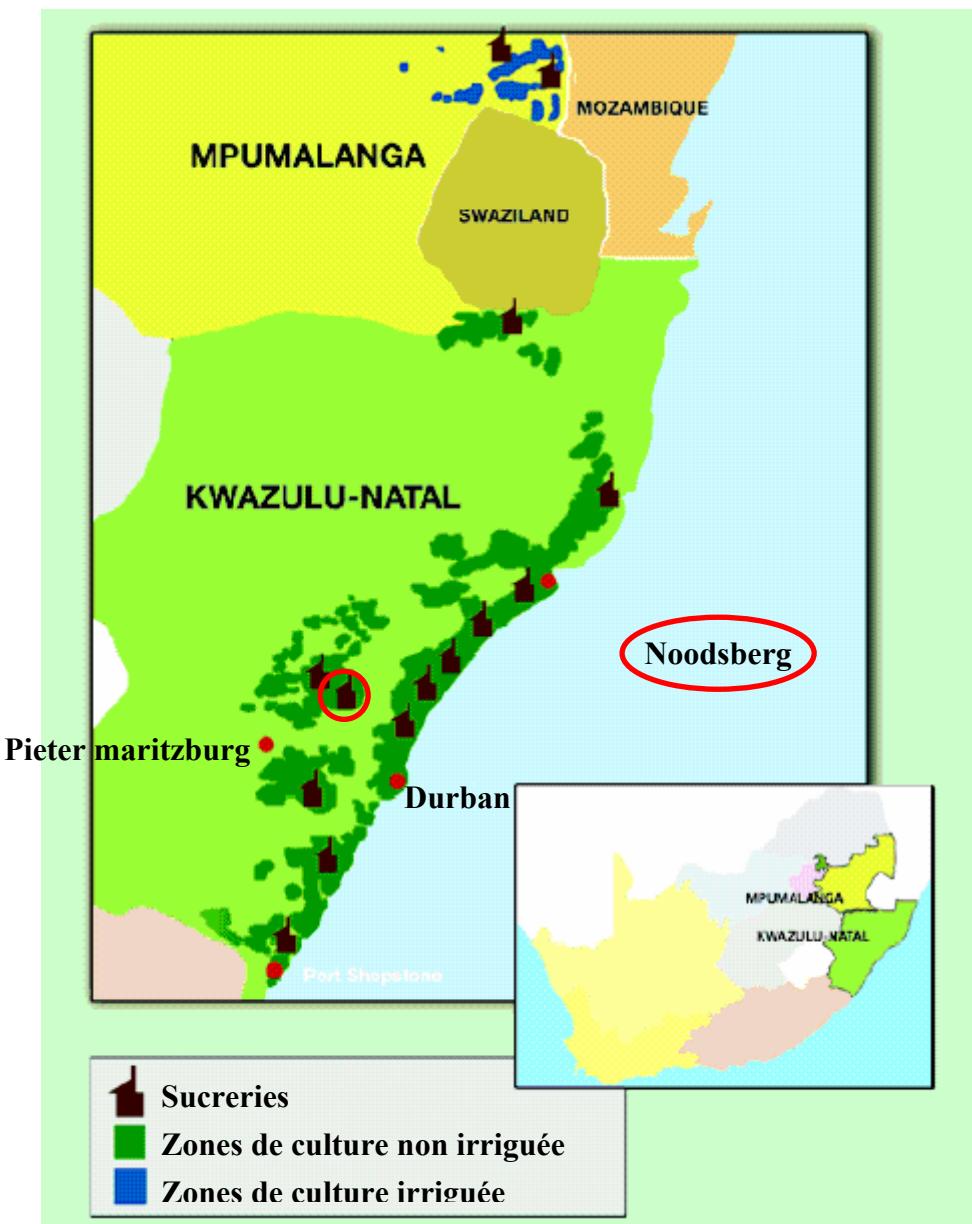
3. Résultats

3.1. Situation actuelle à Noodsberg

3.1.1. Description succincte du bassin d'approvisionnement

L'usine de Noodsberg est située sur les premiers plateaux des Midlands, à 80 km de la côte du KwaZulu-Natal (figure 4). Elle appartient au groupe sucrier Illovo Sugar Ltd, premier producteur de sucre en Afrique et propriétaire de 5 sucreries en Afrique du Sud. Le site de Noodsberg dispose d'une raffinerie qui fonctionne toute l'année et qui utilise du sucre provenant de plusieurs bassins canniers.

Figure 4 : emplacement de la sucrerie de Noodsberg dans la zone de culture de la canne.



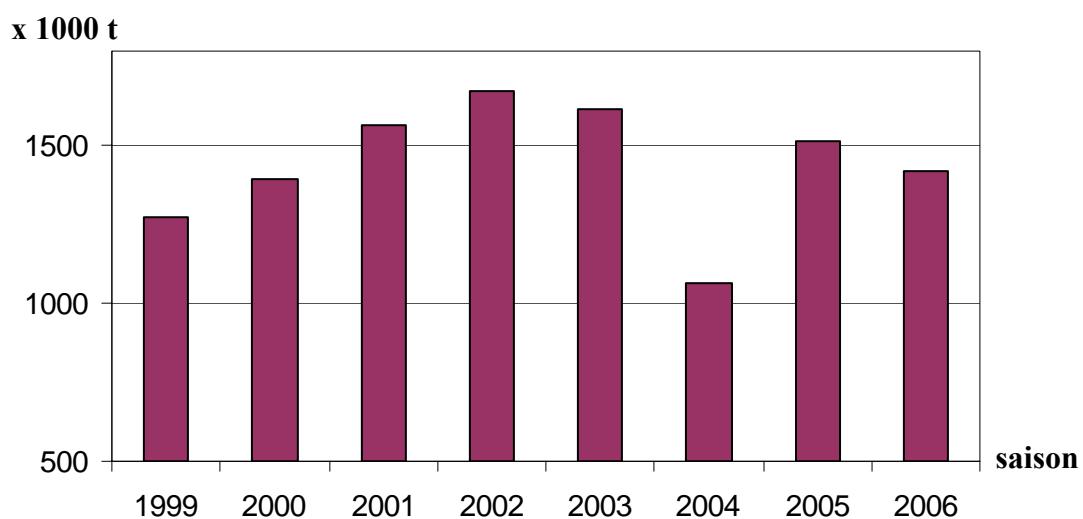
Le bassin de collecte de 32 000 hectares environ s'étend sur près de 80 km au nord et 70 km à l'est de Pietermaritzburg (voir figure 11) sur des plateaux allant de 450 mètres à 1400 mètres en altitude. Les étés y sont chauds et fortement arrosés, l'hiver sec et froid. On se situe ici à la limite des zones cultivables pour la canne qui est le plus souvent coupée après un cycle de 24 mois afin de compenser les déficits en degrés-jour sur l'année. Dans les zones les plus froides le gel en juillet-août oblige les planteurs à récolter la canne annuellement.

L'essentiel de l'approvisionnement de la sucrerie est réalisé par 149 LSG qui détiennent plus de 90% de la surface (Tableau2). Le groupe Illovo Sugar Ltd possède deux exploitations de 1500 hectares au total, où ont été réalisés les premiers essais de mécanisation de la récolte au début des années 2000 (Meyer et al., 2000). Le volume livré par les SSG est très faible car ils ne possèdent que 4% des surfaces. Les données concernant les livraisons des SSG étant incomplètes, nous n'avons pris en compte dans l'étude que les LSG et les deux MCP. Entre 1999 et 2006, l'usine de Noodsberg a broyé en moyenne 1,5 millions de tonnes de canne par an (figure 5) avec des variations conséquentes, particulièrement en 2004 suite à un gel important en hiver.

Tableau 2 : les planteurs du bassin cannier de Noodsberg.

	MCP	Large Scale	Small Scale	Mill Total
Superficies cultivées (ha) - 2005	1508	29108	1257	31873
Nombre d'exploitants - 2006	2	149	762	913

Figure 5 : Quantité de canne broyée à Noodsberg entre 1999 et 2006.



3.1.2. L'approvisionnement de la sucrerie de Noodsberg

a) Un transport réalisé par les planteurs eux-mêmes avec une flotte surdimensionnée

Le transport de la canne dans le bassin de Noodsberg est assuré par les planteurs eux-mêmes. La plupart de ces planteurs sont suréquipés. On compte près de 195 véhicules livrant régulièrement de la canne à Noodsberg (Tableau 3).

Tableau 3 : Description des véhicules livrant la canne à Noodsberg.

Type de véhicule	Description	Nombre de véhicule livrant régulièrement	Charge moyenne	% du volume total transporté
Hilo		5	23 t	3,31 %
Tri-axle		15	28 t	0,37 %
Inter-link		13	28 t	33,79 %
Truck land train	Camion + 3 remorques	10	28 t	8,96 %
Lorry		12	11 t	2,79 %
Rigid drawbar		50	15 t	17,45 %
Tractor rig		27	10 t	12,63 %
Tractor hilo		39	14 t	20,38 %
Tractor inter-link		24	23 t	0,32 %

Source : SASA 2005 – Cane Testing Service.

On note cependant une tendance nette à déléguer de plus en plus certaines tâches telles que la coupe ou le transport de la canne¹, les planteurs les plus équipés tentant de rentabiliser au mieux leur équipement en proposant leurs services à des exploitations voisines. Ainsi, AgriTrans transporte avec 9 camions plus d'un septième de la canne broyée à Noodsberg. Cette évolution s'accélère depuis quelques années avec l'apparition de la récolte mécanique et les problèmes croissants de management en général et de gestion de la main d'œuvre en particulier. Dans ce contexte, les planteurs semblent prêts à modifier leur façon d'organiser l'approvisionnement de la sucrerie afin de résoudre les problèmes liés au surdimensionnement de leur flotte de transport par rapport aux capacités de broyage de l'usine.

b) Caractéristiques de l'usine et organisation des livraisons

A l'heure actuelle, la canne à sucre est livrée à la sucrerie de Noodsberg sous trois formes : - en canne entière et transportée en gros ballots chaînés de 6 tonnes environ. On utilisera le terme « Bundle » pour désigner ce type de livraison et la canne ainsi transportée.

- en canne entière et transportée en vrac. On désignera par « spiller » ce type de livraison, et par extension la canne ainsi transportée ou les planteurs adoptant ce système.
- en tronçons de 30 cm environ pour la canne coupée mécaniquement. La sucrerie rattache cette canne au type « Spiller », tout en adaptant les méthodes de déchargement.

Les cannes bundle et spiller sont gérées différemment dans le centre de réception de la sucrerie (nous emploierons le terme anglais « millyard ») (cf. figure 6). Les ballots chaînés peuvent être stockés et déplacés facilement, grâce à 5 engins spécialisés : les « hysters » (voir annexe 12). Les mesures de qualité de la canne (teneur en sucre, en non-sucres, en fibres, etc) ne sont effectuées qu'une fois la canne broyée dans l'usine. Il est important d'assurer la traçabilité du produit et de pouvoir attribuer chaque lot de canne à un planteur. Les ballots chaînés sont donc soigneusement rangés dans le millyard. La canne en vrac ne peut pas être stockée dans le millyard, sous peine de mélanger les livraisons de tous les planteurs « spiller ». Les camions de livraison déchargent donc directement sur la table à canne appropriée, à l'aide d'une grue fixe (voir annexe 12). Il est alors aisément d'attribuer au bon planteur les mesures de qualité qui vont être effectuées. Le camion suivant ne décharge qu'une fois la table à canne libérée, afin d'éviter les mélanges. Une file d'attente se crée de ce fait dans le millyard aux heures de pointe, du fait de la compétition pour l'utilisation de la grue de déchargement. Le délai de passage dans le millyard est donc plus court en moyenne pour les camions bundle que pour les camions spiller (24 et 34 minutes respectivement).

En règle générale, la canne bundle est broyée lorsque la sucrerie est à cours de livraison spiller. Les ballots de canne sont donc essentiellement broyés la nuit, lorsque les livraisons se font rares. En effet, la grande majorité des planteurs ne livrent que pendant la journée, de 7 heures à 19 heures (voir figure 7). Au milieu de la journée, entre 10 heures et 14 heures, le pic de livraisons crée des problèmes de congestion et les délais d'attente à l'entrée de l'usine deviennent importants : il n'est pas rare que les camions attendent plus de 2 heures avant de pouvoir entrer dans le millyard. Tous les camions, qu'ils soient spiller ou bundle, doivent passer sur l'unique balance à l'entrée du millyard. Ils sont également pesés à vide à leur sortie, afin de calculer le poids de canne livrée. Deux files d'attente sont constituées, en fonction de type de camion qui arrive à la sucrerie. Sept camions spiller et dix camions bundle sont admis à l'intérieur du millyard au maximum. Une fois ces chiffres atteints, n'est autorisé à rentrer dans le millyard qu'un camion du même type que celui qui ressort à vide. Récemment, une troisième file d'attente a été créée. Elle est réservée aux planteurs qui livrent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, qu'ils soient spiller ou bundle. En fonction du volume qu'ils ont à livrer, ils obtiennent un certain nombre d'entrées prioritaires espacées régulièrement dans le temps, ce qui réduit considérablement les délais d'attente. Cette nouvelle organisation a pour but d'inciter les planteurs à livrer leur canne de façon plus régulière, et notamment la nuit.

Figure 6 : centre de réception de Noodsberg - vue aérienne et schéma d'interprétation.



Légende :

BE = Balance d'entrée.

BS = Balance de sortie.

= grue fixe pour le déchargement de la canne « Spiller »

= 'Hysters' pour le déchargement de la canne « Bundle » (5 unités)

= pont roulant

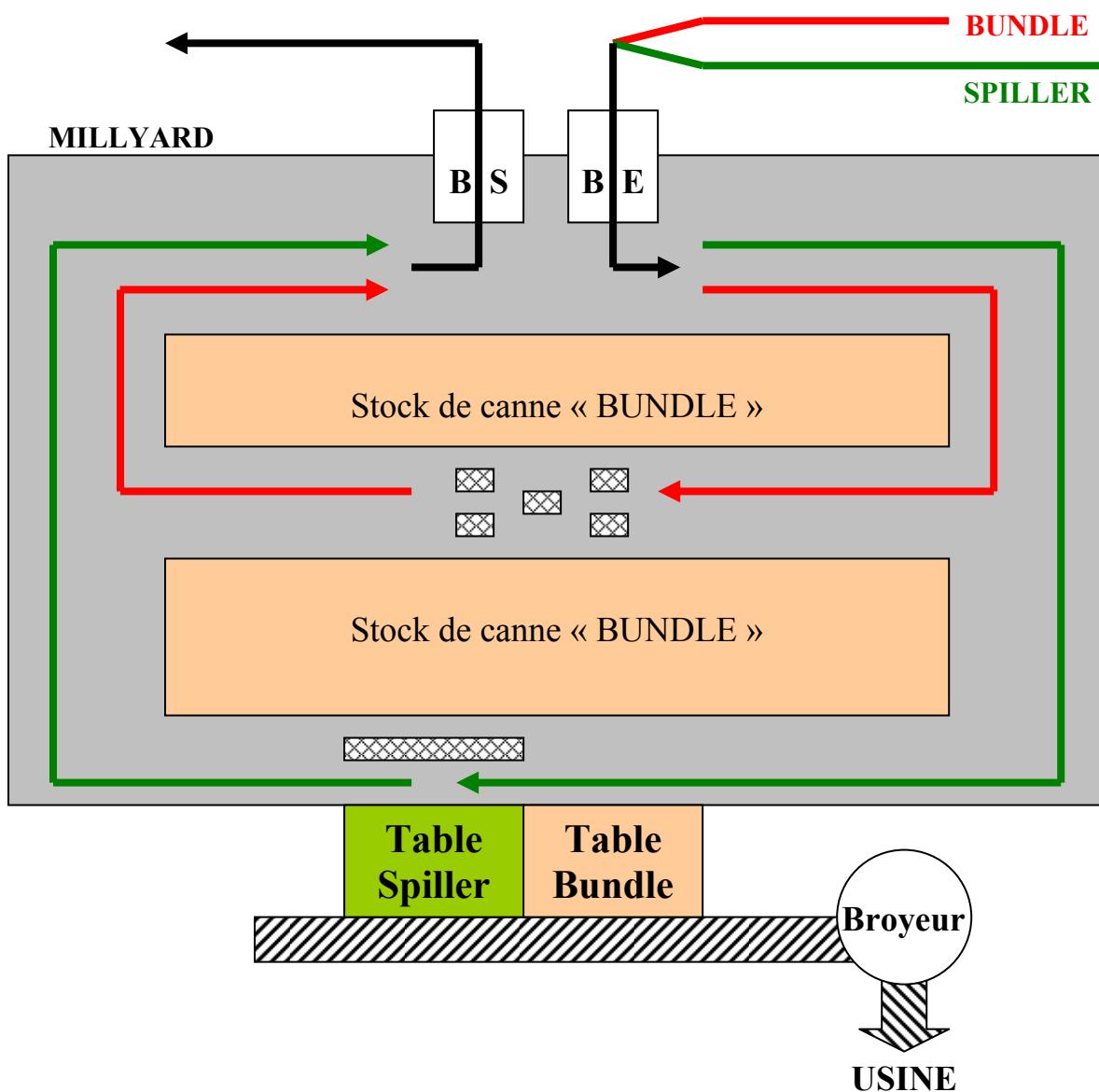
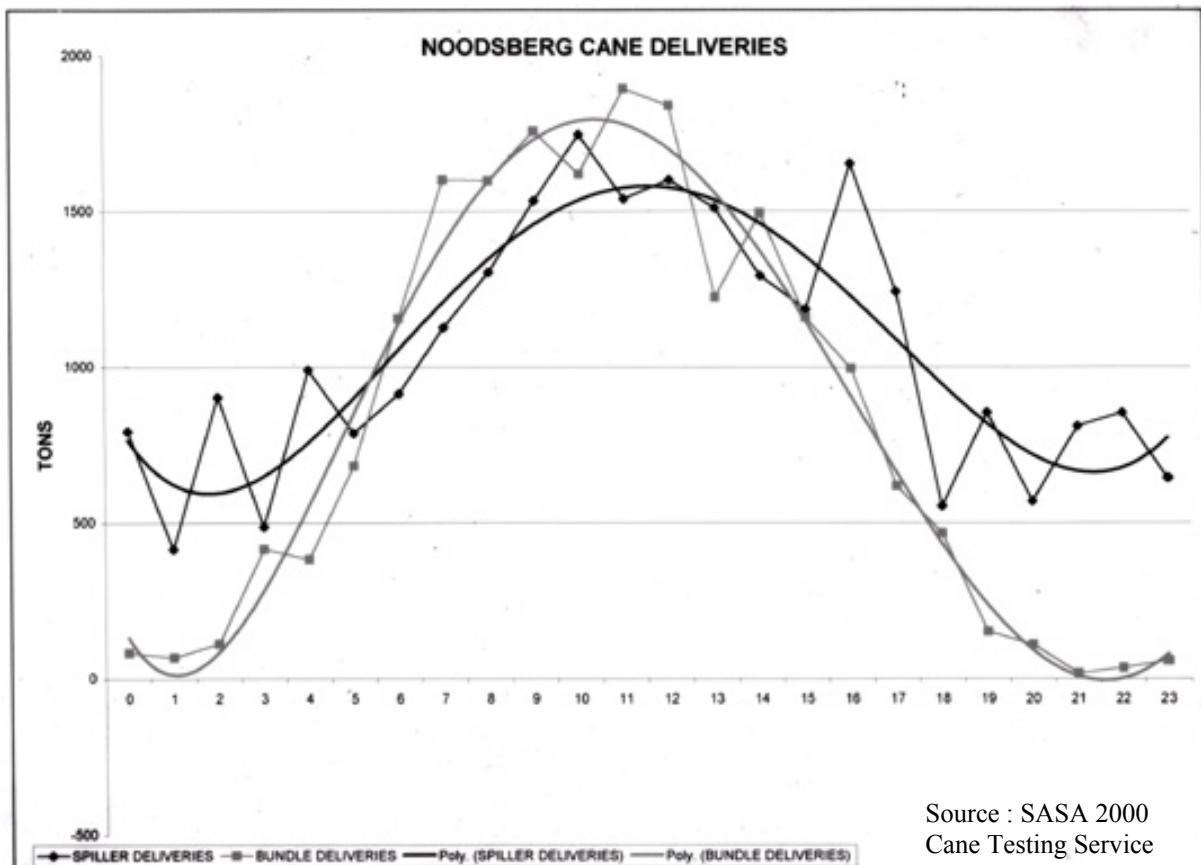


Figure 7 : Profil des livraisons de canne à Noodsberg au cours de la journée.



3.1.3. Description des chaînes logistiques : construction d'une typologie

a) choisir entre récolte mécanique et récolte manuelle

En 2006 environ 16% de la récolte ont été coupés mécaniquement. Il y avait alors 8 machines en fonctionnement dans le bassin. Cette saison (2007), le nombre de machines a doublé et l'on peut s'attendre à dépasser facilement les 20% de canne tronçonnée. D'ici quelques années, environ 75% du bassin de Noodsberg pourraient être récoltés mécaniquement (estimation SASRI). Les 25% restants représentent essentiellement des zones trop pentues pour permettre l'utilisation des machines. L'augmentation de la mécanisation dans le bassin de Noodsberg s'explique avant tout par les problèmes de main d'œuvre. Celle-ci se fait plus rare (SIDA, réorientation des ouvriers agricoles vers le bâtiment) et plus chère. Malgré l'augmentation du prix du carburant, la mécanisation devient de plus en plus compétitive. Plus de détails concernant le choix du passage à la mécanisation sont donnés en annexe 7.

b) récolte manuelle : le transport dépend de la distance à la sucrerie

En récolte manuelle, la canne est systématiquement brûlée avant d'être coupée. Le brûlage permet d'éliminer les feuilles et facilite le travail des coupeurs. Ceux-ci disposent la canne en andains après avoir éliminé le haut de la tige, pauvre en sucre. Dans tous les systèmes, le chargement des camions est réalisé à l'aide d'engins spécialisés à trois roues et équipés d'une griffe : les chargeurs Bell. Il y a découplage total entre la coupe de la canne et le transport

jusqu'à l'usine. Généralement, les camions transportent de la canne coupée le matin, voire la veille ou l'avant-veille. Ces délais coupe-transport élevés conduisent à une dégradation plus poussée des sucres et une baisse de la qualité de la canne livrée. On constate que l'organisation du transport dépend de la distance entre l'exploitation et la sucrerie.

- Système manuel A :

Les exploitations les plus proches de la sucrerie optent pour un transport direct de la canne avec des véhicules économiques. Leur choix se tourne donc vers des remorques de faible capacité (une douzaine de tonnes environ) tractées par des tracteurs. La faible capacité est compensée par un nombre de cycles plus important par véhicule, rendu possible par la proximité de la sucrerie. La faible charge des véhicules leur permet de pénétrer directement dans le champ et de raccourcir ainsi les distances parcourues par le Bell pour remplir les remorques.

- Système manuel C :

Les exploitations les plus éloignées de la sucrerie suivent le raisonnement inverse des précédentes : elles cherchent à maximiser la charge de chaque véhicule afin de rentabiliser les longs trajets. Les véhicules utilisés sont donc du type « inter-link » (cf. tableau 3), dont la charge est importante (supérieure à 30 tonnes), mais qui peuvent difficilement pénétrer dans les champs pour le chargement, du fait de leur instabilité. Par ailleurs, leur poids entraînerait beaucoup plus facilement des problèmes de compaction du sol et de destruction des souches, notamment en condition humide. Ils doivent être chargés sur des zones préparées à cet effet au sein de l'exploitation et relativement plates (« loading zones »).

Dans un premier temps, la canne doit donc être transférée du champ jusqu'à la loading zone la plus proche, généralement située à moins de 1 ou 2 km de la parcelle. Ce sont de petits tracteurs équipés de remorques de 5 à 10 tonnes qui sont chargés de ce transport. Cette organisation est plus coûteuse que la précédente. Tout d'abord, elle nécessite plusieurs véhicules pour réaliser la même tâche. Ensuite, elle nécessite une double manipulation qui multiplie les coûts opérationnels. La canne est en effet déchargée puis rechargée au niveau de la loading zone. Par ailleurs, le chargement des petites remorques au champ et le chargement des camions sur la zone ne peuvent avoir lieu simultanément que si l'exploitation dispose de plusieurs chargeurs Bell. Notons cependant que ce système de livraison indirecte permet de diminuer les problèmes de compaction tout en chargeant rapidement les camions, qui stationnent à l'endroit où la canne est stockée.

- Système manuel B :

Dans les situations intermédiaires, la livraison indirecte ne s'impose pas forcément mais les faibles capacités d'un tracteur avec remorque ou d'un petit camion ne suffisent pas à transporter la canne sur de longs trajets. Les planteurs optent alors souvent pour un transport direct avec de plus gros véhicules (autour d'une vingtaine de tonnes de charge). Afin d'éviter les problèmes de compaction du sol, le chargement est parfois réalisé en bordure de parcelle plutôt qu'en plein champ. L'efficacité des Bell pour le chargement s'en trouve alors réduite. Certains planteurs appartenant à cette zone « tampon » privilégiennent tout de même une organisation de type livraison indirecte. Celle-ci devient même obligatoire dans les exploitations où les pentes sont importantes, car le chargement en bordure de parcelle devient impossible.

c) récolte mécanique : un nouveau management du transport.

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de la récolte manuelle, les diverses formes d'organisation de récolte mécanique que l'on observe dans le bassin de Noodsberg ne dépendent pas vraiment de la distance entre les exploitations et la sucrerie, mais se basent plutôt sur des critères économiques ou stratégiques. On peut néanmoins raisonnablement penser que des exploitations très éloignées de la sucrerie s'orienteraient préférentiellement vers des systèmes indirects de type A ou B ci-dessous plutôt que vers un système semi-direct offrant moins de flexibilité...

Dans le bassin de Noodsberg, tous les planteurs qui ont investi dans une machine de récolte ont choisi la Claas, pour sa stabilité en terrain vallonné. Que la récolte mécanique soit faite « en vert » ou après brûlage, l'organisation logistique est la même. Pour la coupe, la machine avance à travers la parcelle, escortée par un tracteur tirant une remorque qui réceptionne les tronçons de canne. Dans tous les cas, ce n'est pas la remorque remplie par la machine qui livre la canne à l'usine. Il y a systématiquement un transfert de la canne depuis la remorque vers les camions qui vont à l'usine. Dès lors, il faut des loading zones sur l'exploitation. Les systèmes logistiques diffèrent essentiellement par la façon dont est géré le transfert de la canne sur la loading zone.

Notons enfin que tous les planteurs n'utilisent aujourd'hui leur machine que pendant la journée et sont très réticents à une coupe de nuit, beaucoup moins facile pour les opérateurs.

- Système mécanique A :

La solution la plus économique consiste à remplacer les coupeurs du système manuel C par une coupeuse mécanique. Quelques adaptations sont néanmoins nécessaires. En effet, les tronçons de 30 cm peuvent difficilement être ramassés par la griffe d'un Bell. La remorque de 6 à 12 tonnes possède donc un vérin hydraulique à l'avant lui permettant de basculer pour verser la canne sur la loading zone (cf. Annexe 12). Un Bell légèrement transformé peut ensuite charger des camions de grande capacité (supérieure à 30 tonnes).

Ce système proche du « bricolage » est très peu apprécié des responsables de la sucrerie et des conseillers de la SASRI. On lui reproche notamment de favoriser la dégradation de la canne (déjà rapide car tronçonnée) en la plaçant au contact des microorganismes du sol, et d'augmenter la quantité de saletés (terre, cailloux) dans la canne livrée. Par contre, il permet de livrer la nuit de la canne coupée pendant la journée.

- Système mécanique B :

Une alternative au système précédent consiste à récupérer la canne dans des containers de 7 à 8 tonnes. Une fois le tracteur arrivé sur la loading zone, le container plein est descendu de l'attelage à l'aide d'un monte-chARGE et stocké. Il est remplacé par un container vide qui sera rempli à son tour par la coupeuse. Le transport jusqu'à l'usine est assuré par un camion capable de charger 4 containers pour une charge totale de 28 à 32 tonnes. Aujourd'hui le transport des containers (remplis au cours de la journée) a lieu la nuit, afin d'éviter les heures de pic dans les livraisons à l'usine. Ceci présente deux problèmes : (i) la canne se détériore au cours du stockage, et ce d'autant plus vite qu'il s'agit de canne tronçonnée ; (ii) le nombre de containers nécessaires est proportionnel au volume de canne à couper pendant la journée. Vu que le coût de fabrication des containers est très élevé, cela rend le système très coûteux, car il faut également disposer d'un monte-chARGE capable de manipuler des containers de près de 10 tonnes.

Aujourd’hui, un seul planteur a mis en place ce dispositif car un problème lors du déchargement sur la table à cannes a conduit l’usine à limiter son développement. Toutefois, vu l’intérêt porté par les autres planteurs à ce genre de système (l’intérêt se situant essentiellement dans la possibilité de livrer de nuit alors que la coupe a lieu pendant la journée), d’autres technologies similaires sont à l’étude.

- Système mécanique C :

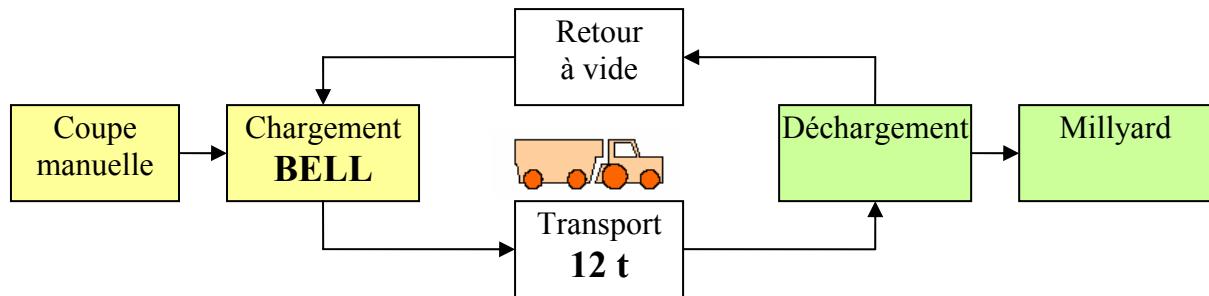
Contrairement aux deux types d’organisation précédents, le système de récolte mécanique le plus répandu dans le bassin de Noodsberg aujourd’hui ne peut pas totalement découpler la coupe du transport de la canne. En effet, les remorques élévatrices de 6 à 8 tonnes utilisées (cf. Annexe 12) déversent directement les tronçons de canne coupés par la machine dans les camions de 32 tonnes circulant entre la parcelle et la sucrerie. Au niveau de la loading zone et à travers ces remorques élévatrices s’établit donc un lien entre la coupeuse et les camions de livraison : le système peut être qualifié de « semi-direct ».

Les camions ne peuvent livrer la canne que si des remorques élévatrices remplies sont disponibles sur la loading zone, donc lorsque les machines sont en période de fonctionnement. Inversement, les machines de coupe doivent nécessairement s’arrêter si aucune remorque vide n’est disponible. Cela peut survenir si les remorques pleines attendent sur la loading zone des camions retenus à la sucrerie ou sur la route.

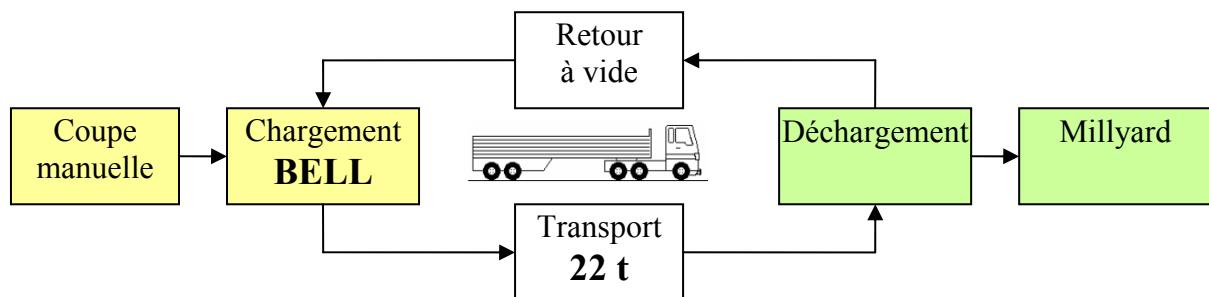
L’élaboration de schémas de fonctionnement des différents systèmes logistiques du bassin d’approvisionnement a permis de formaliser la description des flux tels qu’ils existent dans la réalité (figures 8 et 9).

Figure 8 : Schémas de fonctionnement – récolte manuelle et systèmes logistiques
 (d'après enquêtes, mai 2007) – jaune = champ ; noir = LZ ; vert = usine

Système A : livraison directe (tracteur et remorque) :



Système B : livraison directe (camion) :



Système C : livraison indirecte :

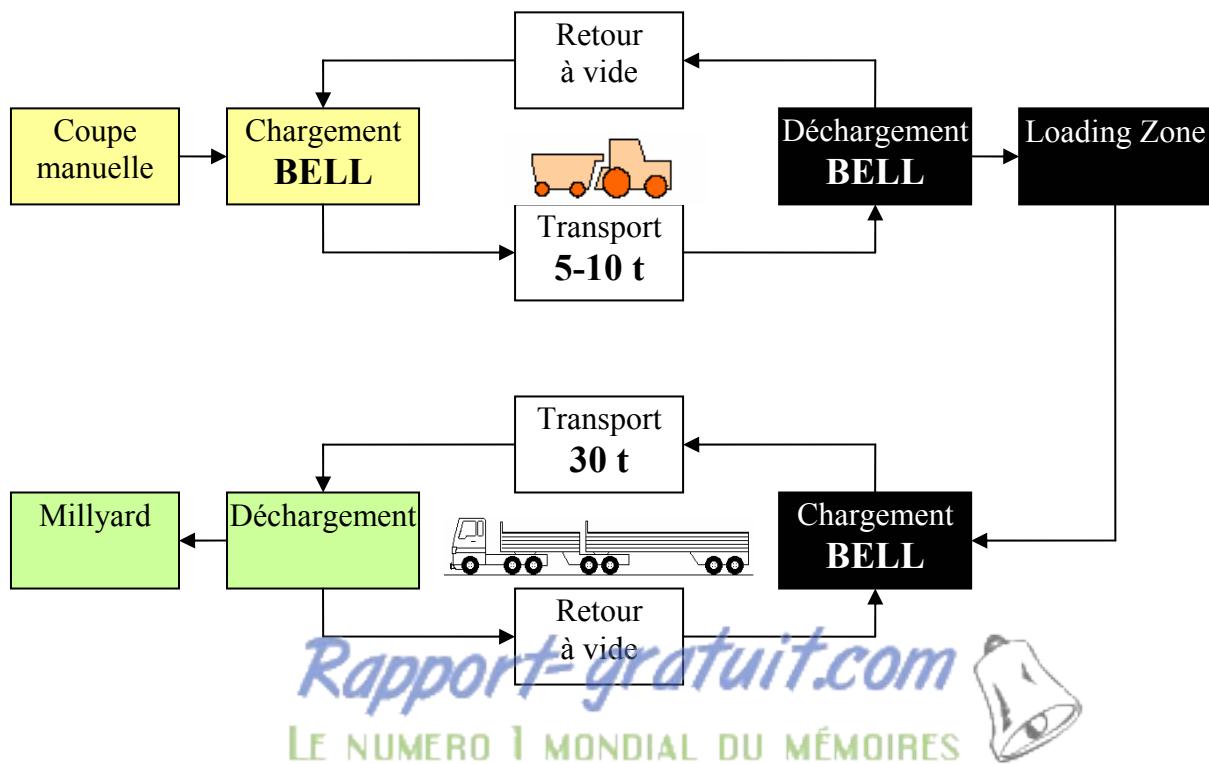
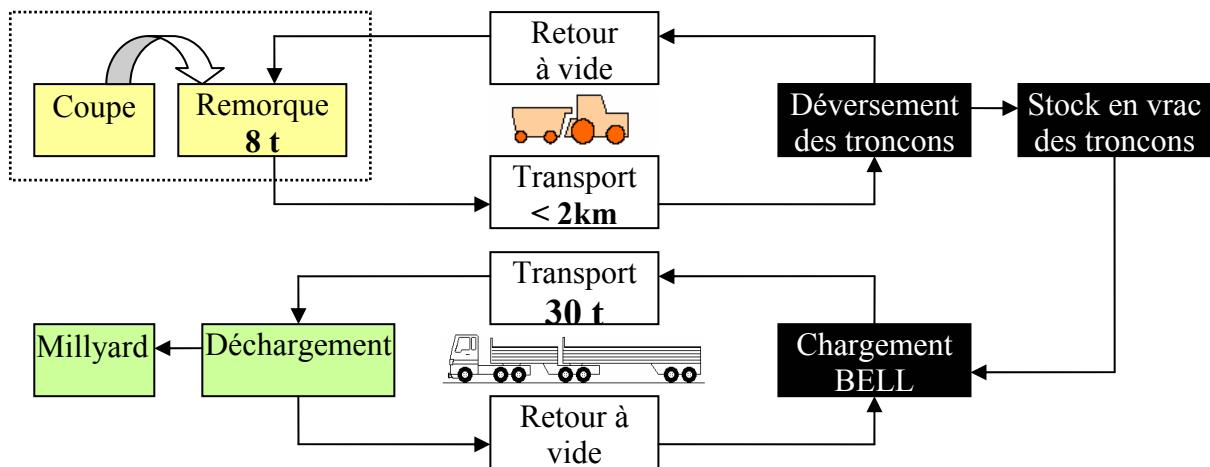
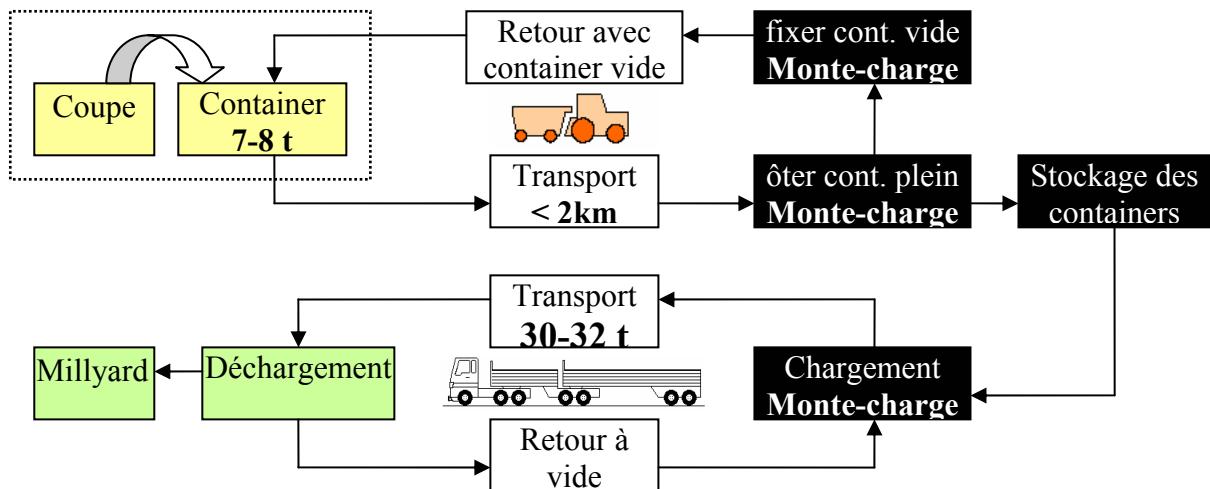


Figure 9 : Schémas de fonctionnement – récolte mécanique et systèmes logistiques
 (d'après enquêtes, mai 2007) – jaune = champ ; noir = LZ ; vert = usine

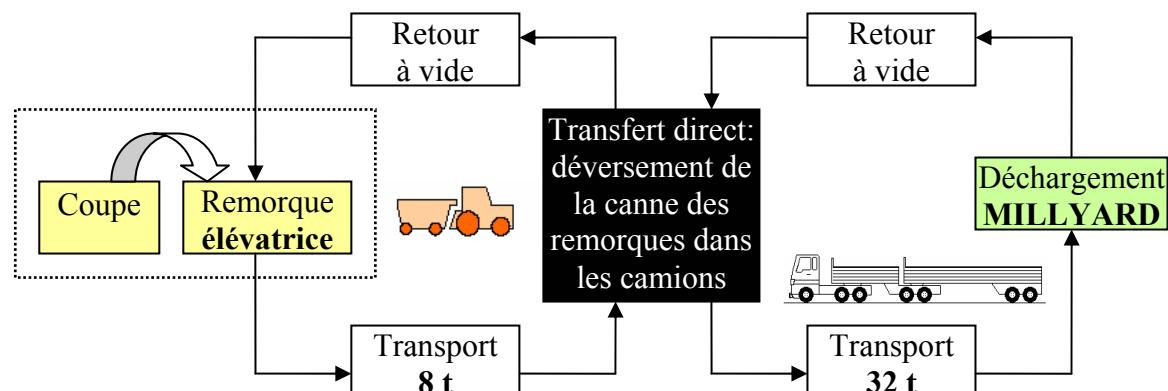
Système A : dépôt en vrac sur la loading zone :



Système B : stockage dans des containers sur la loading zone :



Système C : remorques élévatrices pour une livraison « semi-directe » :



3.2. L'Unité de Production : un concept commun aux deux modèles

Il s'agit ici d'établir une représentation fidèle mais simplifiée de la réalité afin de pouvoir modéliser le bassin de Noodsberg dans son ensemble et simuler différents scénarios, au niveau de l'organisation des approvisionnements à l'échelle de la saison et de la logistique. Une grande importance a été accordée à ce travail préalable car l'articulation entre les deux modèles passe avant tout par une conceptualisation commune du bassin d'approvisionnement. Nous avons délibérément choisi de partir des bases conceptuelles de MAGI® pour construire notre représentation du bassin, en définissant, sur la base de critères logistiques, des unités de production qui sont utilisées indifféremment dans les deux modèles.

Il ressort du diagnostic sur les organisations logistiques que l'un des critères déterminants permettant de différencier les unités de production est la distance parcourue par les camions entre l'exploitation et la sucrerie. Pour les systèmes manuels, l'organisation logistique diffère en fonction de cette distance. Pour un même système mécanique, on peut s'attendre à ce que les ressources nécessaires au transfert de la canne soient plus élevées pour les exploitations les plus éloignées de la sucrerie. Nous avons donc découpé le bassin d'approvisionnement en trois zones géographiques, regroupant les exploitations en fonction de la distance qui les sépare de la sucrerie (figures 10 et 11). Le calcul des distances moyennes entre la parcelle et la sucrerie a été réalisé avec Arc GIS®. Le choix des distances limites (entre zones 1 et 2 et entre zones 2 et 3) a été établi à partir des entretiens avec les planteurs et les conseillers de la SASRI. Il a également été modifié *a posteriori* en comparant des statistiques, telles que le tableau 3, aux volumes attribués après calculs à chaque zone géographique. Nous avons finalement retenu les valeurs de 15 km et 35 km. Les moyennes pondérées des distances entre les exploitations et la sucrerie pour les zones 1, 2 et 3 sont respectivement de 8, 22 et 48 km.

Nous avons ensuite divisé chaque zone géographique en récolte manuelle et récolte mécanique. En ce qui concerne la récolte mécanique, nous avons simplifié la représentation de la réalité en faisant l'hypothèse qu'un seul type d'organisation logistique existait dans le bassin. Selon les scénarios simulés par la suite, ce type d'organisation peut être assimilé aux systèmes A, B ou C (cf. figure 9). Par contre, pour ce qui est de la récolte manuelle, la zone géographique la plus proche de la sucrerie suit une organisation de type A (cf. figure 8). Les exploitations appartenant à la zone la plus éloignée suivent une organisation de type C. Entre 15 et 35 kilomètres, dans la zone géographique intermédiaire, la récolte manuelle a été divisée : une partie suivant l'organisation de type B et l'autre suivant l'organisation de type C, conformément à ce qui a été observé sur le terrain (cf. figure 10).

Enfin, les quatre groupes d'exploitations en récolte manuelle constitués jusqu'à présent ont été subdivisés en unités de production « Bundle » et en unités de production « Spiller », ce qui nous donne un total de 11 unités de production pour notre représentation du bassin cannier de Noodsberg (cf. figure 10).

Figure 10 : constitution des unités de production et représentation simplifiée du bassin.

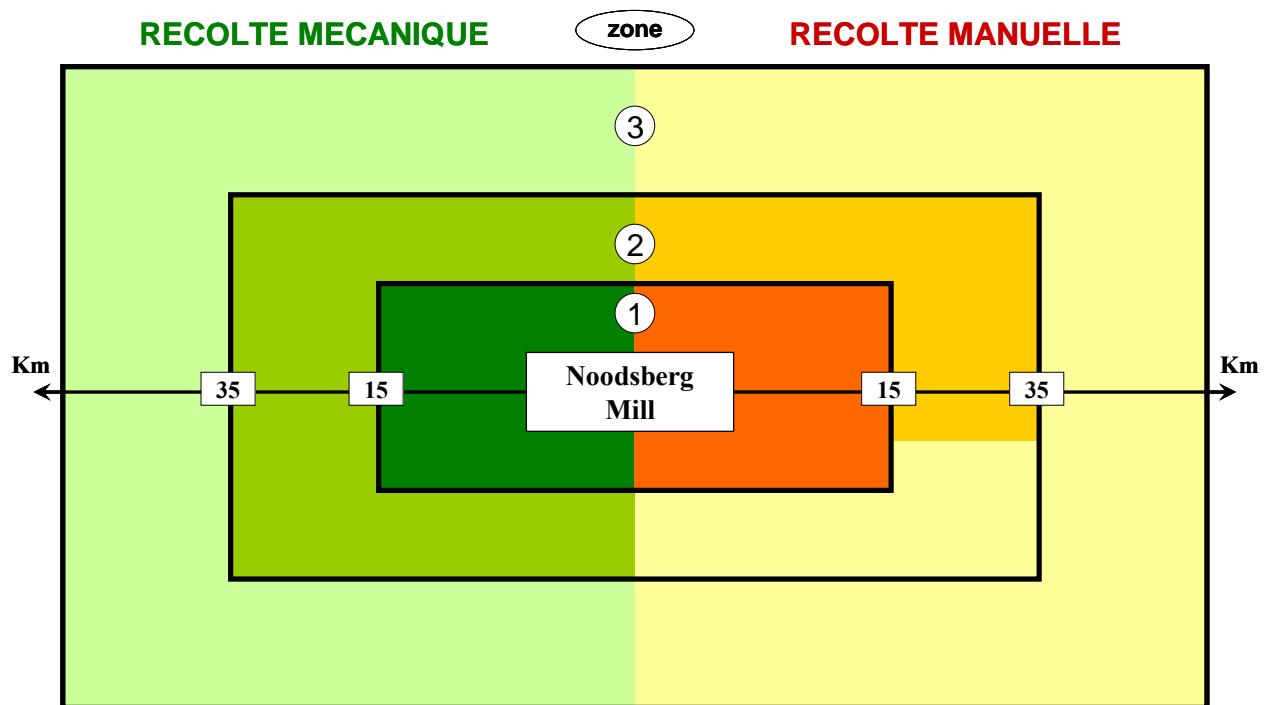
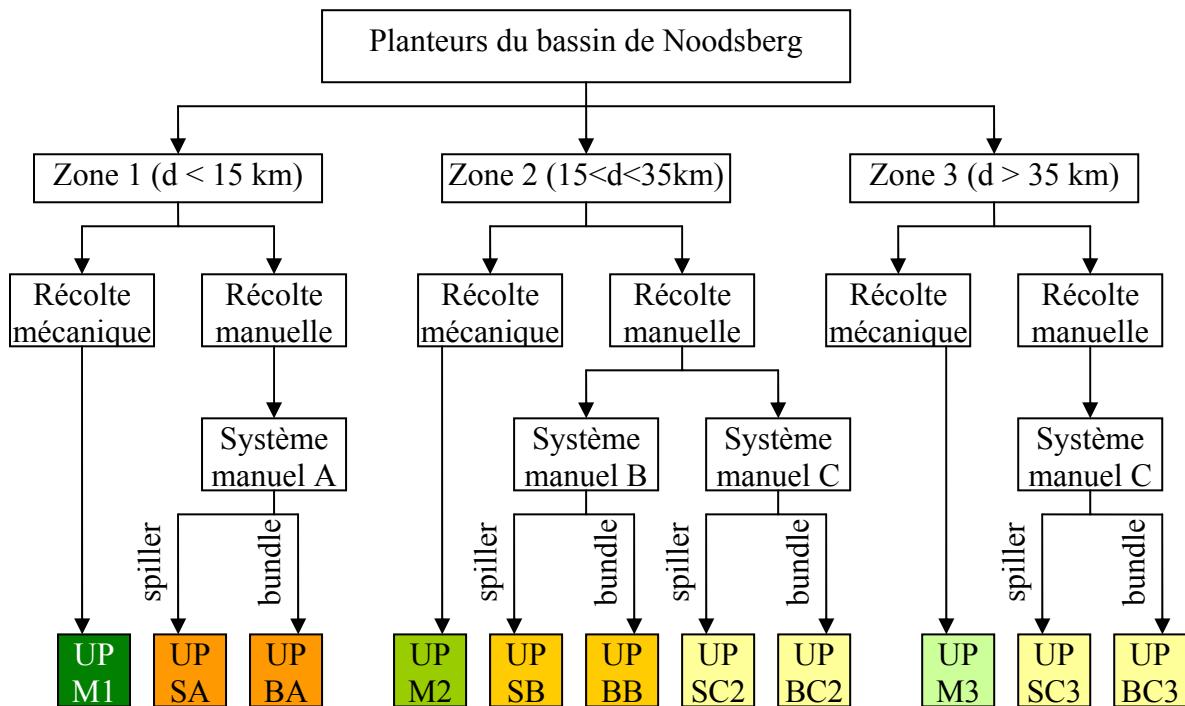
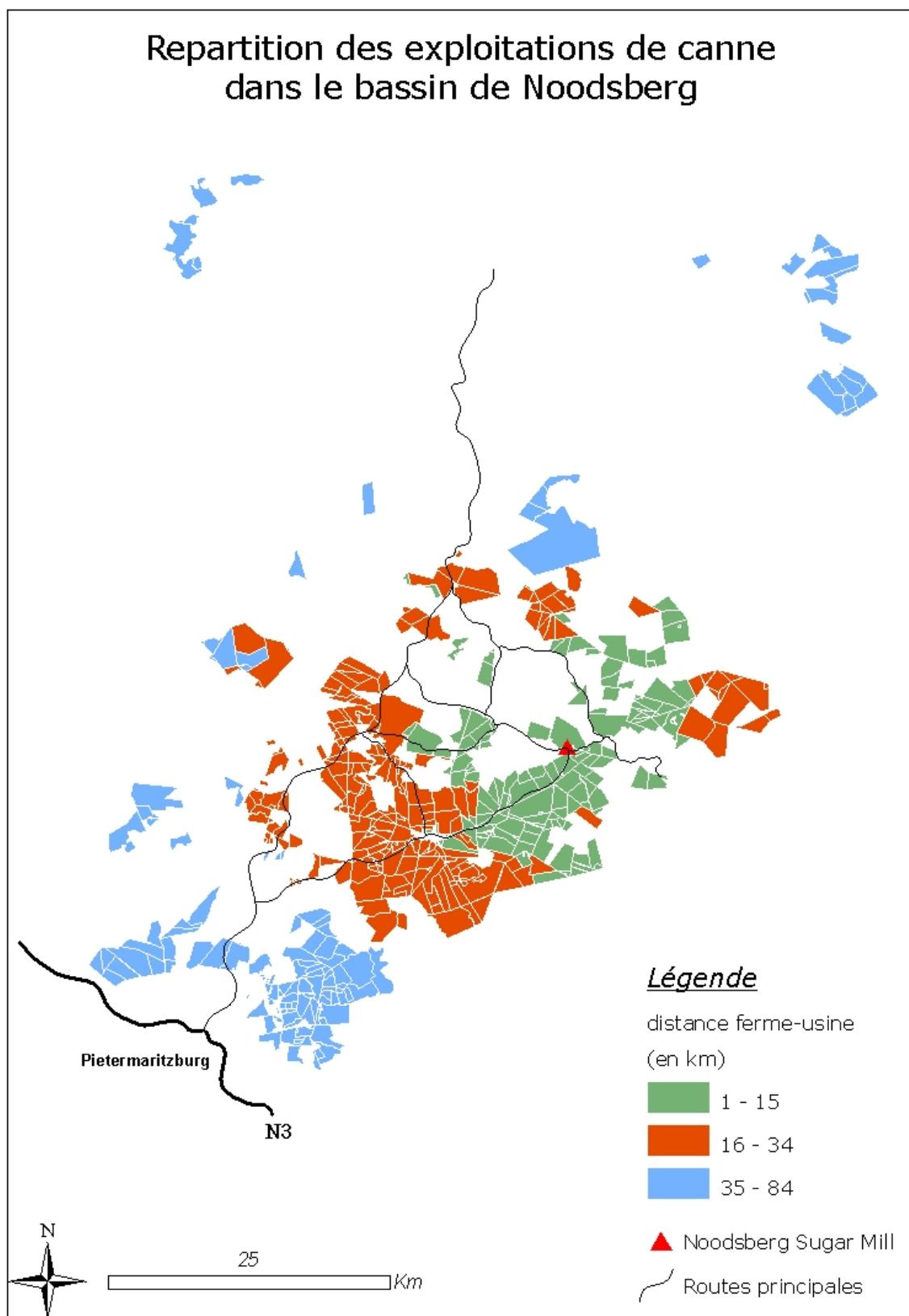


Figure 11 : zones géographiques définies en fonction de la distance à l'usine.



3.3. Modélisation et simulation de l'organisation des approvisionnements

Nous cherchons à simuler des changements relativement simples à l'échelle de la campagne qui aient un impact significatif sur l'organisation des approvisionnements et sur la logistique des flux de canne de la parcelle à la sucrerie. La réduction de la LOMS, qui se retrouve souvent au cœur des débats entre planteurs et miller, conduit à une réorganisation des approvisionnements destinée à fournir un même volume de canne sur une plus courte période. Elle entraîne du coup une demande plus élevée en capacités de coupe et de transport, ce qui donne un certain intérêt à la récolte mécanique. Permettant de relier modèle d'approvisionnement, modèle logistique et mécanisation, la réduction de la LOMS a été choisie comme critère d'élaboration des scénarios alternatifs.

3.3.1. Intérêts et limites d'une réduction de la LOMS

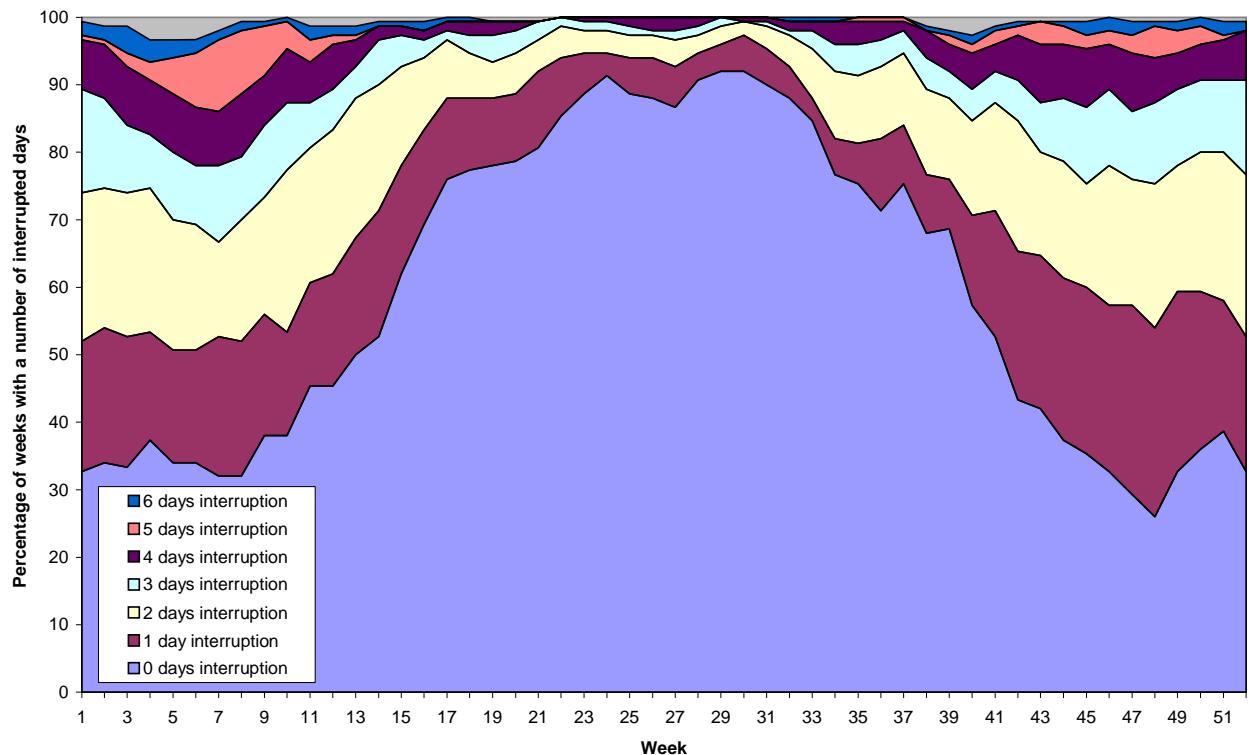
L'intérêt d'une réduction de la LOMS s'exprime surtout à travers l'augmentation de la production de sucre que l'on peut espérer en concentrant les livraisons sur la période de forte richesse en sucre de la canne, et que nous avons estimée à travers nos simulations.

D'autres bénéfices peuvent être attendus et notamment la possibilité d'éviter les périodes de risque climatique important. Dans la région de Noodsberg, la saison des pluies a lieu en été, entre novembre et avril. Lorsque la saison se poursuit jusqu'à mi-décembre, les risques d'orage augmentent considérablement, empêchant parfois la récolte de la canne (cf. Figure 12). Cela entraîne des surcoûts importants, pour les planteurs comme pour la sucrerie, qui doit parfois s'arrêter faute d'approvisionnement. En outre, la qualité de la canne livrée chute en condition humide, car les taux de fibres et d'impuretés augmentent significativement. Enfin, la circulation des engins de récolte en condition humide cause des problèmes de compaction et de destruction des souches qui peuvent faire chuter les rendements et la qualité de la canne récoltée les années suivantes. Dans un contexte d'augmentation de la mécanisation, l'argument du risque climatique devient plus significatif encore. En effet, les problèmes de compaction, la probabilité et les durées d'interruption de la récolte à cause de la pluie sont bien plus élevés en récolte mécanique.

La réduction de la durée de campagne conduit en contrepartie à une augmentation de la durée de l'intersaison. Si certains planteurs craignent de voir s'allonger cette période sans revenus (excepté pour ceux qui ont une double activité), la plupart d'entre eux y voient l'occasion de réaliser un meilleur entretien de l'exploitation et de préparer au mieux la saison suivante. D'un point de vue agronomique, on peut légitimement s'attendre à observer une amélioration des conditions culturales dans le cas d'une LOMS réduite. Du côté de la sucrerie, les mêmes bénéfices sont attendus : les travaux lourds de maintenance traditionnellement réalisés pendant l'intersaison devraient être plus fiables. Ces dernières années, l'étalement de la campagne a réduit le temps alloué à la remise en état des équipements et le début de chaque campagne a ensuite été perturbé par des problèmes de fonctionnement de l'usine².

Evidemment, la réduction de la LOMS n'offre pas que des bénéfices. Pour certains planteurs dont la flotte de transport permet tout juste de livrer leur allocation, une réduction de la LOMS pourrait les obliger à investir dans de nouvelles ressources de transport, qui seront utilisées sur une plus courte durée chaque année. Pour la sucrerie, le problème de l'amortissement est plus important encore. D'un point de vue économique, celle-ci a intérêt à faire fonctionner ses équipements le plus régulièrement et le plus longtemps possible. A Noodsberg, la présence d'une raffinerie pousse plus encore l'industriel à prolonger la saison, afin de disposer de sucre le plus longtemps possible et de rentabiliser son installation annexe.

Figure 12 : probabilité d'interruption de la récolte mécanique à cause de la pluie, dans le bassin de Noodsberg. (D'après Carel Bezuidenhout, non publié)



3.3.2. Scénarios envisagés.

Lors des 6 dernières années à Noodsberg, la LOMS a oscillé autour de 38 semaines, descendant notamment jusqu'à 30 semaines en 2004 à cause d'un gel très destructeur, mais atteignant également 41 semaines à plusieurs reprises. Si l'on compare ces chiffres aux calculs d'optimisation situant la LOMS idéale entre 34 et 38 semaines en fonction des sucreries sud-africaines (Moor et Wynne, 2001), une réduction de la LOMS à Noodsberg semble raisonnable.

Un rapide calcul montre que la capacité de broyage maximale de la sucrerie de Noodsberg est de 48 000 tonnes par semaine (en prenant en compte les 8 heures de maintenance hebdomadaire) :

$$C_{\max} = 300 \text{ t/h} \times ((24 \text{ h} \times 7 \text{ j}) - 8 \text{ h}) = 48 \text{ 000 t/semaine.}$$

Au cours des 6 dernières années, la sucrerie a broyé en moyenne 36600 tonnes de canne par semaine, soit 76% du maximum. L'écart entre ces deux valeurs peut être imputé au fait que le moulin ne peut pas broyer la canne à 300 t/h en permanence (la capacité dépend en réalité de la qualité de la canne) et aux arrêts de la sucrerie dus à des pannes, à des grèves ou à des problèmes d'approvisionnement. Evidemment, il serait utopique de penser pouvoir réduire tous ces aléas pour atteindre la capacité de broyage maximale. Néanmoins, il nous a paru réaliste d'envisager un taux de broyage de 42 000 tonnes par semaine, soit 87,5% du maximum. Sous l'hypothèse que l'on parvienne à mieux faire fonctionner le système dans son ensemble, un tel objectif semble envisageable. Aujourd'hui, le taux de panne estimé à 10% paraît excessivement élevé et la sucrerie devrait être en mesure de le réduire, notamment si la période de maintenance à l'intersaison était allongée. Nous pouvons également émettre l'hypothèse que l'élimination des périodes à risques en début et en fin de saison devrait

contribuer à augmenter la capacité de broyage moyenne de la sucrerie par semaine, grâce à une canne de meilleure qualité et des approvisionnements plus sûrs. Enfin, dans le but de tester l'effet d'une réduction vraiment importante de la LOMS sur la production de sucre, nous avons simulé une capacité de broyage hebdomadaire de 46 000 t. Conscients que cette valeur ne peut être atteinte dans la configuration actuelle, ce scénario s'accompagne d'un investissement au niveau de l'infrastructure : la capacité de broyage maximale de l'usine passant de 300 à 340 t/h.

Sur les données historiques des 6 dernières années, nous avons donc simulé la production de sucre à l'échelle du bassin (i) avec la LOMS historique, (ii) avec la LOMS correspondant à une capacité hebdomadaire de 42 000 tonnes et (iii) avec la LOMS correspondant à une capacité hebdomadaire de 46 000 tonnes (cf. figure 13). Les semaines éliminées mathématiquement lors de la réduction de la LOMS ont été retirées pour moitié en début de saison et pour moitié en fin de saison. Dans les cas d'un nombre impair de semaines à retirer, une semaine de plus a été retirée en fin de saison, puisque c'est à cette période là que les risques climatiques sont les plus importants (cf. figure 12).

Conformément à la modélisation sous MAGI, nous attribuons une courbe RV à chaque unité de production. Avec les données dont nous disposons, il nous est impossible de tracer les courbes RV en fonction des systèmes logistiques d'acheminement de la canne. Par contre, nous pouvons tracer les courbes RV à l'échelle de chaque zone géographique (cf. annexe 5). Chaque UP se voit donc attribuer, par simplification, la courbe RV de la zone géographique à laquelle elle appartient. Nous faisons l'hypothèse que le %RV des semaines conservées sont les mêmes que les %RV historiques.

3.3.3. Résultats : gains de sucre attendus.

L'hypothèse du modèle concernant l'uniformité des approvisionnements tout au long de la saison n'est évidemment pas tout à fait respectée dans la réalité. Afin de rester cohérents dans nos comparaisons, les scénarios alternatifs avec LOMS réduite ont été comparés à la simulation de la situation historique et non pas à la production de sucre historique réelle (cf. figure 13). Les résultats des différents scénarios sont présentés dans le tableau 4 ci-dessous. Les calculs des gains financiers obtenus lors de l'accroissement de la production de sucre ont été effectués en retenant la valeur en cours de 1608 rands par tonne de RV (mai 2007).

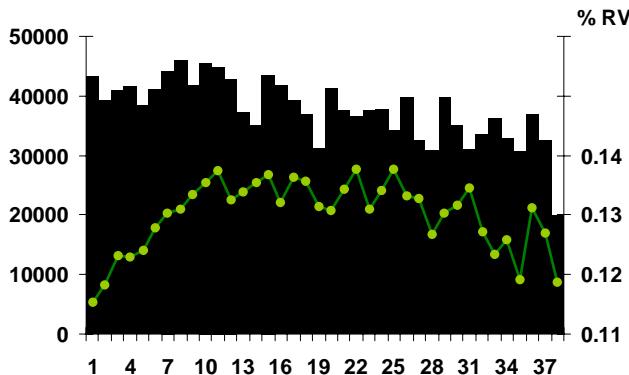
Tableau 4 : résultats des simulations et chiffrage des gains en sucre et en rands.

Saison	Variations de la LOMS			Variations de la production		
	LOMS historique	LOMS 1 Cap = 42000	LOMS 2 Cap = 46000	historique : simulé - réel	LOMS 1 - hist. simulé	LOMS 2 - hist. simulé
2001	38	35	32	-0.71%	0.58%	1.27%
2002	41	38	34	-0.39%	0.56%	1.06%
2003	41	37	33	-0.40%	0.72%	1.52%
2004	30	24	22	-0.71%	1.31%	1.83%
2005	38	34	31	-0.05%	0.97%	1.45%
2006	41	34	30	-0.77%	1.08%	2.07%
Moyenne	38 sem	- 4,5 sem.	- 8 sem.	-0.50%	0.87%	1.53%
					↓	↓
					2,4 millions de rands	4,2 millions de rands

Ces résultats amènent plusieurs réflexions :

- Nous constatons que l'écart de production entre l'approvisionnement uniforme théorique et l'approvisionnement réel n'est pas négligeable, pouvant atteindre 0,77% dans certains scénarios (valeur 'historique : simulé-réel'). Il y a il est vrai une ou deux semaines de mise en route ou de terminaison en début et en fin de saison que nous n'avons pas représentées. Néanmoins, l'histogramme des approvisionnements de l'année 2005 (figure 13) montre que les premières semaines de la saison ne sont pas forcément celles où les volumes livrés sont les plus faibles. En fait, l'écart entre la valeur réelle et la valeur simulée tient plutôt du fait que les planteurs jouent eux-mêmes avec la courbe RV et cherchent à livrer des volumes plus importants au milieu de l'année lorsque le %RV de la canne est au plus haut. Certains n'hésitent pas à surestimer leur production lors des estimations du début de campagne, afin de pouvoir livrer des volumes importants pendant les mois d'hiver. Pour limiter ce comportement, la sucrerie pénalise d'ailleurs les planteurs qui ont livré à la fin de la saison un volume de canne inférieur de 10% à leurs estimations de début de campagne.
- Les gains de production de sucre obtenus en réduisant la LOMS ne sont pas aussi importants que ce que l'on aurait pu espérer avant les simulations : même avec une réduction de 8 semaines par rapport à la situation historique, requérant des investissements pour augmenter la capacité de broyage de l'usine, la production de sucre n'augmente que de 1,5 % en moyenne sur les 6 dernières années. Ceci s'explique par le fait que les courbes de qualité dans le bassin de Noodsberg sont relativement plates : le %RV des premières et des dernières semaines de la saison ne sont pas beaucoup plus faibles que les %RV du milieu de saison. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette particularité :
 - Le fait que les cycles de coupe s'étendent sur deux ans pourrait contribuer à amoindrir les variations de qualité au cours d'une saison. La qualité de la canne récoltée est le résultat de deux années climatiques.
 - Le climat des Midlands offre des conditions de culture moins stressantes que sur la côte, notamment en hiver. Le volume mensuel des précipitations est quasiment constant tout au long de l'année, même si la forme des apports varie. La canne ne connaît donc pas le même stress hydrique que sur la côte en hiver, or ce stress est généralement accompagné d'un enrichissement de la canne en sucre (cf. Annexe 3).
 - L'utilisation d'agents chimiques de maturation, pulvérisés par avion ou par hélicoptère sur les cultures en début de saison, permet d'augmenter la teneur en sucre de la canne récoltée en début de saison lorsque l'application est réalisée à la bonne dose et au bon moment.

Figure 13 : modèle d'approvisionnement – scénarios comparés. (Exemple saison 2005)



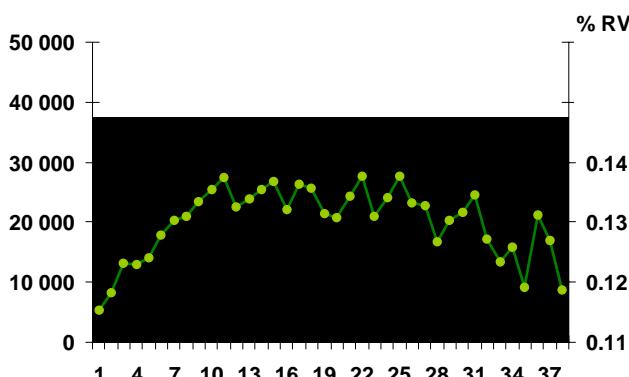
Livraisons historiques réelles :

DRD semaine = variables

Production de sucre : **Tons RV_R**

$$= \sum (\text{Tons Cane}_i \times \%RV_i)$$

i, semaine de livraison : i ∈ [1,38]



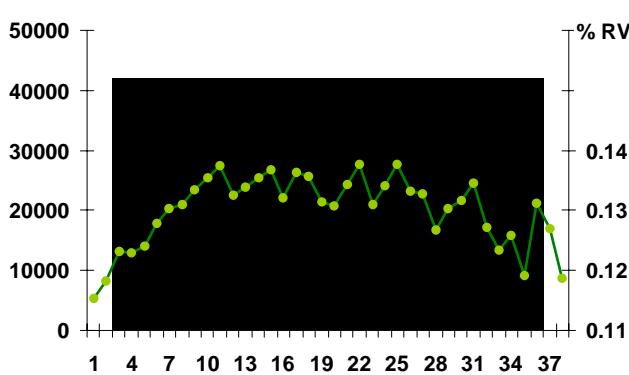
Livraisons historiques simulées :

DRD semaine = 37 600 t

Production de sucre : **Tons RV₁**

$$= 37\,600 \times \sum(\%RV_i)$$

i, semaine de livraison : i ∈ [1,38]



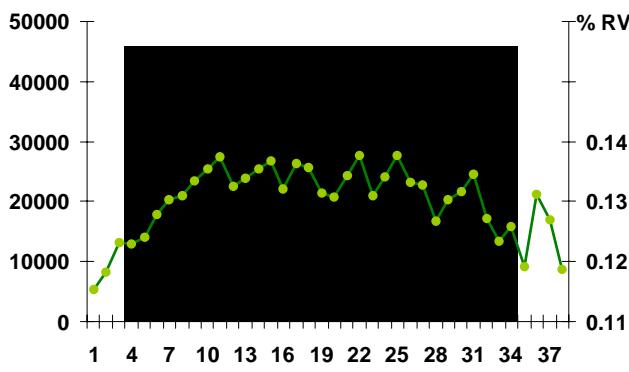
Livraisons avec LOMS réduite :

DRD semaine = 42 000 t

Production de sucre : **Tons RV₂**

$$= 42\,000 \times \sum(\%RV_i)$$

i, semaine de livraison : i ∈ [3,36]



Livraisons avec LOMS réduite :

DRD semaine = 46 000 t

Production de sucre : **Tons RV₂**

$$= 46\,000 \times \sum(\%RV_i)$$

i, semaine de livraison : i ∈ [4,34]

3.4. Modélisation logistique.

3.4.1. Présentation générale du modèle.

- a) Une traduction informatique des schémas de fonctionnement.

Le modèle a été construit à partir des schémas de fonctionnement des systèmes logistiques du bassin d'approvisionnement (figures 8 et 9). On retrouve donc :

- 11 lignes de programmation représentant les UP. Elles traduisent en langage informatique les systèmes logistiques décrits dans les schémas de fonctionnement
- Une partie dédiée à la gestion des livraisons de canne au niveau du millyard.

Pour simplifier son utilisation, une animation des véhicules et un affichage des statistiques les plus importantes ont été incorporés au modèle. En ce qui concerne la programmation proprement dite, nous avons dû recourir par moments à des astuces de modélisation afin d'ajuster le modèle informatique à la réalité et de rester fidèle à notre représentation du bassin d'approvisionnement. Quelques détails concernant les aspects les plus techniques de la programmation sont donnés en annexe 8.

- b) Les outils de la programmation.

Conçu pour modéliser des chaînes logistiques industrielles, ARENA™ dispose d'un certain nombre d'outils que nous avons utilisés pour modéliser les 11 UP et le millyard :

- Des **entités**, qui circulent dans le modèle. Pour nous, chaque entité représente une tonne de canne.
- Des **process**, qui permettent de modéliser les actions et les délais qui s'ensuivent à différents niveaux de la chaîne logistique.
- Des **ressources**, qui permettent de réaliser certains process. Pour nous, il s'agit des coupeuses, des chargeurs Bell, de la balance, des Hysters ou de la grue fixe...
- Des **transporteurs**, qui permettent de déplacer les entités (en l'occurrence, des chargements de canne) d'un endroit physique à un autre.
- Des **plannings**, qui permettent de définir les périodes d'activité et d'inactivité programmées des ressources.

Pour faire fonctionner le modèle, il faut configurer tous ces outils en donnant des valeurs aux paramètres qui les caractérisent. Les données récoltées sur le terrain ou dans la bibliographie, ainsi que les hypothèses de simulation viennent donc renseigner quelques champs importants :

- Les **distances** parcourues par les véhicules et les **vitesses** de transport.
- La **charge** des véhicules. Nous avons pris 12, 22 et 30 tonnes pour les véhicules des UP manuelles (systèmes A,B et C respectivement), 32 tonnes pour les UP mécaniques.
- Les **capacités de coupe** des machines et des coupeurs manuels.
- Les **horaires de travail** des hommes et des machines.
- La **capacité de broyage** de l'usine.
- Les **délais** de chargement, de déchargement et de pesée des véhicules.

Des tableaux récapitulatifs des principaux inputs utilisés sont disponibles en annexes 9 et 10.

3.4.2. Les principes de la modélisation.

Toutes les simulations logistiques sont construites à partir des mêmes principes de base :

- **Le pas de temps : une journée.**

Les statistiques sont récoltées pendant 24 heures à partir de la première livraison à l'usine. On s'affranchit donc de la LOMS, qui ne se reflète qu'à travers la capacité de broyage de l'usine.

- **Le volume : 7 200 tonnes.**

L'usine est capable de broyer 7200 tonnes de canne par jour ($300\text{t/h} \times 24\text{h}$). Sur une semaine, elle est incapable de tenir cette cadence, ne serait-ce que pour des raisons de maintenance : au moins une journée est amputée de 8 heures. Néanmoins, les UP doivent être en mesure de répondre à la demande maximale de l'usine les jours de fonctionnement à plein régime. Sauf indication contraire, on cherche donc à livrer 7200 t en 24 heures dans tous les scénarios.

- **La répartition des tâches entre UP : calcul des volumes à transporter.**

Chaque scénario est caractérisé principalement par le système logistique adopté par les UP mécaniques, les horaires de travail des hommes et des machines, et l'importance donnée à chaque UP en terme de volume de canne à livrer. Pour chaque scénario, les 7200 tonnes sont « distribuées » entre les UP de la façon suivante :

- Répartition entre les 3 zones géographiques, conformément aux pourcentages observés au cours des 6 dernières années.
- Répartition entre UP manuelles et UP mécaniques au sein de chaque zone au *pro rata* du ratio de mécanisation du scénario étudié.
- Répartition du volume des UP manuelles entre UP spiller et UP bundle, en accord avec le ratio Spiller/Bundle du scénario étudié (60/40 sauf indication contraire).
- Pour la zone 2, deux systèmes logistiques associés à la récolte manuelle co-existent (cf. figure 10). Dans tous les scénarios, les systèmes B et C représentent respectivement 65% et 35% du volume livré par les UP manuelles de la zone.

L'hypothèse d'uniformité des livraisons au cours de la saison (cf. modèle d'approvisionnement) a été appliquée ici à l'échelle des livraisons quotidiennes. Les volumes de canne attribués à chaque UP sont représentés sous forme d'un stock de canne à récolter dans lequel chaque unité de production puise des tonnes qu'elle s'efforce ensuite de transporter jusqu'à la sucrerie. Par nécessité, le stock de canne de chaque UP est proportionnel à la capacité du véhicule transportant la canne pour cette UP, les véhicules ne pouvant pas circuler à moitié chargés.

- **Les moyens logistiques – notion de « configuration ».**

Pour chaque scénario étudié, des moyens logistiques sont attribués à chaque UP. Il s'agit de 'ressources' (nombre de machines de récolte ou de coupeurs manuels) et de 'transporteurs' (nombre de remorques et véhicules de livraison) permettant de couper et d'acheminer la canne de la parcelle jusqu'à la sucrerie. Chaque combinaison des onze couples « ressources + transporteurs » forme une **configuration** pour un scénario donné. Les moyens logistiques sont attribués à chaque UP de façon exclusive : une partie de la programmation du millyard est destinée à renvoyer chaque véhicule vers l'UP à laquelle il appartient (cf. annexe 8). Cette règle conduit à une simplification de la réalité mais s'avère nécessaire si l'on veut contrôler l'utilisation des véhicules et en mesurer l'efficacité.

3.4.3. Variables de sortie du modèle.

Les variables de sortie permettent d'évaluer et de comparer les scénarios entre eux. Le principal critère d'évaluation des scénarios consiste à vérifier que chaque unité de production est capable de livrer le volume de canne qui lui est alloué. Les variables qui nous intéressent donc particulièrement sont les volumes de canne livrés par chaque unité de production et le volume de canne broyé au total.

D'autres variables permettent de mesurer l'efficacité des chaînes logistiques dans une configuration donnée et peuvent s'avérer utiles pour comparer des scénarios entre eux ou pour comprendre les raisons de l'inefficacité d'un scénario en identifiant les points de blocage et les marges de manœuvre existantes :

- Temps d'attente moyen et maximal pour le déchargement des véhicules à l'usine.
- Nombre moyen et maximal de véhicules dans la file d'attente à l'usine.
- Temps de rotation des véhicules assurant le transport de la parcelle à l'usine.
- Nombre moyen de rotation par véhicule.
- Capacité de transfert = Vol PU / temps total nécessaire.

D'emblée, nous pouvons souligner la difficulté d'obtenir certaines de ces variables, soit parce que la construction du modèle entraîne des distorsions dans la mesure de certaines variables, soit parce que la construction du modèle complique l'acquisition des données (cf. annexe 8).

3.5. Simulations des scénarios et configurations logistiques.

3.5.1. Principe des simulations.

L'objectif des simulations est double :

- 1) **Exploration** : étudier quelques configurations pour chaque scénario afin d'identifier les points clés de l'organisation du bassin dans l'approvisionnement de la sucrerie.
- 2) **Dimensionnement** : trouver si possible une configuration réaliste pour chaque scénario, dans laquelle toutes les UP sont capables d'acheminer leur canne jusqu'à la sucrerie.

Il existe potentiellement X configurations permettant de remplir l'objectif de livrer toute la canne de toutes les UP demandée par l'usine mais nous ne les connaissons pas et nous ne pouvons explorer que quelques configurations pour chaque scénario. Une méthode heuristique a donc été appliquée, afin de se diriger rapidement vers une configuration satisfaisante.

Variable	Description	Expression
TRM_i	Temps de Rotation Minimum de l'UP _i (cf Annexe 9)	\sum (délais fixes) _i
TRS_i	Temps de Rotation « Simulé » de l'UP _i	$TRM_i + \text{files d'attente}$
Ψ_{ci}	Coefficient d'efficacité de l'UP _i dans la configuration c	TRM_i / TRS_i
V_i	Volume de canne alloué à l'UP _i	Input du scénario
V_{ci}	Volume de canne livré par l'UP _i dans la configuration c	Output configuration
C_i	Capacité de chargement des véhicules de l'UP _i	Input du modèle
N_{ci}	# de camions alloués à l'UP _i dans la configuration c	Input configuration
N_{mi}	# minimum de camions permettant à l'UP _i de livrer V_i	HYPOTHESE

En règle générale, nous n'avons fait varier que le nombre de camions d'une configuration à l'autre. Le nombre de coupeurs et de machines pour chaque UP a été calculé par ailleurs.

$$\underline{1^{\text{ère}} \text{ étape :}} \quad N_{1i} = V_i / C_i \quad \rightarrow \quad \Psi_{1i} \ll 1$$

Le système est saturé, chaque véhicule ne faisant qu'un trajet à la sucrerie. Toute la canne est livrée, mais l'inefficacité est grande car les files d'attente s'allongent à l'entrée de la sucrerie.

2^{ème} étape : Il s'agit ici de s'orienter grossièrement vers une configuration satisfaisante et plus réaliste. Nous nous appuyons pour cela sur trois hypothèses simplificatrices :

- Le Ψ_{ci} de l'UP disposant de N_{mi} camions est proche de 1.
- Ψ_{ci} est négativement corrélé à N_{ci} . Par exemple, si $\Psi_{1i} = 0,5$ on considère que les délais sont deux fois trop longs car il y a deux fois trop de camions dans le système.
- Les camions en excès dans le système appartiennent tous à l'UP_i.

$$\underline{\text{Conclusion :}} \quad N_{2i} = N_{1i} \times \Psi_{1i} \quad \rightarrow \quad 1 > \Psi_{2i} > \Psi_{1i}$$

3^{ème} étape : La configuration 3 est obtenue en appliquant les règles suivantes :

- Si $V_{2i} = V_i$ et $\Psi_{2i} \ll 1$ alors $N_{3i} = N_{2i} - \text{quelques camions}$
- Si $V_{2i} = V_i$ et $\Psi_{2i} \approx 1$ alors $N_{3i} = N_{2i}$
- Si $V_{3i} < V_i$ alors $N_{3i} = [(V_i / V_{3i}) \times N_{2i}] \times 1,10$

4^{ème} étape : Ajustements par tâtonnement. La configuration 3 n'est généralement pas très éloignée d'une configuration satisfaisante. Les derniers ajustements sont alors réalisés en ajoutant ou en éliminant quelques camions à chaque UP.

3.5.2. Situation actuelle et validation partielle du modèle.

a) particularités du scénario étudié.

Le premier scénario simulé s'inspire de l'organisation du bassin d'approvisionnement lors de la saison 2006 :

- taux de mécanisation : 16%.
- système de récolte mécanique dans tout le bassin : système C, livraison semi-directe.
- 3 remorques attribuées à chaque coupeuse mécanique. Dans la réalité, les planteurs utilisent 2 ou 3 remorques par machine, mais il semble que 3 soit le nombre qui permet de maximiser l'utilisation de la machine (cf. annexe 11).
- 30% des volumes est livré la nuit, uniquement par les UP manuelles. La récolte mécanique n'a lieu que pendant la journée.
- Les coupeurs manuels et les machines de récolte travaillent 8 heures par jour.
- Le chargement des véhicules a lieu entre 7 heures et 17 heures. Tout véhicule chargé avant 17 heures effectue sa livraison dans la même journée. Certains véhicules travaillent donc plus de 10 heures par jour.

b) sortie du modèle.

L'application de la méthode heuristique décrite précédemment nous permet d'aboutir à une configuration possible, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : résultats de la simulation – scénario : 16% mécanisation

UP	Configuration		Résultat		Efficacité : critères d'évaluation				
	# véhicules de coupeuses	livraison	Volume livré tonnes	%DRD	TRS moyen (minutes)	# cycles par véhicule	Temps de travail (h)	Capacité de transfert (t/h)	Cap. Transf. / véhicule
M1	1	9	448	100	300	1.56	12.14	37	4.1
M2	2	6	480	100	270	2.50	14.08	34	5.7
M3	1	4	224	100	384	1.75	13.74	16	4.1
SA		27	1380	100	234	3.00	13.08	106	3.9
SB		13	990	100	296	2.46	14.46	68	5.3
SC2		6	540	100	319	2.17	14.31	38	6.3
SC3		9	720	100	391	1.89	14.68	49	5.4
BA		10	924	100	72	5.40	7.03	131	13.1
BB		4	660	100	115	5.25	11.32	58	14.6
BC2		3	360	100	115	2.67	6.24	58	19.2
BC3		4	480	100	177	2.75	10.08	48	11.9
total	4	95	7200	100					

c) principaux résultats.

Le modèle surestime certaines valeurs mais indique des tendances conformes à la réalité.

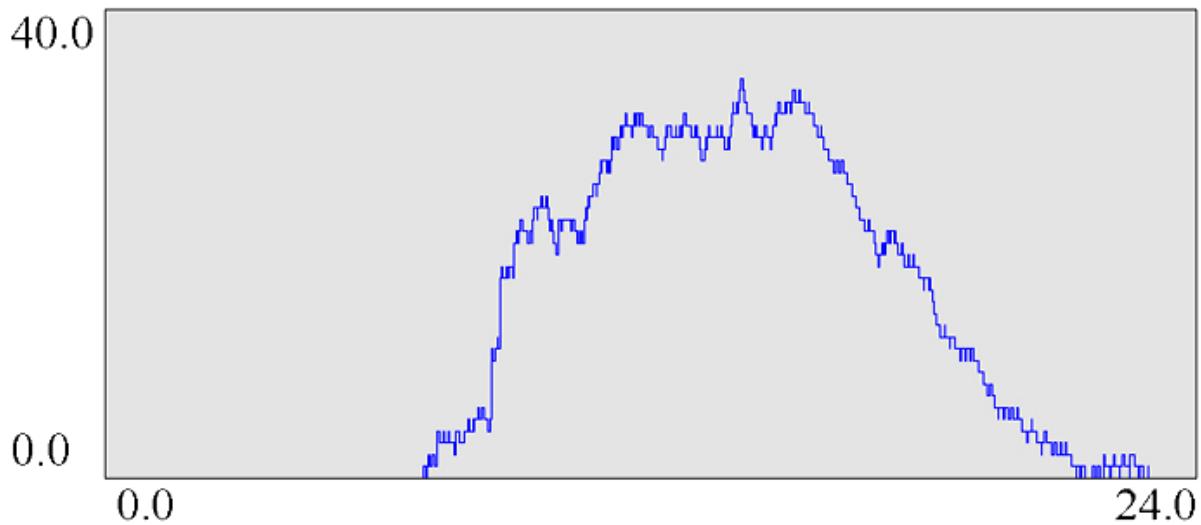
Cela est vrai à plusieurs niveaux, et notamment en ce qui concerne les files d'attente. Les statistiques issues du modèle sont supérieures aux observations du système réel (cf. Tableau 6). Ces écarts proviennent en partie de la rigidité d'un modèle régi par des règles fixes, par rapport à la flexibilité des décisions humaines. L'étape d'initialisation (les premières heures de livraison simulées) est particulièrement délicate à analyser car de nombreux véhicules arrivent au même moment à la sucrerie de façon peu réaliste. Par contre, l'allure de la courbe montrant l'évolution du nombre de véhicules dans la file d'attente est assez fidèle à ce que l'on observe dans la réalité (figure 14). Ceci montre que dans l'ensemble, le fonctionnement du système tel qu'il a été modélisé n'est pas trop éloigné de ce qui se passe en réalité.

Tableau 6 : statistiques concernant les files d'attente à l'entrée de la sucrerie.

	RESULTAT DE LA SIMULATION		REALITE (ESTIMATIONS*)	
File d'attente	Durée de l'attente en heures (max)	# de véhicules dans la queue (max)	Durée de l'attente en heures (max)	# de véhicules dans la queue (max)
Spiller	2,87 (4,25)	21 (55)	0,66 (2,5)	6 (30)
Bundle	0 (0,16)	0 (4)	0,33 (1,5)	4 (15)

* aucune statistique n'est disponible sur la durée et le nombre de véhicules dans la file d'attente à l'extérieur de la sucrerie, avant la balance. Ces estimations sont le résultat de questions posées aux planteurs, pas toujours d'accord entre eux sur les chiffres.

Figure 14 : évolution au cours de la journée du nombre de véhicules dans la file d'attente à l'entrée de la sucrerie pour une configuration donnée.



Le modèle montre qu'en améliorant les conditions de récolte et en travaillant de façon plus efficace au quotidien, le système actuel devrait fonctionner avec une flotte de véhicules plus réduite que celle utilisée aujourd'hui.

95 véhicules de livraison et 4 coupeuses mécaniques suffisent à livrer toute la canne dans le modèle. Cela représente la moitié des véhicules livrant régulièrement à la sucrerie en 2005 et la moitié des machines de récolte utilisées l'année dernière pour couper 16% de la canne du bassin. Quelles sont les raisons de tels écarts ?

En ce qui concerne le nombre de véhicules :

1. Le système actuel est surdimensionné par rapport aux besoins des planteurs. Il n'est donc pas surprenant que le modèle puisse fonctionner avec moins de véhicules.
2. Le temps de travail de la flotte de véhicules dans le modèle est supérieur aux 10 heures fixées dans les plannings. Certains camions du modèle travaillent donc plus que dans la réalité.
3. Certaines UP (notamment les spiller) ont très peu de marge de manœuvre dans la configuration donnée. L'ajout ou la suppression d'un camion dans le système peut les empêcher de livrer toute la canne. Dans la réalité, les planteurs ont plus de marge.

En ce qui concerne le nombre de machines de récolte :

1. Les 8 machines présentes dans le bassin de Noodsberg en 2006 n'étaient pas toutes en activité.
2. Les machines du modèle travaillent 8 heures alors que dans la réalité certaines machines sont très fortement sous-utilisées. La sous-utilisation n'est pas due qu'aux pertes de temps lors des déplacements, des réparations et des pauses : certains planteurs n'ont pas un volume de canne à couper suffisant pour travailler 8 heures par jour.
3. La capacité de coupe effective (moyenne horaire) des machines dans le modèle est largement supérieure à la capacité de coupe effective des machines utilisées actuellement : entre 32 et 54 t/h en fonction des UP dans le modèle, contre 30 ou 35

t/h dans la réalité. Pourtant, la capacité de coupe instantanée de la machine dans le modèle (60t/h) est inférieure de 25% aux mesures effectuées au champ³ et aux indications du constructeur⁴. La différence s'explique donc par la meilleure efficacité du système de récolte tel qu'il a été modélisé, par rapport à la situation réelle :

- De rapides simulations montrent qu'en rabaissant le nombre de remorques par machine de 3 à 2, la capacité de coupe effective des machines du modèle tombe entre 26t/h et 36t/h (cf. annexe 11).
- Les pertes d'efficacité au cours de la coupe n'ont pas été prises en compte dans le modèle, si ce n'est à travers la diminution de 25% de la capacité de coupe instantanée. Ces pertes d'efficacité sont dues essentiellement à une mauvaise organisation du travail et une très faible adaptation des pratiques culturales à la récolte mécanique. La forme et la longueur des parcelles imposent des manœuvres nombreuses. Les variétés choisies ne sont pas adaptées et les planteurs récoltent souvent à la machine les parcelles fortement touchées par la verse. Peu à peu, les pratiques évoluent pour une meilleure efficacité de la récolte mécanique⁵. Le modèle devrait donc mieux correspondre à des situations futures.

Le modèle montre que l'on peut augmenter la capacité de transfert d'une unité de production en augmentant la capacité de coupe plutôt que la capacité de transport.

C'est le cas notamment des UP mécaniques : si l'on augmente le nombre de coupeuses, il est possible de livrer la même quantité de canne avec moins de camions. En effet, la rotation des remorques sur la parcelle est plus rapide, permettant un remplissage plus rapide des camions dont la fréquence des départs pour l'usine augmente. Le choix d'une piste plutôt que l'autre dépend essentiellement de facteurs économiques. Dans la réalité, certains planteurs essaient de jouer sur cet aspect en regroupant deux machines et leurs équipements associés sur la même parcelle à récolter.

Les exploitations les plus proches de la sucrerie sont plus performantes pour transférer la canne.

Les temps de rotation augmentent de façon importante pour les unités de production les plus éloignées de la sucrerie :

- A la base, leur TRM est supérieur à celui des UP les plus proches (cf. annexe 9).
- Leurs premiers véhicules de livraison arrivent à la sucrerie quand la file d'attente est déjà longue. Les pertes de temps sont donc plus importantes.

Les véhicules les plus proches parviennent à réaliser plus de cycles que les véhicules les plus éloignés. Cela se traduit par une capacité de transfert deux fois supérieure des UP les plus proches (cf. tableau 5). Néanmoins, la charge des transporteurs augmentant avec la distance à la sucrerie, les UP éloignées sont capables de livrer toute leur canne avec moins de trajets. Ramenée à l'unité de véhicule, les capacités de transfert de toutes les UP sont d'ailleurs du même ordre de grandeur.

Les UP bundle sont beaucoup plus efficaces que les UP spiller.

Cela se vérifie également dans la réalité. Les délais à l'usine sont beaucoup plus courts pour les véhicules bundle. Il existe deux raisons principales à cela :

1. Les UP bundle ne livrent qu'un tiers de la canne. Les camions de livraison sont donc moins nombreux et la file d'attente plus courte.
2. 5 véhicules bundle peuvent décharger en même temps dans le millyard alors qu'un seul camion à la fois peut décharger de la canne en vrac.

3.5.3. Taux de mécanisation 75% - infrastructure actuelle.

Nous étudions ici les formes d'organisation logistique qui permettent de livrer 7200 tonnes de canne en une journée à une sucrerie broyant 300 t/h et avec 75% de récolte mécanisée dans le bassin. Pour commencer, nous faisons l'hypothèse que le système de récolte mécanique C majoritaire aujourd'hui s'est développé dans tout le bassin. La coupe s'effectue de jour uniquement, comme c'est le cas à l'heure actuelle.

a- Problèmes liés à la généralisation de la coupe mécanique.

La méthode heuristique est bien loin de conduire à une configuration satisfaisante. Avec un nombre de véhicules réaliste, il est impossible de livrer toute la canne à l'usine. Dans le système de livraison semi-direct, les camions et les coupeuses sont en quelque sorte liés par l'intermédiaire des remorques. Dès que les machines s'arrêtent, les camions ne sont plus alimentés. Dès lors il devient difficile de livrer la canne spiller en une demi-journée à une sucrerie de capacité limitée. Le modèle met donc en évidence un point essentiel :

Lorsque la période de coupe et la période de broyage diffèrent, un stockage temporaire de la canne s'avère nécessaire.

On notera que dans le scénario précédent, la majorité des livraisons ont également lieu au cours de la journée alors que la sucrerie fonctionne 24h/24. C'est alors le stock de la canne bundle dans le millyard qui permet de créer un effet tampon, en mettant de la canne à disposition de l'usine pendant les heures de la nuit où il n'y a presque plus de livraisons. On comprend dès lors que l'augmentation de la mécanisation (et donc du ratio Spiller/Bundle) conduit inévitablement à changer toute l'organisation des approvisionnements. Etant donné que l'on ne peut pas constituer de stock de canne spiller dans le millyard sans remettre en cause la traçabilité de chaque livraison, il nous faut étudier la possibilité de livrer la canne 24h/24 ou de constituer des stocks de canne ailleurs qu'à la sucrerie.

b- exploration des solutions possibles.

On obtient de meilleurs résultats en augmentant la proportion de canne bundle.

Le tableau 7 compare deux simulations, où la canne récoltée manuellement est livrée dans son intégralité soit sous forme bundle soit sous forme spiller. Les résultats sont bien meilleurs dans le premier cas, à la fois globalement et pour chaque UP. Outre les remarques déjà faites concernant l'efficacité des UP bundle, nous profitons ici du fait que les véhicules bundle n'entrent pas en concurrence dans la file d'attente avec ceux livrant la canne en tronçons.

Cependant, la canne manuelle ne représentant que 25% du volume total, cette option ne peut pas résoudre à elle seule les problèmes liés à la forte mécanisation.

Tableau 7 : comparaison des performances spiller (gauche) vs bundle (droite).

Configuration		Résultat		Configuration		Résultat			
UP	# véhicules de coupeuses	véhicules de livraison	Volume livré tonnes	%DRD	UP	# véhicules de coupeuses	véhicules de livraison	Volume livré tonnes	%DRD
M1	5	10	992	48%	M1	5	10	1184	58%
M2	5	12	928	41%	M2	5	12	1184	52%
M3	3	15	768	71%	M3	3	15	960	88%
SA		22	684	100%	BA		22	684	100%
SB		8	352	73%	BB		8	484	100%
SC2		4	240	89%	BC2		4	270	100%
SC3		6	270	75%	BC3		6	360	100%
total	13	77	4234	59%	total	13	77	5126	71%

Un surdimensionnement de la flotte permet de stocker la canne dans les véhicules.

Au cours des 8 heures d'activité des coupeuses, les camions de livraison sont remplis de canne et constituent temporairement un « stock sur route ». La sucrerie n'étant pas capable de suivre le rythme des livraisons, la file d'attente à l'entrée de l'usine s'allonge considérablement. Les TRS deviennent trop élevés pour permettre aux camions d'être de retour à la loading zone avant la fin d'activité de la coupeuse (cf. tableau 8).

Bien que toute la canne soit finalement livrée en 24 heures à la sucrerie, ce dispositif n'est absolument pas réaliste tant le nombre de camions nécessaires est élevé. Le coût de ce système en devient totalement rédhibitoire.

Tableau 8 : résultats de la simulation : mécanisation 75% - stock sur route.

Configuration		Résultat		Efficacité : critères d'évaluation				
UP	# véhicules de coupeuses	Volume livré tonnes	%DRD	TRS moyen (minutes)	# cycles par véhicule	Temps de travail (h)	Capacité de transfert (t/h)	Cap. Transf. / véhicule
M1	5	45	100%	2048	490	1.42	22.40	91
M2	5	55	100%	2272	595	1.29	23.42	97
M3	3	30	100%	1088	660	1.13	23.18	47
SA		30	100%	408	203	1.13	9.16	45
SB		10	100%	286	488	1.30	20.25	14
SC2		4	100%	150	643	1.25	21.74	7
SC3		7	100%	210	816	1.00	21.68	10
BA		12	100%	276	76	1.92	2.82	98
BB		5	100%	198	154	1.60	2.76	72
BC2		3	100%	120	162	1.67	5.50	22
BC3		3	100%	150	176	1.33	6.78	22
total	13	204	100%	7206				7.4

Le seul moyen de livrer toute la canne avec le système mécanique C est de s'affranchir du stockage en livrant 24h/24.

Etant donné que la coupe et le transport sont liés dans le système mécanique C, les machines doivent alors travailler jour et nuit. Pour les simulations, cela demande quelques adaptations : la capacité de coupe instantanée a été réduite à 40t/h entre 18 heures et 6 heures afin de prendre en compte les plus grandes difficultés à opérer en conditions nocturnes. Les UP

manuelles, qui ont de petits DRD, livrent uniquement pendant la journée. Les résultats (cf. tableau 9) amènent quelques remarques :

- dans cette configuration, la flotte de véhicules bundle est surdimensionnée, comme l'attestent les temps de travail des véhicules livrant la canne.
- le nombre de véhicules nécessaires à l'échelle du bassin est très bas car :
 - la plupart des livraisons sont étalées sur 24 heures.
 - Avec le passage à la mécanisation, des véhicules de faible capacité ont été remplacés par des camions de 32 tonnes dans les UP les plus proches.
- le nombre de coupeuses nécessaires est très faible (7) car leur durée d'utilisation a considérablement augmenté. Ce chiffre est une estimation minimum car si plusieurs journées à plein régime se succèdent, il faudrait prévoir des arrêts pour maintenance.

Tableau 9 : résultats de la simulation : mécanisation 75% - livraison 24h/24

UP	Configuration		Résultat		Efficacité : critères d'évaluation				
	# véhicules de coupeuses	véhicules de livraison	Volume livré tonnes	%DRD	TRS moyen (minutes)	# cycles par véhicule	Temps de travail (h)	Capacité de transfert (t/h) / véhicule	
M1	2	8	2048	100%	168	8.00	23.53	87	10.9
M2	3	10	2272	100%	180	7.10	23.49	97	9.7
M3	2	10	1088	100%	240	3.40	19.02	57	5.7
SA	12	408	100%	197	2.83	10.46	39	3.3	
SB		5	286	100%	248	2.60	12.09	24	4.7
SC2		3	150	100%	274	1.67	10.08	15	5.0
SC3		4	210	100%	321	1.75	12.14	17	4.3
BA	10	276	100%	73	2.30	3.39	82	8.2	
BB		4	198	100%	114	2.25	5.59	35	8.9
BC2		3	120	100%	162	1.67	5.51	22	7.3
BC3		3	150	100%	229	1.33	6.75	22	7.4
total	7	72	7206	100%					

Livrer 24h/24 en ne coupant que pendant la journée, c'est possible en stockant la canne sur la loading zone.

Il est impossible de stocker la canne dans un système semi-direct, hormis dans les camions de livraison, ce qui est irréaliste. Il faut donc envisager une généralisation des systèmes logistiques indirects si les planteurs refusent de couper la nuit. Les machines travaillent pendant la journée uniquement mais les camions de livraison travaillent 24h/24. Les résultats de la simulation d'un tel scénario sont présentés dans le tableau 10. Il apparaît que :

- 13 coupeuses sont nécessaires pour récolter 75% du volume en 8 heures.
- En livrant la canne 24h/24, l'organisation semi-directe nécessite 28 camions, contre 17 seulement pour l'organisation indirecte, soit 4 et 1,3 camions par machine respectivement. La meilleure efficacité du système indirect s'explique par le découplage entre coupe et transport : les camions ne doivent pas attendre que la machine remplisse des remorques pour être remplis. L'opération de chargement a lieu indépendamment de ce qui se passe au champ.

Tableau 10 : résultats de la simulation : mécanisation 75% - livraison indirecte.

Configuration		Résultat		Efficacité : critères d'évaluation				
UP	# véhicules de coupeuses	Volume livré tonnes	%DRD	TRS moyen (minutes)	# cycles par véhicule	Temps de travail (h)	Capacité de transfert (t/h)	Cap. Transf. / véhicule
M1	5	2048	100%	104	12.80	22.29	92	18.4
M2	5	2272	100%	137	10.14	24.02*	95	13.5
M3	3	1088	100%	207	6.80	24.89*	44	8.7
SA	6	408	100%	118	5.67	11.76	35	5.8
SB	4	286	100%	172	3.25	10.91	26	6.6
SC2	2	150	100%	174	2.50	8.69	17	8.6
SC3	3	210	100%	233	2.33	11.15	19	6.3
BA	4	276	100%	68	5.75	6.87	40	10.0
BB	4	198	100%	115	2.25	5.57	36	8.9
BC2	2	120	100%	113	2.00	4.65	26	12.9
BC3	2	150	100%	176	2.50	8.79	17	8.5
total	13	44	7206	100%				

* le temps de travail concerne la flotte de véhicules uniquement. Il a été mesuré jusqu'au retour sur la LZ du dernier véhicule.

La sucrerie n'a pas dépassé les 24 heures de broyage.

3.5.4. Récolte mécanique 75% - infrastructure plus importante.

a) particularités du scénario.

Le modèle d'approvisionnement nous a permis de simuler un scénario de forte réduction de la LOMS en augmentant la capacité de broyage de l'usine de 13%, passant de 300 t/h à 340 t/h. Nous voulons à présent utiliser le modèle logistique pour trouver une configuration réaliste permettant de répondre à cette demande. Du point de vue de la modélisation, le changement de capacité a des répercussions à plusieurs niveaux :

- la demande de canne de l'usine passe de 7200 tonnes à 8160 tonnes par jour, ce qui augmente l'allocation de toutes les UP d'environ 13%.
- Les délais de déchargement de la canne spiller diminuent, ce qui réduit le TRM de toutes les UP spiller.

Nous travaillons sur un scénario dont le taux de mécanisation est de 75% car les bénéfices agronomiques attendus dans le cadre d'une réduction importante de la LOMS concernent plus particulièrement la récolte mécanique. Nous faisons l'hypothèse que le système de récolte mécanique adopté est le système de livraison indirect, qui s'est révélé plus efficace.

b) principaux résultats.

Il est difficile, en appliquant la méthode heuristique, de trouver une configuration réaliste permettant de livrer toute la canne en 24 heures. Nous nous sommes finalement contentés de la configuration présentée au tableau 11, qui permet de livrer 99% de la canne, et notamment toute la canne tronçonnée. De manière générale, on retiendra que :

L'augmentation de la demande de l'usine conduit à une augmentation nette de la flotte de véhicules, mais pas nécessairement à une augmentation des moyens de coupe.

On met en évidence des effets de seuil sur les besoins en machines : l'augmentation de 13% de la demande de l'usine conduit à l'achat d'une machine supplémentaire. Par contre, le nombre de véhicules nécessaires au transport augmente de façon très significative (+65%) :

Les répercussions d'une augmentation de la demande en canne sur la taille de la flotte de véhicules sont amplifiées par les interactions entre UP au niveau de la sucrerie.

Ces interactions proviennent du fait que toutes les UP sont en compétition pour l'utilisation de la grue de déchargement de l'usine. L'évolution du système devient dès lors très complexe et chaotique lorsque l'on ajoute un nouveau véhicule. Deux configurations intermédiaires sont données à titre d'exemple au tableau 11. On constate que l'allocation de nouveaux véhicules à une UP donnée (M2, M3 et SA dans cet exemple) perturbe les livraisons d'autres UP, incapables dans cette nouvelle configuration de livrer toute la canne qui leur est attribuée (cas de M1 et SC3).

Tableau 11 : résultats de la simulation (gauche) et configurations intermédiaires montrant l'interdépendance entre les UP (droite).

UP	Configuration		Résultat		# véhicules de livraison	Volume livré tonnes	%DRD
	# coupeuses	# véhicules de livraison					
M1	5	9	2304	100%			
M2	6	11	2528	100%			
M3	3	8	1216	100%			
SA		10	408	89%			
SB		5	330	100%			
SC2		3	180	100%			
SC3		4	240	100%			
BA		4	312	100%			
BB		4	220	100%			
BC2		2	150	100%			
BC3		2	180	100%			
total	14	62	8068	99%			

Configuration 1		Configuration 2	
# véhicules de livraison	Volume livré	# véhicules de livraison	Volume livré
5	2304	5	2176
7	2400	8	2528
5	1120	6	1216
6	432	7	420
4	330	4	330
2	180	2	180
3	240	3	210
4	312	4	312
4	220	4	220
2	150	2	150
2	180	2	180
44	7868	47	7922

3.5.5. Synthèse du modèle logistique.

La figure 15 récapitule les résultats des scénarios simulés pour ce qui est des moyens logistiques nécessaires à la récolte mécanique. Plus que l'augmentation du nombre de machines et de véhicules adaptés (le nombre de machines est multiplié par 1,75 ou 3,5 selon les scénarios alors que dans le même temps le taux de mécanisation est multiplié par 4,69), la généralisation de la mécanisation implique surtout des modifications profondes des systèmes logistiques utilisés ou des règles d'approvisionnement de la sucrerie par rapport à la situation actuelle.

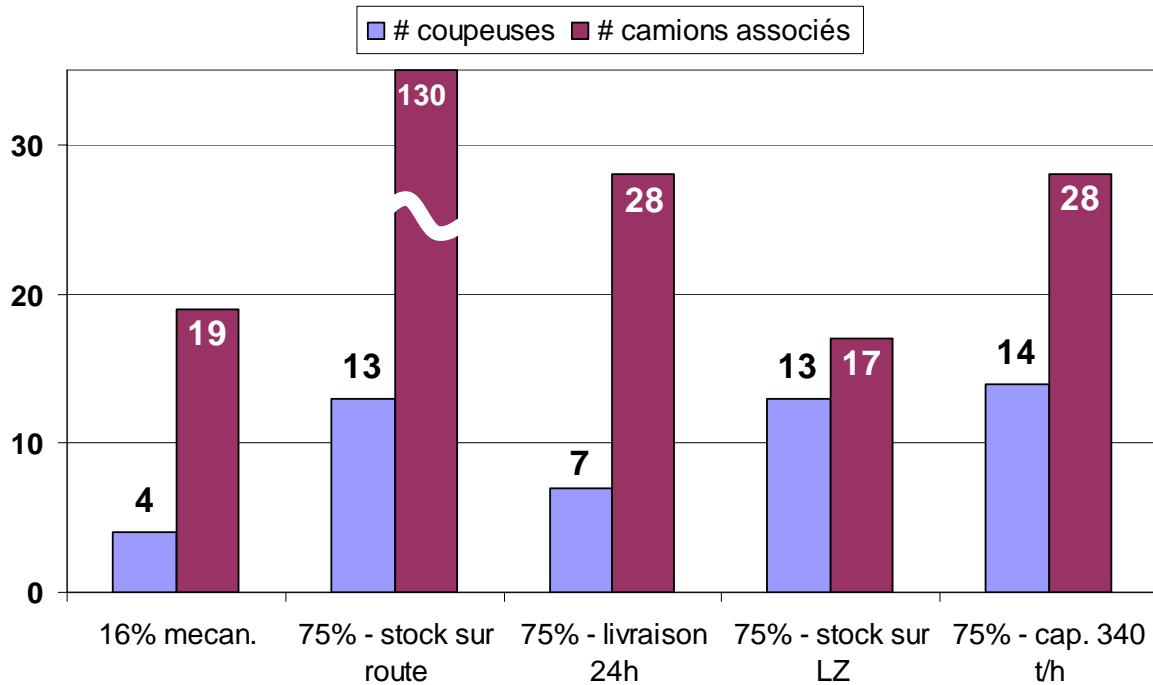
Ainsi, la récolte mécanique pourrait avoir lieu jour et nuit, contrairement à ce qui se passe aujourd'hui. Une autre évolution pourrait être le remplacement par un système de livraison indirecte du système logistique C aujourd'hui majoritaire. La formule de ce nouveau système logistique reste néanmoins à définir car les deux systèmes existants (cf. figure 9) ne semblent pas être en mesure de se généraliser tels quels.

Sur l'utilisation du modèle logistique nous pouvons souligner les points suivants :

- Du fait des interactions entre UP, la capacité de transport de chaque UP déterminée par le modèle n'a finalement de sens que dans la configuration étudiée.

- Comme dans la réalité, la course aux transporteurs peut rapidement mener à un surdimensionnement de la flotte et à une saturation des files d'attente. Il est parfois plus intéressant au contraire de diminuer le nombre de transporteurs pour fluidifier le système et réduire les temps de rotation. D'autres pistes peuvent également être explorées, comme l'augmentation des capacités de récolte et de chargement (Bell ou monte-charge) plutôt que l'augmentation des capacités de transport.
- Dans le modèle plus encore que dans la réalité, le nombre de véhicules nécessaires au transport de la canne pour chaque UP dépend énormément des plannings mis en place et de l'heure à laquelle les premiers camions arrivent à l'usine. En effet, les premiers camions profitent d'une file d'attente peu importante et les premiers cycles sont donc beaucoup plus efficaces que ceux réalisés en milieu de journée.
- La capacité de coupe effective de la machine peut être très inférieure à la capacité réelle. Parmi les principaux facteurs jouant sur les taux d'utilisation de la machine, le modèle prend en compte le volume de canne à couper, le nombre de remorques et le nombre de camions disponibles par machine de récolte, ainsi que leur temps de rotation respectifs. D'autres interruptions (pannes) ou pertes d'efficacité (mancœuvres) peuvent être prises en compte indirectement en diminuant la capacité de coupe instantanée d'une machine.

Figure 15 : récapitulatif des scénarios simulés : configurations des UP mécaniques.



3.6. Synthèse : liens entre modèle d'approvisionnement et modèle logistique.

Les simulations que nous avons réalisées avec le modèle d'approvisionnement et celles que nous avons effectuées avec le modèle logistique sont reliées par un certain nombre de concepts mis en place lors de la conceptualisation du bassin d'approvisionnement ou créés en cours de modélisation pour faciliter l'articulation de deux modèles a priori bien différents.

La base conceptuelle du modèle d'approvisionnement (Gaucher, 1997) a permis de définir le concept de DRD à l'échelle de la semaine. Dès lors, nous raisonnons essentiellement sur des moyennes masquant les variations entre des temps forts (l'activité du système est maximale lorsque tout fonctionne correctement) et des temps de crise (l'activité du système cesse

parfois en raison des aléas climatiques, des pannes ou des grèves). En logistique au contraire, le dimensionnement d'un système ne peut pas être raisonné par rapport à la situation moyenne car il faut que le système soit en mesure de répondre aux temps forts pour compenser les périodes de crise. Dans notre modèle, nous avons estimé que l'ensemble du bassin devait être capable de répondre à la demande maximale de la sucrerie sur une journée. Nous mettons ici en évidence une différence fondamentale entre les deux modèles. Néanmoins, l'hypothèse d'uniformité des DRD au cours du temps que nous avons transcrit du modèle d'approvisionnement vers le modèle logistique est un lien fort entre les deux approches. Nous avons défini en quelque sorte le concept de « DRD maximum » permettant de traduire à l'échelle de la journée les règles d'approvisionnement définies pour la saison.

Au cœur des deux modèles et au centre de la liaison que l'on a établie entre les deux approches se situe la capacité de broyage de l'usine. C'est elle qui détermine dans le modèle d'approvisionnement la LOMS et les DRD. C'est également elle qui détermine les DRD maximum dans le modèle logistique et certains paramètres essentiels du modèle comme les délais de déchargement et donc les temps de rotation. Une configuration simulée avec le modèle logistique peut alors être utilisée pour définir la capacité de transfert d'une unité de production du modèle d'approvisionnement. En outre, nous avons bien vu à travers le scénario à 340 t/h que la capacité de l'usine a une grande influence sur les deux modèles, s'affirmant donc comme un facteur particulièrement intéressant pour étudier les interactions entre logistique et organisation des approvisionnements à l'échelle de la campagne.

Il est intéressant de voir également comment les deux modèles s'articulent pour prendre en compte différemment les aléas et les pertes d'efficacité. Dans le modèle d'approvisionnement, les aléas sont pris en compte relativement simplement comme des événements faisant chuter une moyenne. Dans le modèle logistique, par contre, les aléas climatiques ou les pannes peuvent entraîner des perturbations importantes et difficiles à analyser, sauf si l'on simule plusieurs jours de livraison pour retomber sur des situations proches du modèle d'approvisionnement. Dans notre modèle logistique l'aléa est pris en compte indirectement puisque l'on a simulé des scénarios dans un contexte de livraison maximum, afin de prévenir, ou de rattraper des événements imprévus. Dans tous les cas, la prise en compte des aléas s'appuie sur la surcapacité du système.

Au niveau de l'organisation des approvisionnements, on peut mettre en place un système de report des DRD d'une unité de production vers une autre, suite à des règles d'approvisionnement plus complexes que celles que nous avons modélisées (cf. études Sezela) ou à cause de problèmes de livraison pour une UP donnée. Cela se traduit au niveau logistique par une demande en canne plus importante pour l'une des UP, qui doit être en mesure de fournir l'usine en guise de compensation. Bien que ce genre de scénario n'ait pas été étudié, l'intérêt d'un couplage entre les deux modèles apparaît ici clairement.

4. Discussion.

4.1. Intérêts et limites de la modélisation appliquée et du lien entre modèle d'approvisionnement et modèle logistique.

4.1.1. Principes de simplification et limites du modèle.

Si les bases conceptuelles du modèle MAGI® ont été développées et validées au cours de plusieurs études par le passé, le modèle logistique que nous avons utilisé dans nos simulations a été produit pour l'occasion dans le but d'explorer les possibilités de couplage entre un modèle logistique et un modèle d'approvisionnement. De ce point de vue, l'étape de conception du modèle a été tout autant révélatrice des principes qui sont à la base de cette articulation que les simulations effectuées ensuite. Comme nous le soulignons plus haut, l'utilisation de concepts communs aux deux modèles a constitué le principal lien entre l'approche « MAGI® » et l'approche logistique. Néanmoins, au niveau de la construction du modèle logistique, cette nécessité d'un rapprochement conceptuel avec le modèle d'approvisionnement a conduit à des simplifications importantes des organisations logistiques réelles.

La principale difficulté rencontrée lors de la construction du modèle logistique a été de traduire un concept plutôt abstrait tel que l'unité de production en un certains nombre d'éléments et d'actions très concrets. Il ne s'agit pas ici de détailler chacun des points problématiques, qui sont partiellement abordés en annexe 8. Nous illustrerons simplement par quelques exemples les principaux problèmes que nous avons rencontrés.

1. Le modèle peut conduire à des distorsions de la logique des systèmes représentés.

Par construction, il peut arriver par exemple que les remorques du système mécanique C déversent la canne sur la loading zone alors qu'aucun camion de livraison n'y est présent. Ce problème, lié à l'utilisation du bloc BATCH (cf. annexe 8), transforme temporairement et de façon tout à fait artificielle un système de livraison semi-direct en un système indirect. Une autre programmation permettrait de régler ce problème, mais empêcherait par moments les remorques de déverser leur canne alors que des camions vides se trouvent sur la zone.

2. Les changements d'échelle mènent parfois à des aberrations ou des imprécisions.

Ce problème concerne surtout le chargement des véhicules sur les loading zones, en particulier dans le cas du système mécanique C. Tant que l'on s'en tient à la modélisation d'une exploitation, ARENATM est capable de rester relativement fidèle à la réalité. Les problèmes apparaissent dès que l'on essaie de modéliser une UP comme une grande exploitation, transformant les loading zones en une seule « méga-zone » de chargement. Ce changement d'échelle conduit à des modifications profondes de la logique du système dont le comportement s'éloigne rapidement de la réalité.

Difficile en effet d'imaginer 6 coupeuses et 11 camions (cf. Tableau 11) travaillant ensemble sur la même parcelle. Sans compter qu'il devient compliqué d'analyser ce qui se passe logistiquement. Une chose est sûre : les délais de chargement des camions se trouvent alors fortement réduits par rapport à la situation réelle. Nous devons donc avoir recours à des

artifices permettant de revenir à une échelle qui ait un sens d'un point de vue logistique, sans s'éloigner du concept d'unité de production qui nous permet de faire le lien avec le modèle d'approvisionnement. Des détails sont donnés en annexe 8.

3. Par construction, certains délais de chargement sont systématiquement surévalués.

C'est le cas notamment du délai de chargement des véhicules dans tous les systèmes de livraison indirecte. Contrairement à ce qui se passe dans la réalité, le chargement d'un transporteur dans le modèle ne commence qu'à partir du moment où un volume de canne équivalent à la charge transportée a été accumulé. Encore une fois, c'est l'utilisation du bloc BATCH qui pose problème. Une solution est ici envisageable, au prix d'une programmation beaucoup plus complexe que celle que nous avons mise en place.

4.1.2. Difficultés à définir et à calculer les notions de potentiel et d'efficacité.

Afin de comparer les scénarios logistiques entre eux et d'évaluer les performances de chaque simulation, il nous a fallu définir des critères d'efficacité facilement mesurables.

La faculté de livrer toute la canne en une journée constitue un indice aisément obtenu. Cependant, cette indication ne permet pas de comparer les scénarios entre eux car plusieurs configurations peuvent permettre de livrer la canne avec une efficacité bien différente. Pour mesurer cette efficacité, nous avons retenu des critères relativement simples en apparence. Or dans la pratique, ils n'ont pas été mesurés si facilement. La complexité des systèmes, et certainement aussi la façon dont nous les avons modélisés, rendent la mesure de l'inefficacité particulièrement difficile. Ainsi, pour le calcul des temps de rotation des véhicules, plusieurs méthodes ont été envisagées sans qu'aucune ne soit vraiment plus convaincante que les autres.

Quant au potentiel de chaque UP en terme de capacité de transfert, il est très difficile d'aboutir à une estimation fiable, sachant que le volume de canne acheminé de la parcelle à l'usine en une journée ne dépend pas uniquement de l'UP concernée. Faut-il, pour une configuration donnée, simuler l'approvisionnement de la sucrerie par une seule UP afin de calculer le volume maximal que celle-ci est capable de livrer en une journée ? Ou faut-il au contraire privilégier la définition du potentiel telle que nous l'avons envisagée, c'est-à-dire en contrignant le volume par des DRD maximum et une concurrence entre UP ? La question se pose également de savoir comment les planteurs eux-mêmes estiment dans la réalité la capacité de leur système logistique. Et comment ils calculent leur marge de manœuvre en terme de surcapacité. L'expérience historique doit avoir une grande importance dans l'estimation des volumes qu'ils sont capables d'acheminer jusqu'à l'usine.

4.1.3. Variables non prises en compte dans les modèles.

Dans le modèle logistique que nous avons construit, les chaînes logistiques ont été simplifiées par rapport à la réalité, en regroupant notamment certaines opérations en une seule action dont le délai est plus important. Les autres simplifications concernent plutôt le manque de flexibilité du modèle ou l'absence de variabilité dans les délais des diverses opérations. Certains critères importants au quotidien dans l'organisation des approvisionnements n'ont pas été modélisés. C'est le cas par exemple des pauses en milieu de journée ou de l'inactivité des machines de récolte lorsqu'elles sont déplacées d'une exploitation à une autre. Il serait

possible de les prendre en compte à travers une diminution de la capacité de coupe instantanée des machines. Mais reste à évaluer de combien cette capacité devrait être réduite.

Dans le modèle d'approvisionnement, nous n'avons pas pris en compte l'impact possible d'une réduction importante de la LOMS sur les rendements et la qualité de la canne livrée à la sucrerie. Nous manquons en effet de données suffisantes et d'études expérimentales pour formuler des hypothèses réalistes à ce sujet. Nous n'avons donc mesuré que les gains obtenus en tirant profit de la forme en cloche de la courbe RV. Il est possible que la réduction de la LOMS ait un impact positif sur le %RV de la canne, ce qui augmenterait ces gains. L'amélioration de la qualité de la canne serait due à un meilleur entretien des cultures, grâce à une intersaison plus longue. Nous pouvons également compter sur de moindres dommages subis par les souches de canne si l'on évite les périodes pluvieuses de la fin de l'année, qui sont les plus à même d'entraîner des problèmes de compaction. A l'heure actuelle, les planteurs préfèrent prendre le risque de récolter en condition humide les dernières semaines de la saison plutôt que de reporter la coupe de la canne au début de la saison suivante.

Le modèle d'approvisionnement ne prend pas non plus en compte l'impact de la récolte mécanique sur les rendements et la qualité de la canne livrée à la sucrerie. Dans un contexte de généralisation de la mécanisation, les quantités et la qualité de la canne livrée à l'échelle du bassin d'approvisionnement pourraient changer et modifier ainsi les résultats des simulations que nous avons effectuées. Le problème là encore se situe au niveau du manque de références théoriques. Les recherches effectuées jusqu'à présent sont parfois contradictoires et montrent en tout cas que les résultats dépendent de nombreux facteurs allant de critères agronomiques (conditions climatiques, caractéristiques de la parcelle, variétés récoltées, ...) aux réglages des machines de récolte (De Beer and Purchase, 1999 et Meyer et al., 2005). On notera à titre d'exemple que la puissance du ventilateur peut jouer à la fois sur la qualité de la canne livrée et les rendements de récolte (cf. annexe 6).

Certains des planteurs de Noodsberg ont mené quelques essais mais les résultats varient également d'une exploitation à une autre, et vu qu'aucun protocole expérimental n'a été strictement suivi, il est difficile d'en tirer des conclusions. D'autant plus que certaines parcelles ont été brûlées avant d'être coupées alors que d'autres parcelles ont été récoltées en vert. Apparemment, la canne récoltée mécaniquement gagnerait en qualité à hauteur de 10%, grâce notamment à un délai entre coupe et broyage beaucoup plus court que pour la canne coupée manuellement⁶. Cela reste néanmoins à vérifier. D'autant que d'autres sources prétendent que la canne tronçonnée récoltée en vert perdrat 0,5 point en %RV⁷. En ce qui concerne les rendements, les variations entre exploitations sont importantes. Des problèmes de repousse de la canne dus à une forte compaction du sol ont été signalés à plusieurs reprises⁸. Pour notre travail, les informations disponibles nous semblent en tout cas trop imprécises et trop peu sûres pour pouvoir en tenir compte dans nos simulations.

4.2. Perspectives : scénarios envisageables par rapport à la mécanisation de la récolte.

Il serait intéressant à présent d'utiliser les deux modèles et les connaissances acquises au cours de cette étude pour approfondir certains points et explorer de nouvelles pistes concernant la mécanisation de la récolte.

4.2.1. Généralisation de la récolte en vert.

Aujourd’hui encore, une large majorité de la canne récoltée mécaniquement est brûlée avant d’être coupée. Néanmoins, les intérêts d’une récolte en vert sont multiples et pourraient pousser les planteurs à choisir cette option avant même que des lois ne les y obligent pour diminuer l’impact environnemental du brûlage.

Parmi les principaux avantages agronomiques de la récolte en vert, la constitution d’un mulsh épais sur la parcelle permet de lutter très efficacement contre les adventices et de réduire par la même occasion le coût des traitements phytosanitaires. L’économie réalisée peut même aujourd’hui rendre la récolte mécanique plus rentable que la récolte manuelle⁹. Le mulsh représente en outre l’équivalent d’un apport de 100mm d’eau (SASA) et permet donc d’augmenter significativement l’état d’humidité du sol à la repousse, ce qui est appréciable dans les zones les plus sèches. Au final, on peut s’attendre à voir les rendements en canne augmenter si la récolte en vert se généralise.

Au niveau de la qualité, le problème est un peu plus complexe. A priori, la teneur en sucre de la canne à la livraison devrait être plus élevée car le brûlage accélère la dégradation des sucres. Néanmoins, l’indice de qualité – le %RV – prend en compte la teneur en fibre de la canne, qui est généralement plus élevée lors de la récolte en vert. A condition de pouvoir s’appuyer sur des hypothèses solides, nous devrions être en mesure de simuler des scénarios de récolte en vert avec le modèle d’approvisionnement comme avec le modèle logistique. Dans ce dernier modèle, le passage à la récolte en vert aurait également des conséquences importantes, notamment au niveau de la capacité de coupe des machines. Selon les sources, cette capacité chute de 20 à 30% par rapport à la récolte après brûlage¹⁰. Le fait que le passage à la récolte en vert ait des effets à des niveaux très différents sur les deux types de modèle représente un plus quant à notre objectif d’étudier les liens entre modèle logistique et modèle d’approvisionnement.

4.2.2. Autres scénarios d’intérêt.

D’un point de vue logistique, d’autres scénarios pourraient être étudiés en développant certains aspects que nous avons volontairement simplifiés pour les présentes simulations.

Il pourrait par exemple être intéressant de modéliser la troisième file d’attente mise en place récemment et d’analyser l’impact d’approvisionnements planifiés sur la capacité des unités de production ou sur la taille de la flotte de véhicules.

Nous pourrions nous intéresser à d’autres formes de récolte mécanique, et notamment la récolte en canne longue. Bien que personne ne semble prêt à se lancer dans cette voie (les machines testées pour le moment n’ont pas convaincu et nombreux sont ceux qui contestent l’intérêt même de ce type de récolte), le coût plus réduit de cette mécanisation de la récolte et la possibilité de travailler dans des parcelles plus pentues pourraient à terme favoriser l’apparition de quelques coupeuses en canne longue. Elles remplaceraient alors tout simplement les coupeurs dans un système très proche du système manuel actuel.

Enfin, des scénarios simulant des changements importants de l’infrastructure de l’usine (ajout d’une deuxième ligne de production, avec des tables spécialement conçues pour la canne tronçonnée) permettraient d’alimenter certains débats récurrents entre planteurs et industriels avec quelques éléments de réponse.

4.3. Possibilités d'utiliser cette approche comme aide à la décision.

Pour le moment, le modèle logistique que nous avons construit demande à être validé et corrigé en fonction des exigences et des commentaires des personnes intéressées par ce genre de simulation. La présentation des résultats de l'étude aux planteurs, chercheurs et industriels de Noodsberg devait favoriser une discussion sur la démarche et encourager l'appréciation du modèle par de possibles « clients ». Dans l'ensemble, les commentaires ont été positifs mais peu constructifs, dans la mesure où le modèle n'a pas pu être présenté dans le détail et que les remarques n'ont pas servi de critique comme nous l'attendions.

Nous pouvons néanmoins légitimement penser qu'une fois les deux modèles bien en place, des scénarios variés devraient pouvoir être modélisés afin de répondre aux questions des planteurs ou de la sucrerie. Signalons toutefois que les modèles actuels devraient être accompagnés de calculs économiques approfondis pour prétendre servir d'aide à la décision auprès des acteurs de l'industrie sucrière. Il serait d'ailleurs intéressant d'évaluer les scénarios que nous avons simulés d'un point de vue économique. Un certain nombre d'indicateurs économiques simples, tels que le coût des machines de récolte et des véhicules de transport, pourrait compléter efficacement les résultats que nous avons présentés.

Avec l'incorporation de données économiques au modèle, nous serions capables d'apporter des réponses intéressantes à certaines questions telles que le nombre optimal de remorques à utiliser par machine de récolte.

Conclusion.

Du strict point de vue des simulations et des résultats obtenus, nous pouvons constater que cette étude confirme ce que d'autres études en cours semblent montrer : la flotte de machines de récolte et de camions utilisée aujourd'hui dans le bassin de Noodsberg devrait suffire à récolter toute la canne mécaniquement s'il le fallait. Ce résultat surprenant nous a permis de mettre en évidence l'extrême inefficacité des systèmes d'organisation des approvisionnements mis en place à l'heure actuelle. La présentation de ces résultats aux principaux intéressés le 25 juillet 2007 et la discussion qui a suivi ont montré que les planteurs comme l'industriel sont conscients des problèmes d'inefficacité du système dans son ensemble. Néanmoins, ils souhaiteraient utiliser le modèle logistique construit pour proposer et évaluer des solutions aux problèmes actuels plutôt que des propositions pour des scénarios alternatifs concernant des situations futures. Si l'on ne peut répondre aux attentes de ceux qui réclament une optimisation du système actuel, le modèle de simulation que nous avons développé devrait être en mesure d'apporter un certain nombre de réponses sur d'autres aspects que la mécanisation.

En ce qui concerne les simulations effectuées avec le modèle d'approvisionnement, elles montrent que les gains de sucre obtenus par la réduction de la LOMS ne sont pas aussi importants à Noodsberg que ce que ne l'envisageaient les planteurs. Il n'en reste pas moins que la démarche utilisée est valable pour d'autres bassins canniers où des courbes RV plus prononcées pourraient conduire à des gains plus importants. Par ailleurs, ce qui nous importe dans le cadre de cette étude, c'est avant tout de comprendre l'articulation qu'il peut y avoir entre une réduction de la LOMS et le dimensionnement des systèmes logistiques permettant l'acheminement de la canne de la parcelle jusqu'à l'usine. A ce niveau là, nous avons montré que le principal lien entre les deux modèles était la capacité de l'usine. Etant donné qu'un système logistique doit être capable de répondre en une journée à une demande maximale de l'usine, l'organisation logistique du bassin peut être la même pour des LOMS différentes tant que la capacité de l'usine ne change pas.

Avec l'hypothèse d'une augmentation de la mécanisation, nous avons pu explorer de façon plus approfondie les liaisons entre le modèle d'approvisionnement et le modèle logistique. Il apparaît que les deux modèles sont reliés essentiellement par une conceptualisation commune du bassin d'approvisionnement et que l'on a dû faire appel à des artifices pour adapter certains des concepts un peu abstraits du modèle d'approvisionnement au réalisme très concret du modèle logistique. L'exercice n'est pas toujours évident, néanmoins nous pouvons envisager à terme de travailler sur bon nombre de questions par allers-retours successifs entre les deux types de modèles afin d'étudier les impacts de décisions stratégiques sur la logistique, et réciproquement. Finalement, la complémentarité des deux modèles peut s'avérer très intéressante, notamment pour traiter avec des points de vue différents la question des aléas et des surcapacités. Reste à ajouter une dimension économique à ces simulations pour aboutir à des conclusions plus constructives pour les acteurs du bassin d'approvisionnement.

Notes.

1. Entretien avec Peter Lyne, SASRI. Le 30/04/2007.
2. Entretien avec Julius de Lange, Noodsberg Cane Procurement Manager. Le 02/05/2007.
3. Les mesures effectuées sur un chantier de récolte de H.K. le 06/06/2007 ont conduit aux résultats suivant : 77 tonnes/heure en capacité de coupe instantanée, avec brûlage préalable.
4. Données constructeur CLAAS – capacité de coupe instantanée : 80 t/h.
5. Entretien avec H.K., planteur. Le 06/06/2007. Les parcelles sont replantées en lignes parallèles selon l'axe de plus grande longueur.
6. Entretien avec E.G., planteur. Le 18/04/2007. Des comparaisons entre des parcelles récoltées manuellement et des parcelles récoltées mécaniquement en vert ont conduit à des RV 10% supérieurs pour les parcelles récoltées mécaniquement.
7. Entretien avec Geoff Maher. Le 02/05/2007.
8. Entretiens avec E.G. et R.F., planteurs. Le 18/04/2007 et le 25/04/2007.

Bibliographie.

- Arjona E., Bueno G., Salazar L.** (2001). An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of sugarcane plantation. Computers and Electronics in Agriculture, 32 : 247-264.
- Barnes A., Meyer E., Hansen A., De La Harpe E., Lyne P.** (1998). Simulation modelling of sugarcane harvesting and transport delays. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 72 : 18-23.
- Beamon B.** (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. International Journal of Production Economics, 55 : 281-294.
- Chen I.J., Paulraj A.** (2004). Towards a theory of supply chain management: the construct and measurements. Journal of Operations Management, 22 : 119-150.
- Croom S., Romano P., Giannakis M.** (2000). Supply chain management: an analytical framework for critical review. European Journal of Purchasing & Supply Management, 6 : 67-83.
- de Beer A.G., Purchase B.** (1999). Field Mechanisation And Factory Performance. Part1: Field Operations. Proceeding of ISSCT – Agricultural Engineering section.
- Dube E.** (2007). Evaluating modern sugarcane supply chain management methodologies through the use of information systems. (non publié).
- Eliashberg J., Steinberg R.** (1987). Marketing-production decisions in an industrial channel of distribution. Management Science, 33 : 981-1000.
- Gaucher S.** (1996). Analyse et modélisation de l'approvisionnement des sucreries de la Réunion, phase préliminaire. Mémoire de DAA Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Gaucher S.** (1997). Organisation de l'approvisionnement des sucreries de canne : conception d'un modèle d'aide à la décision. Mémoire de DEA Université Paris Dauphine.
- Gaucher S., Le Gal P.-Y., Soler L.-G.** (2004). Modelling supply chain management in the sugar industry. Sugar Cane International, 22 : 8-16.
- Georgiadis P., Vlachos D., Iakovou E.** (2005). A system dynamics modelling framework for the strategic supply chain management of food chains. Journal of Food Engineering, 70 : 351-364.
- Grunow M., Günther H.-O., Westinner R.** (*accepté*, 2007). Supply optimisation for the production of raw sugar. International Journal of Production Economics.

Guilleman E. (2002). Prise en compte de la qualité de la canne à sucre dans l'organisation des approvisionnements d'une sucrerie : application d'une démarche de simulation au bassin cannier de Sezela (Afrique du Sud). Mémoire de DAA – Institut National Agronomique Paris-Grignon.

Guilleman E., Le Gal P.-Y., Meyer E., Schmidt E. (2003). Assessing the potential for improving mill area profitability by modifying cane supply and harvest scheduling: A South African study. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 77 : 566-579.

Higgins A., Muchow R., Rudd A., Ford A. (1998). Optimizing harvest date in sugar production: a case study for the Mossman mill region in Australia. I. Development of operations research model and solution. Field Crop Research, 57 : 153-162.

Higgins A., Muchow R. (2003). Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry. Agricultural Systems, 76 : 623-638.

Higgins A., Antony G., Sandell G.; Davies I., Prestwidge D., Andrew B. (2004). A framework for integrating and optimising a complex harvesting and transport system for sugar production. Agricultural Systems, 82 : 99-115.

Higgins A., Thorburn P., Archer A., Jakku E. (*accepté, in press*). Opportunities for value chain research in sugar industries. Agricultural Systems.

Iannoni A.P., Morabito R. (2006). A discrete simulation analysis of a logistics supply system. Transportation Research Part E, 42 : 191-210.

Lee C. (1978). A simulation model of sugarcane supply system. JAST Journal, 51-66.

Le Gal P.-Y., Meyer E., Lyne P., Calvinho O. (2004a). Value and feasibility of alternative cane supply scheduling for a South African mill supply area. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 78 : 81-94.

Le Gal P.-Y., Lejars C., Lyne P., Meyer E. (2004b). De la diversité spatiale aux performances des bassins d'approvisionnement : cas des sucreries de canne. Cahiers Agriculture, 13 : 554-562.

Le Gal P.-Y., Lyne P.W.L., Meyer E., Soler L.-G. (*à paraître*). Impact of sugarcane supply scheduling on mill sugar production: a South African case study. Agricultural Systems.

Lejars C., Le Gal P.-Y., Auzoux S. (*accepté, 2007*). A decision support approach for cane supply management within a sugar mill area. Computers and Electronics in Agriculture.

Loison S. (1999). Analyse et modélisation de la logistique d'approvisionnement des sucreries de canne à la Réunion et à L'Ile Maurice. Mémoire de DAA – Institut National Agronomique Paris-Grignon.

McCown R.L. (2002). Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms and prospects. Agricultural Systems, 74 : 179-220.

Meyer E., Domleo K., Bliss J., Maher G.W. (2000). Assessing the viability of a fully mechanized harvesting operation for a large sugarcane estate. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 74.

Meyer E., Norris C., Jacquin E., Richard C., Scandaliaris J. (2005). The impact of green cane production systems on manual and mechanical farming operations. Proceedings ISSCT, Vol. 25.

Moor G.M., Wynne A.T. (2001). Economic maximisation of grower and miller sugar cane profits: optimising the length of milling season at South African sugar factories. International Sugar Journal, 103 : 512-516.

Robinson S. (1992). Successful simulation. A practical approach to simulation projects. McGraw-Hill Book Company. Maidenhead, Berkshire, SL6 2QL, England.

Roy B. (1992). Science de la décision ou science d'aide à la décision ? Revue Internationale de Systémique, 6 : 497-529.

Schaller D. (1997). Illovo Sugar – Sezela, Simulation Project of the Cane Supply Operation, Unpublished Final Report. Simulation Services cc. Durban, South Africa.

Turban E., Meredith J.R. (1981). Fundamentals of management science. 5th ed. Richard D. Irwin Inc. Homewood, Illinois, USA.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Rémunération des différents acteurs de la filière sucrière sud-africaine.

ANNEXE 2 : La culture de la canne à sucre.

ANNEXE 3 : La qualité de la canne à sucre.

ANNEXE 4 : Définition de la Recoverable Value (RV).

ANNEXE 5 : Comparaison des courbes RV des trois zones géographiques du modèle.

ANNEXE 6 : Principe de fonctionnement de la machine de récolte.

ANNEXE 7 : La mécanisation de la récolte de canne à sucre.

ANNEXE 8 : Description de quelques parties du modèle logistique.

ANNEXE 9 : Inputs du modèle logistique et calcul des TRM.

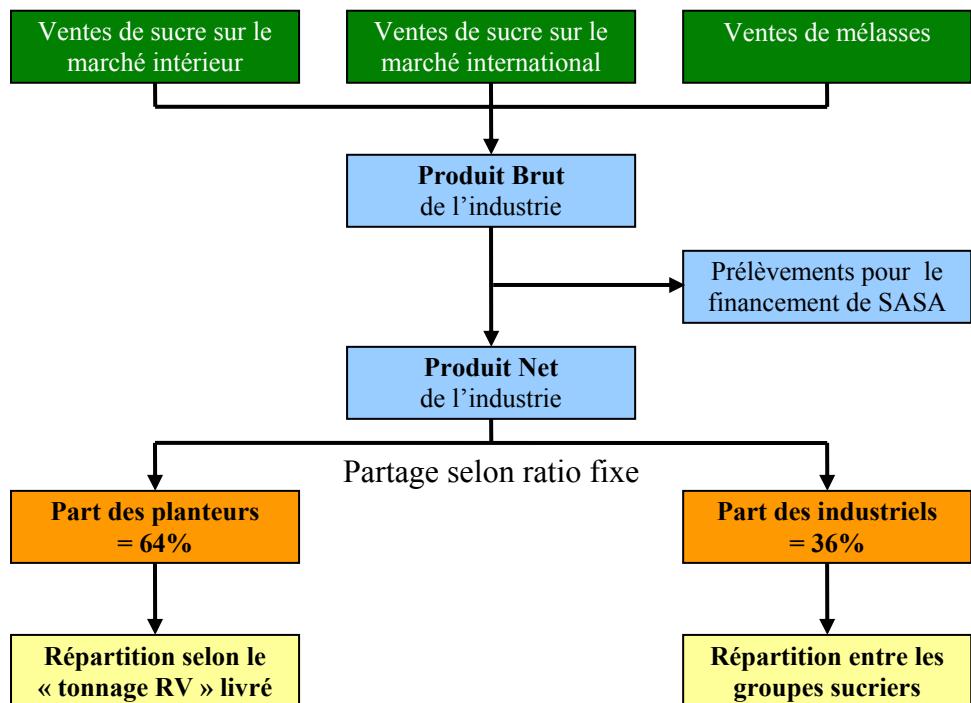
ANNEXE 10 : Inputs du modèle logistique – caractéristiques de la machine de récolte.

ANNEXE 11 : Comparaison par simulation de deux configurations de récolte différentes.
2 remorques par coupeuse vs. 3 remorques par coupeuse.

ANNEXE 12 : Photos des systèmes de coupe, du transport de la canne et de l'usine.

Annexe 1 : Rémunération des différents acteurs de la filière sucrière sud-africaine

Source : SASA



Annexe 2 : La culture de la canne à sucre.

Sources :

- **Manuel technique de la canne à sucre** (2006). *Centre technique interprofessionnel de la canne et du sucre (Ctcs) de la Guadeloupe.*
- **SASA**

La canne à sucre (*Saccharum officinarum*) est une graminée tropicale très productive dont l'aire de culture s'étend de 35° de latitude nord à 30° de latitude sud. Elle pousse pratiquement dans tous les sols, qu'ils soient très argileux ou sablonneux. Elle préfère cependant un sol assez aéré et bien irrigué. Les rendements en canne à la récolte sont de l'ordre de 100t/ha.

La canne à sucre pousse tout au long de l'année. Profitant de températures élevées et de précipitations abondantes, la croissance végétative est relativement rapide. Sous l'influence du méristème terminal, la plante croît essentiellement en hauteur et n'émet pas de ramifications. La phase de maturation, au cours de laquelle la canne accumule des réserves de sucre, est déclenchée par la floraison ou par un stress hydrique ou thermique (période plus sèche ou plus froide). Le remplissage du sucre s'effectue du bas vers le haut de la tige. En Afrique du Sud, ce stress a lieu à la sortie de la saison des pluies, au cours du mois de mars.

Les planteurs essaient de récolter la canne au moment où la richesse en sucre atteint son maximum. Dans de nombreuses régions, la coupe a lieu au bout de 9 à 12 mois. Dans le bassin de Noodsberg, le cycle de culture dure près de 24 mois car sur les plateaux des Midlands, les hivers froids ralentissent la croissance de la canne. Chaque année, les planteurs ne récoltent donc que 50 ou 55% de leur canne. Seuls les planteurs situés dans des zones touchées par le gel récoltent la canne annuellement. Ils plantent alors des variétés adaptées et irriguent leur canne pour stimuler la croissance. Le gel tue le bourgeon terminal et déclenche la ramification, ce qui conduit à la consommation du sucre accumulé.

La saison de coupe et de broyage de la canne dure généralement plusieurs mois. En Afrique du Sud, elle s'étend sur 9 mois, de mars à décembre, au cours de la saison sèche. Les dates de plantation de la canne sont donc étalées sur l'année afin d'avoir de la canne à récolter tout au long de la saison.

La canne à sucre est une plante pluriannuelle. Les plants de canne sont généralement propagés par boutures. Les boutures sont enterrées et les bourgeons dormants (« yeux ») peuvent alors se développer et donner naissance aux tiges primaires qui seront récoltées. Lors de la coupe, une partie de la tige est laissée en place pour une nouvelle pousse. A chaque nouvelle récolte, les performances d'une bouture décroissent : les rendements en canne et en sucre sont moins élevés et la plante met plus de temps à arriver à maturation. Après quelques cycles de culture, il est donc nécessaire de planter de nouvelles boutures. La fréquence de renouvellement varie beaucoup selon les régions de culture et les variétés utilisées. Souvent, le renouvellement a lieu au bout de 4 ou 5 cycles. Dans le bassin de Noodsberg, il n'est pas rare que les planteurs gardent la même bouture pendant 6,7 voire 8 cycles. Cela représente entre 12 ans et 16 ans de culture. Aujourd'hui, les planteurs tendent cependant à augmenter la fréquence de renouvellement, notamment afin de bénéficier des avancées génétiques proposées par les nouvelles variétés. En passant à la mécanisation, il est en effet recommandé de choisir des variétés droites et moins feuillues, qui facilitent le travail des coupeuses mécaniques.

Annexe 3 : La qualité de la canne à sucre.

Sources :

- **Loison S. (1999). Analyse et modélisation de la logistique d'approvisionnement des sucreries de canne à la Réunion et à L'Ile Maurice. (mémoire DAA)**
- **Canegrowers Association**
- **de Beer A.G., Purchase B. (1999). Field Mechanisation And Factory Performance. Part2: Factory Operations.. Proceeding of ISSCT – Agricultural Engineering section.**

La richesse en sucre de la canne est le premier critère de qualité à considérer car elle détermine le potentiel de production de sucre pour une livraison donnée. La richesse en sucre au moment du broyage dépend essentiellement :

- De la richesse en sucre de la canne au moment de la récolte.

Les phénomènes physiologiques qui sont à la base du remplissage du sucre sont mal connus et il est difficile de prévoir les valeurs de richesse en sucre de la canne par avance. Par contre, on constate que la teneur en sucre de la canne au moment de la récolte varie au cours de la saison selon une courbe en cloche : la canne coupée en début (mars-avril) ou en fin de saison (octobre-novembre) est moins riche en sucre que la canne coupée en milieu de saison, pendant les mois d'hiver suffisamment froids pour stresser la plante et provoquer l'accumulation de sucre.

A Noodsberg, les planteurs tentent d'augmenter la richesse en sucre de la canne récoltée en début de saison en pulvérisant par avion des agents chimiques de maturation permettant de stopper la croissance végétative et de favoriser la production de sucre.

- De la dégradation des sucres entre la coupe et le broyage.

La richesse en sucre de la canne mesurée à la sucrerie au moment du broyage est inférieure à celle qui pourrait être mesurée au champ au moment de la coupe car les sucres contenus dans la tige sont dégradés par des microorganismes à partir du moment où la canne est coupée. Là encore, il est difficile de déterminer à l'avance l'état de dégradation des sucres ou de calculer de façon rétroactive la richesse en sucre de la canne sur pied à partir des mesures effectuées après broyage. On sait néanmoins que toute pratique abîmant la canne et favorisant la pénétration des microorganismes est susceptible d'accélérer le processus de dégradation :

- **Le brûlage** : la couche cireuse qui recouvre normalement la canne est alors éliminée et la surface peut se fendiller sous l'effet de la chaleur. La dégradation des sucres est donc moins rapide en récolte en vert.
- **Le dépôt au sol des cannes**, dans la parcelle ou sur la loading zone : c'est à ce niveau que se concentrent les microorganismes. Cette pratique conduit également à des teneurs en matières étrangères (terre) plus élevées.
- **La coupe** : la section de la canne constitue l'un des endroits les plus vulnérables. Les tronçons obtenus par coupe mécanique sont beaucoup plus vulnérables à l'attaque des microorganismes. La dégradation des sucres est donc plus rapide en récolte mécanisée.

Après la coupe, la dégradation des sucres se poursuit jusqu'à l'étape de clarification du jus sucré à l'usine. Il est donc nécessaire de réduire au maximum les délais entre coupe et broyage (Harvest To Crush Delay) si l'on veut éviter une dégradation des sucres trop poussée.

Tableau 1 : Estimation des délais limites coupe-broyage (Fauconnier, 1991).

Mode de récolte	Délai limite coupe-broyage
Cannes entières vertes	48 h
Cannes entières brûlées	24 h
Cannes tronçonnées	12 h

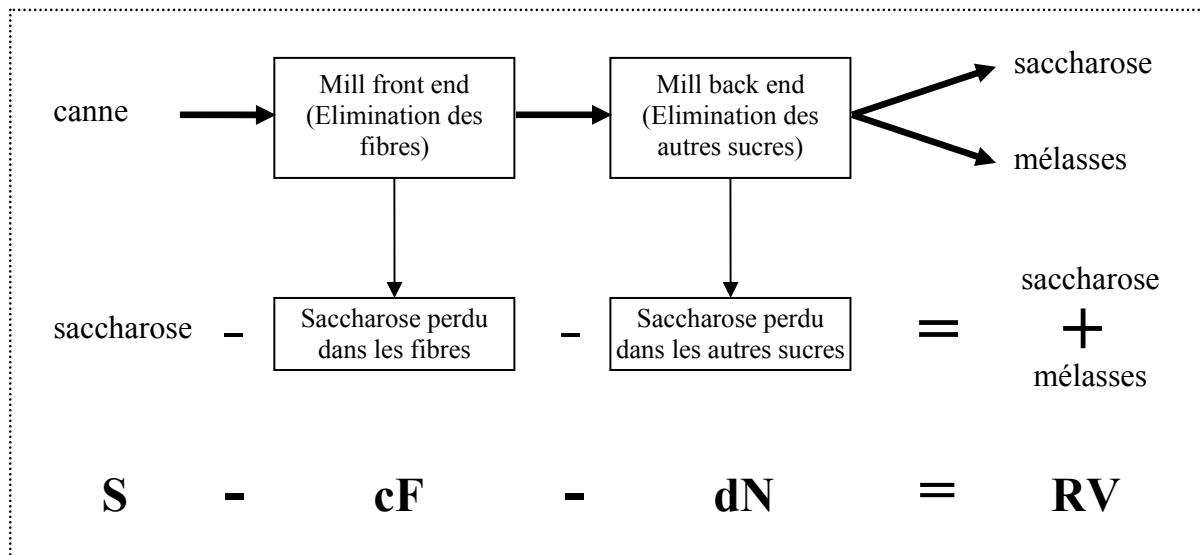
A Noodsberg, les HTCD sont très élevés, la canne coupée manuellement étant parfois livrée après 3 jours de stockage sur la parcelle. Dans le cas de la canne bundle, un autre problème s'ajoute à cela : l'organisation du milliard fait que certains ballots chaînés livrés en début de semaine ne sont broyés qu'après 4 ou 5 jours de stockage, au cours desquels la richesse en sucre de la canne diminue. Les planteurs concernés se sentent abusés car les mesures de qualité ne sont réalisées qu'à l'intérieur de la sucrerie, une fois la canne broyée. La dégradation des sucres au cours du stockage de la canne dans le milliard s'accompagne donc pour eux d'une perte de revenus alors qu'ils ne sont pas responsables de la gestion de l'usine.

Si la richesse en sucre représente le potentiel de production, d'autres critères de qualité permettent de rendre compte de la facilité d'extraction du sucre et de la qualité du produit final, le sucre. Il s'agit essentiellement de la teneur en fibre de la canne et de la quantité de matières étrangères dans la livraison.

- D'un point de vue général, les fibres diminuent l'efficacité des machines et retiennent une partie du sucre contenu dans la tige. Dans l'idéal, la canne livrée à la sucrerie ne devrait donc contenir que les tiges, riches en sucres. Néanmoins, un mauvais brûlage ou une récolte en vert peuvent apporter quelques feuilles qui ne contiennent pas de sucre. Un mauvais écimage de la plante a les mêmes conséquences, car le bout de la tige est très pauvre en sucre. En plus d'augmenter le taux de fibres dans la canne livrée, ces éléments conduisent à une coloration trop importante du sucre produit.
- Une certaine quantité de matières étrangères est inévitablement livrée avec la canne. Il s'agit surtout de terre et de cailloux ramassés avec les tiges au cours de la coupe ou du chargement des camions. Le stockage de la canne au sol, sur les parcelles ou la loading zone, augmente les quantités de terres dans la livraison, surtout s'il pleut entre la coupe et le chargement. Un mauvais réglage de la machine ou un sol trop bosselé conduisent également à des taux de terre élevés en récolte mécanique, car l'opérateur cherche à couper la tige au plus près du sol afin de bénéficier du taux de sucre élevé dans le bas de la tige. La terre et les cailloux (qui une fois broyés donnent du sable) causent surtout des problèmes au niveau du fonctionnement des machines. Ils peuvent causer des dégâts importants et les coûts de la maintenance réalisée à l'intersaison sont généralement très élevés.

Annexe 4 : définition de la Recoverable Value.

Source : *Canegrowers association*



On retiendra la formule suivante :

$$RV \% = S - dN - cF$$

Avec

S = teneur en saccharose de la canne livrée.

N = teneur en autres sucres (non-saccharose) de la canne livrée.

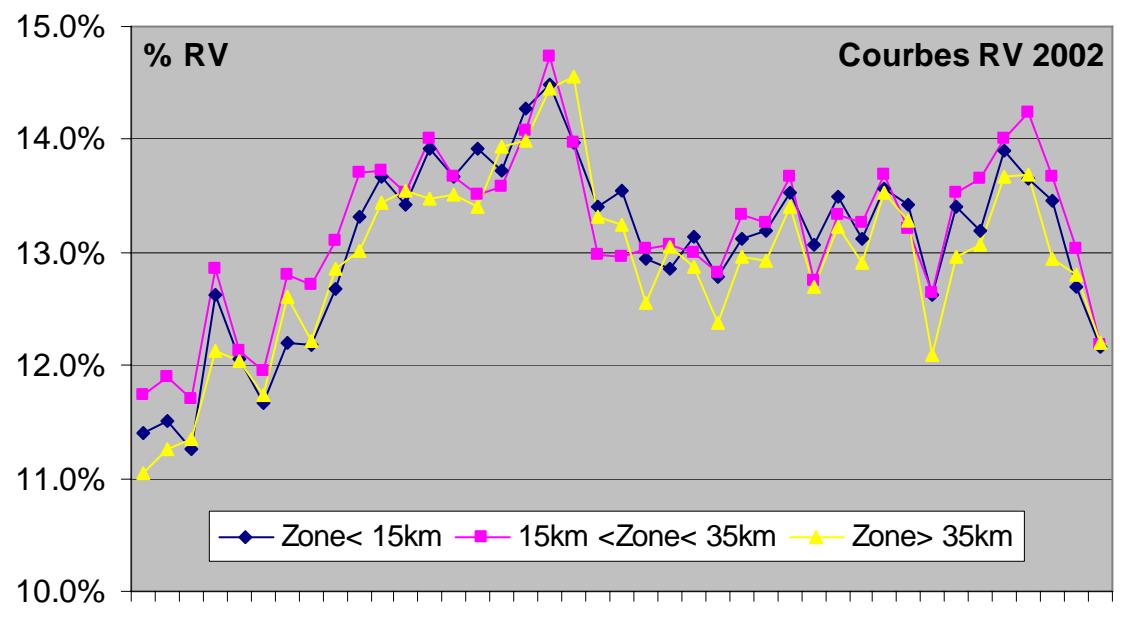
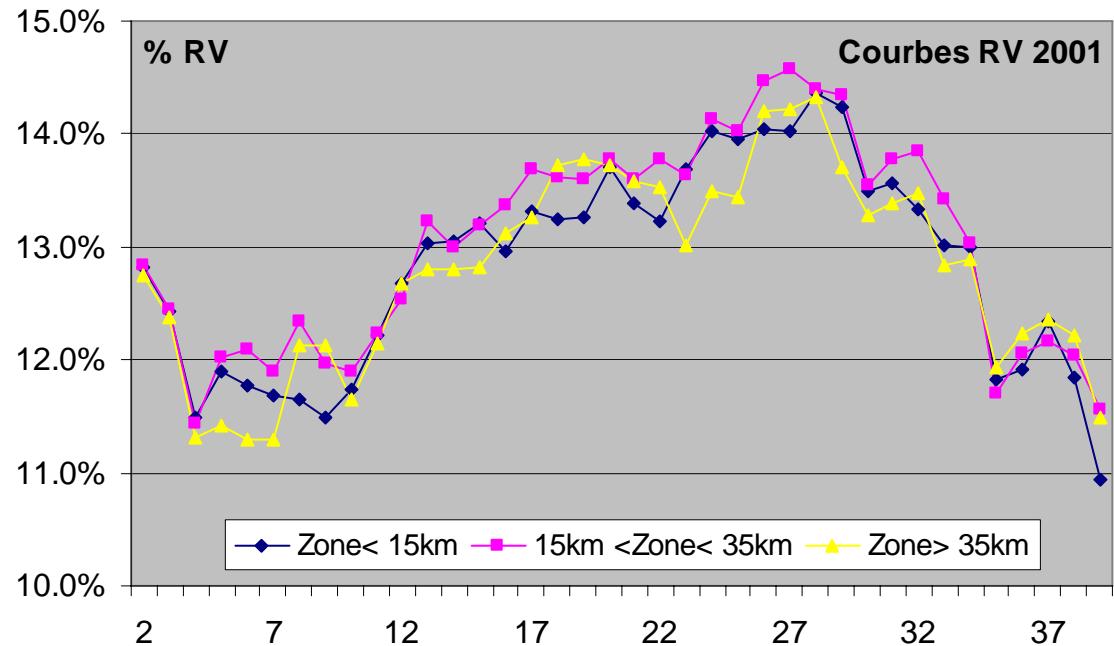
F = teneur en fibre de la canne livrée.

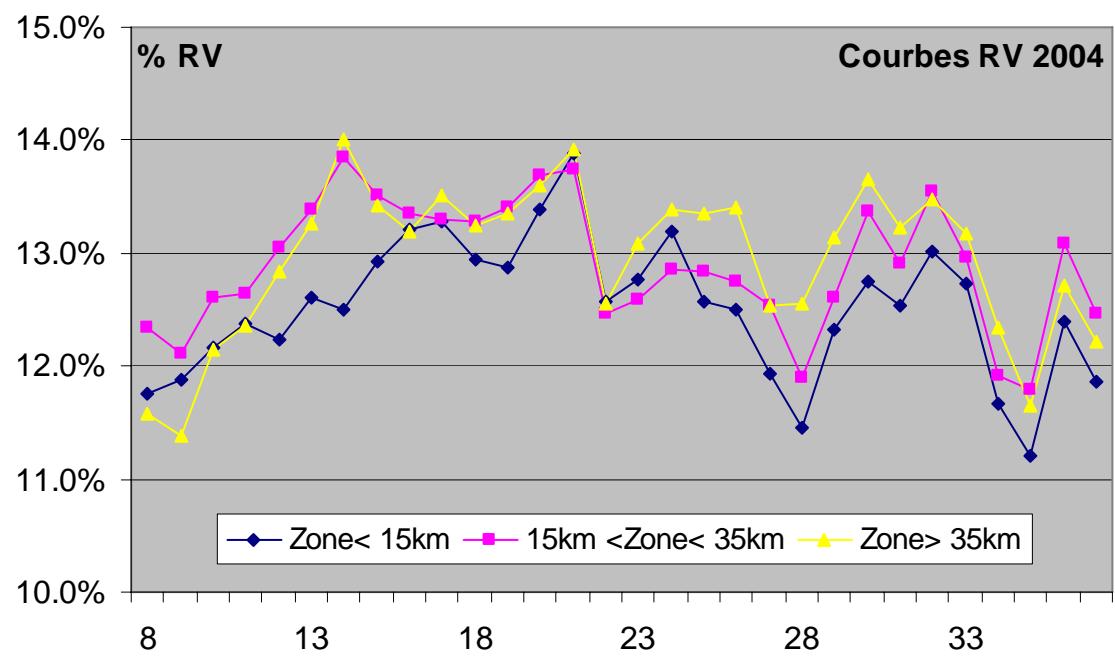
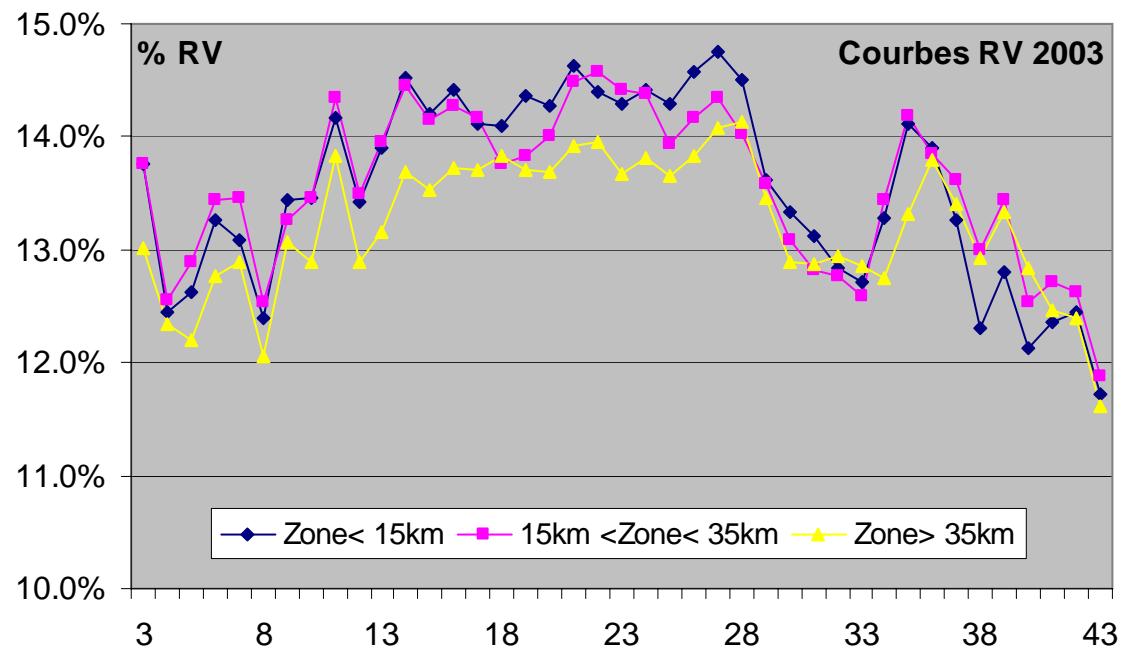
d = facteur qui reflète à la fois les pertes de saccharose éliminé avec les autres sucres et les gains en mélasse récupérée dans ces autres sucres.

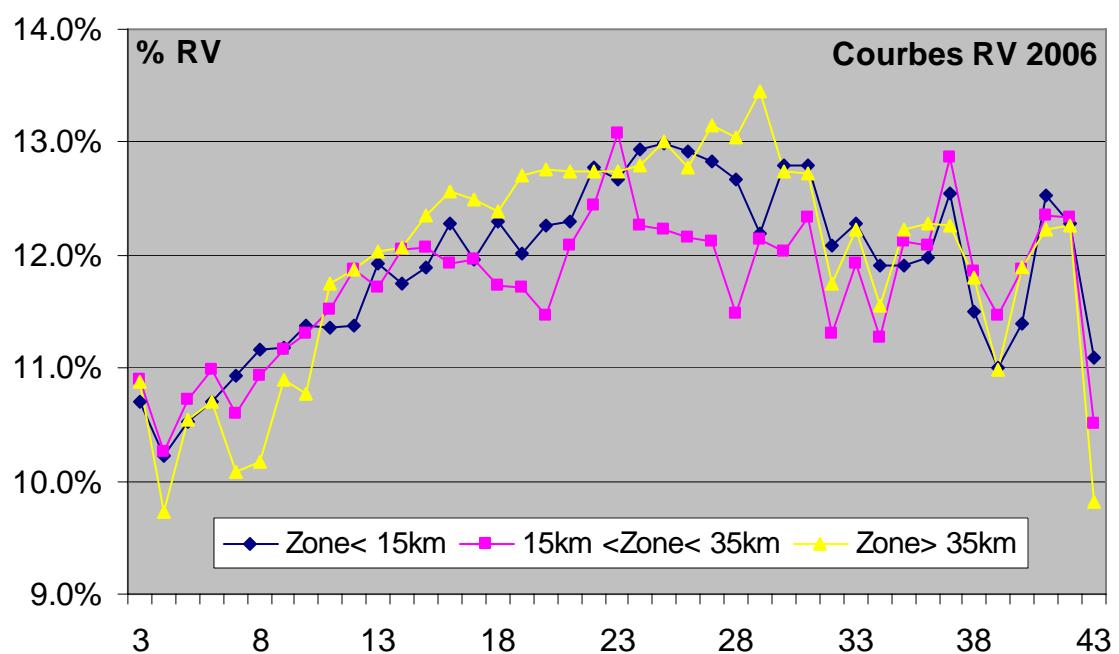
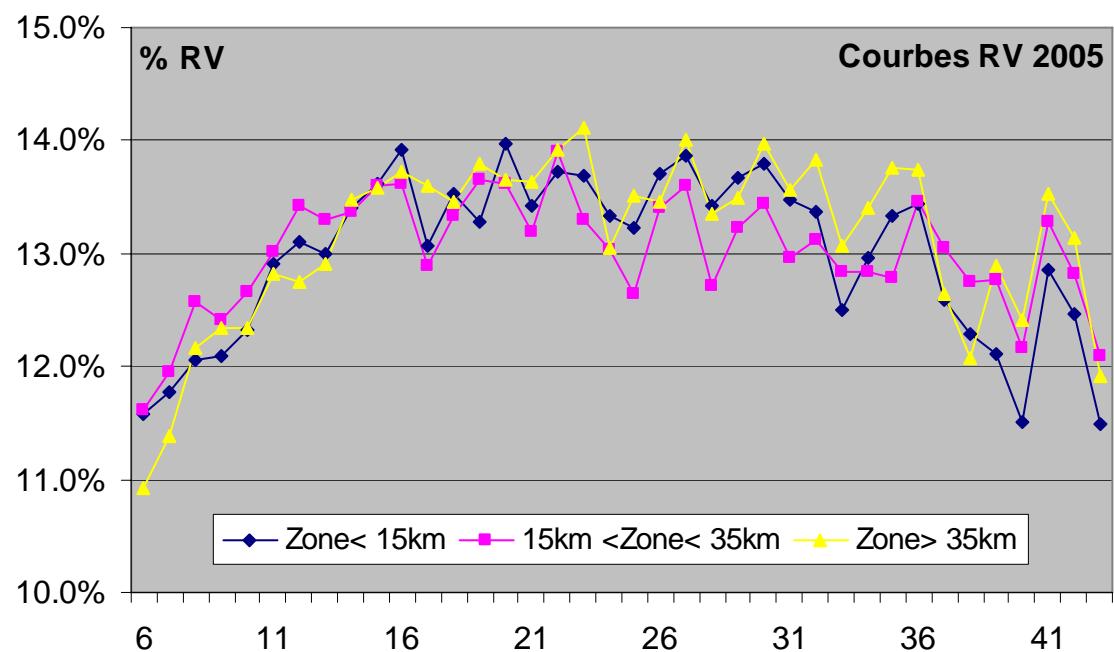
c = facteur qui reflète les pertes de saccharose éliminé avec les fibres.

Les facteurs « d » et « c » ont des valeurs proches de 0,42 et 0,02 respectivement, ce qui montre que les sucres non-saccharose ont une plus grande influence sur la qualité de la canne que le taux de fibre. Le facteur « c » est calculé annuellement sur la base des trois dernières saisons tandis que le facteur « d » est calculé chaque mois à partir des moyennes des trois dernières saisons et du prix du sucre et des mélasses. Par conséquent, les planteurs ne peuvent pas réellement évaluer leurs pratiques agronomiques en comparant les valeurs de $RV\%$ d'un mois à l'autre car celles-ci dépendent du prix de vente des produits.

Annexe 5 : comparaison des courbes RV des trois zones géographiques du modèle

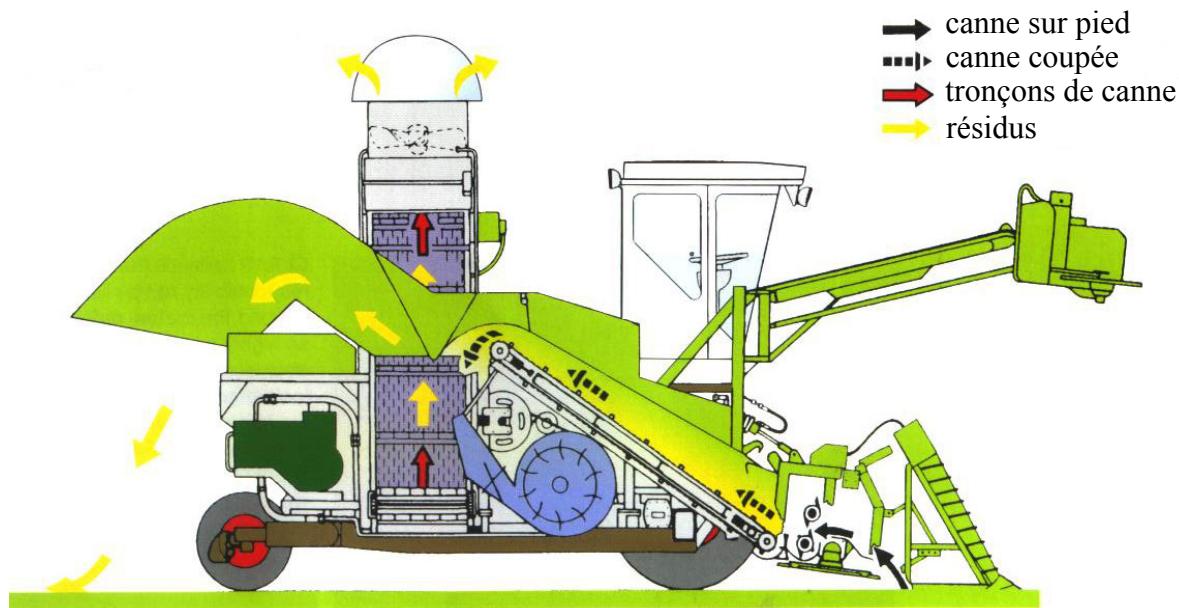






Annexe 6 : principe de fonctionnement de la machine de récolte.

Schéma explicatif, tiré de la brochure constructeur : *Claas Cane Technology – CC 3000*.



La machine de récolte avance dans le champ, dans le sens du rang, accompagnée sur sa gauche d'un tracteur et d'une remorque. Les machines utilisées dans le bassin cannier de Noodsberg sont capables de couper 2 rangs de canne en même temps.

Avant que la canne ne soit tronçonnée, un bras articulé muni de scies circulaires permet d'éliminer le haut des tiges, pauvre en sucre. A l'avant de la machine, trois vis sans fin (une à gauche et deux à droite) permettent de rabattre vers le centre la canne située sur les deux rangs et de chasser sur la droite la canne du rang contigu. Deux grands disques horizontaux ramènent toute la canne vers les couteaux de coupe, qui la sectionnent à la base en tronçons d'une trentaine de centimètres. Ces tronçons sont acheminés sur tapis roulant vers l'intérieur de la machine. Un ventilateur puissant permet d'expulser la plupart des résidus (essentiellement les feuilles) à travers une ouverture située à l'arrière de l'engin. Les tronçons de canne, plus lourds, sont élevés sur un tapis roulant situé à gauche de la machine. Au sommet du tapis roulant la canne tombe dans la remorque tirée par le tracteur. Un deuxième ventilateur permet de propulser au loin les résidus qui n'ont pas été projetés hors de la machine par le premier ventilateur.

La puissance des ventilateurs a un impact important sur le rendement de la récolte et sur la qualité de la canne. Un ventilateur puissant permet d'éliminer plus de résidus, augmentant de ce fait la qualité de la récolte (moins de feuilles, donc moins de fibres). Par contre, il se peut que des tronçons de canne soient expulsés, ce qui augmente les pertes et réduit le rendement de la récolte. La main-d'œuvre étant aujourd'hui bon marché, on voit souvent sur les parcelles quelques ouvriers agricoles ramassant les tronçons de canne « oubliés » par la machine.

Annexe 7 : la mécanisation de la récolte de canne à sucre.

Sources :

- Meyer E. (1999). *Issues to consider when implementing a mechanical harvesting system.* Document SASRI.
- de Beer A.G., Purchase B. (1999). *Field Mechanisation And Factory Performance. Part1: Field Operations. Proceeding of ISSCT – Agricultural Engineering section.*
- Enquêtes réalisées auprès de planteurs dans le bassin de Noodsberg. Avril-juillet 2007.

A l'heure actuelle, à peine 20% des 1200 millions de tonnes de canne à sucre produites chaque année dans le monde sont récoltés mécaniquement. Néanmoins, on s'attend à une augmentation importante de la mécanisation de la récolte dans le monde au cours des prochaines années.

A Noodsberg, les planteurs sont de plus en plus nombreux à récolter une partie de leur canne mécaniquement. Les raisons de cet accroissement de la mécanisation sont multiples, mais se rattachent pour la plupart à des problèmes liés à la main d'œuvre.

La disponibilité de coupeurs manuels dans la région a fortement chuté. Le SIDA, qui touche très fortement l'Afrique du Sud, n'y est pas étranger. Les populations du Transkei qui viennent traditionnellement travailler dans les champs de canne sont touchées de plein fouet par le fléau. Par ailleurs, les jeunes refusent de prendre la relève de leurs aînés. Il est vrai que la coupe de la canne est un travail particulièrement désagréable et difficile, que les jeunes sans qualification délaisse au profit d'un emploi d'ouvrier dans l'industrie du bâtiment, toujours florissante sur la côte. Néanmoins, au cours des premières années d'accroissement de la mécanisation, on pourrait s'attendre à observer un « transfert » de la main d'œuvre des exploitations passant à la récolte mécanique vers les exploitations continuant en récolte manuelle. Il semblerait d'ailleurs que ce soit le cas cette année, puisque plusieurs planteurs interrogés ont évoqué ce phénomène au cours des enquêtes (entretiens avec M.H. et S.T., planteurs. Le 19/04/2007 et le 06/06/2007).

D'autres raisons expliquent donc ce passage à la mécanisation et notamment l'augmentation du coût de la main-d'œuvre avec l'apparition de lois sociales beaucoup plus avantageuses pour les coupeurs. En quatre ans, le coût de la main-d'œuvre a ainsi augmenté de près de 50% (entretien avec M.H., planteur. Le 19/04/2007). L'écart entre les coûts de revient de la récolte manuelle et de la récolte mécanique se réduisent progressivement. Toutefois, l'augmentation du prix du diesel est un contrepoids important qui joue en défaveur de la récolte mécanique. A titre d'exemple, comparons les prix payés aux prestataires de service par une même exploitation la saison dernière : 55,50 Rands par tonne pour la coupe et le transport de la canne manuelle, contre 66,50 Rands par tonne pour la coupe (après brûlage) et le transport de la canne tronçonnée, soit 20% de plus (entretien avec E.G., planteur. Le 18/04/2007).

Plus que le coût de la main-d'œuvre, ce sont les problèmes de gestion du personnel sur l'exploitation qui semblent aujourd'hui être les principaux facteurs de l'abandon des coupeurs manuels. La plupart des planteurs semblent ainsi décidés à franchir le pas de la mécanisation avant même que son coût de revient ne devienne inférieur à celui de la récolte manuelle.

L'argument environnemental (émission de fumées noires lors du brûlage de la canne récoltée manuellement) ne tient pas vraiment dans le contexte actuel car une faible proportion de la canne tronçonnée est récoltée en vert. Si une loi venait à interdire le brûlage de la canne, cela

serait assurément un immense tremplin pour la mécanisation car il ne serait absolument pas rentable de couper la canne en vert manuellement (les rendements des coupeurs manuels chuteraient de moitié).

Le passage à la mécanisation peut s'avérer difficile si l'exploitation et les pratiques agronomiques du planteur ne sont pas adaptées à ce mode de récolte. Plusieurs éléments sont à prendre en compte si l'on cherche à augmenter la capacité de coupe effective d'une machine et/ou la qualité de la canne récoltée.

- Aspects économiques

L'investissement de la machine est important, mais le coût d'un camion de livraison adapté et des remorques élévatrices (ou des containers) est bien plus élevé encore. Il est donc primordial que l'organisation logistique des moyens de récolte soit bien pensée. Il serait intéressant d'associer une étude économique approfondie à des simulations de différentes configurations (comparaison de systèmes de récolte, comparaison du nombre de remorques par machine, ...).

- Taille des exploitations

Les petites exploitations se prêtent moins facilement à la mécanisation. Elles manquent de volume de canne à couper et doivent donc se regrouper pour rentabiliser l'investissement. Au-delà de la taille de l'exploitation, c'est surtout la taille des parcelles qui importe vraiment. Afin d'éviter les manœuvres, il vaut mieux travailler sur de grandes parcelles.

- Topographie

Au-delà de 10 ou 12% de pente, l'utilisation des machines de récolte devient dangereuse. Dans le bassin de Noodsberg, les machines utilisées sont relativement stables. En fait, ce sont les remorques tractées qui accompagnent la machine de récolte qui risquent de se renverser.

- Caractéristiques de la parcelle

La parcelle idéale est rectangulaire, plane, et relativement longue (entre 200 et 600m de long). Il convient de faire des rangs parallèles et plus espacés qu'en récolte manuelle afin de ne pas endommager les souches. Une bonne préparation du sol est primordiale si l'on veut optimiser le travail de coupe de la machine et minimiser la quantité de déchets dans la canne récoltée. Comme la coupe se fait au ras du sol, il faut que la surface soit très homogène et la moins caillouteuse possible.

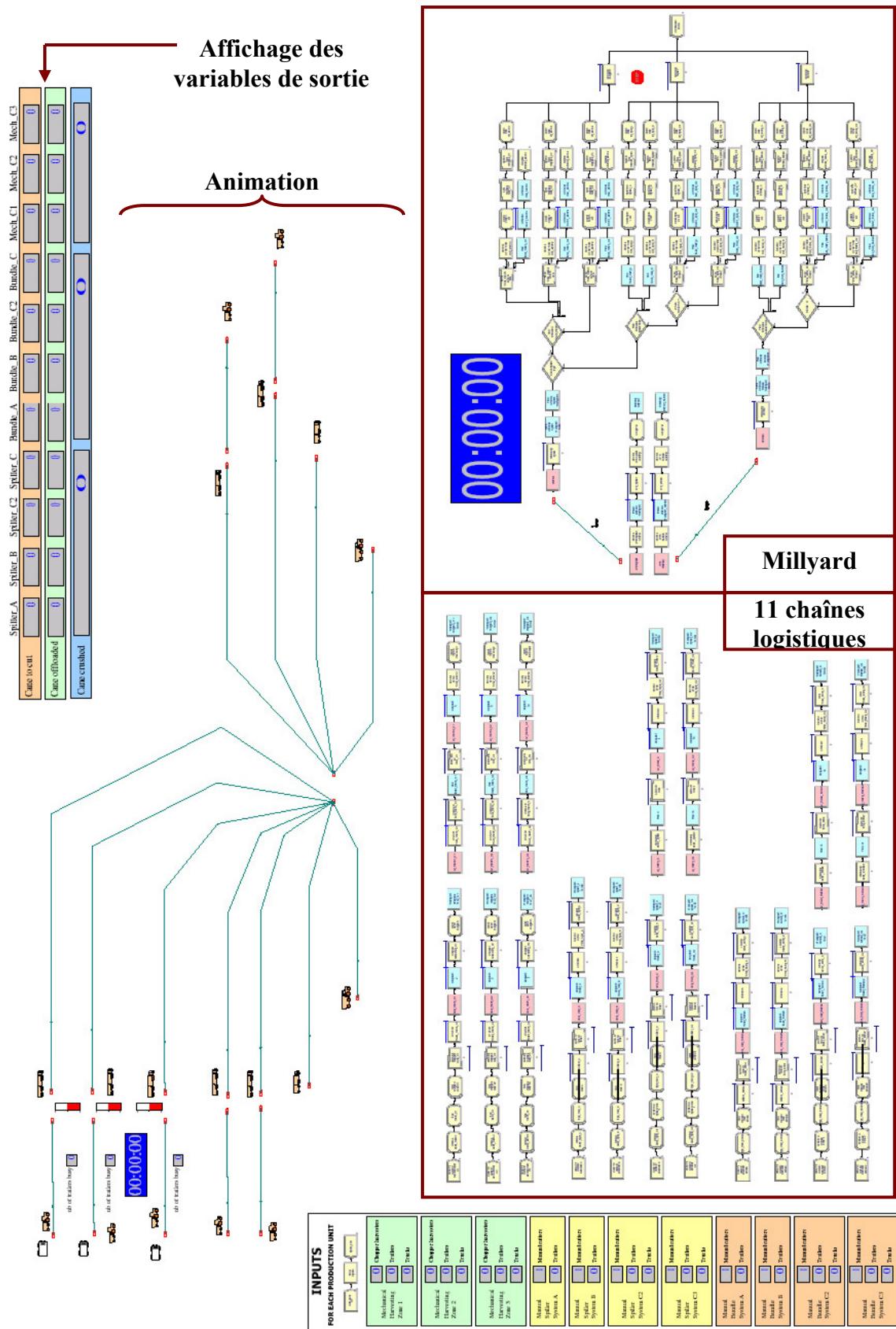
- Pertes au champ et baisse de la qualité

Il y a un compromis à trouver entre volume de canne récolté et qualité de la canne. La vitesse d'avancement de la machine et la puissance du ventilateur jouent de façon négative sur le volume et positivement sur la qualité globale de la canne (moins de fibres et de matières étrangères). Pour ce qui est de la qualité de la canne coupée mécaniquement par rapport à la canne coupée manuellement, il est difficile de tirer des conclusions générales. De nombreux facteurs agronomiques interagissent. Concernant la richesse en sucre, il faut retenir que :

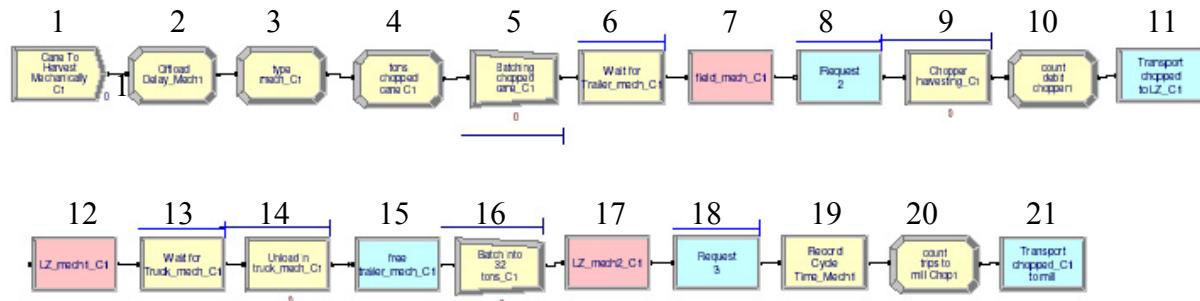
- La détérioration de la canne tronçonnée est plus rapide que la détérioration de la canne entière.
- La détérioration de la canne brûlée est plus rapide que la détérioration de la canne récoltée en vert.
- Le délai coupe-broyage, généralement plus faible pour la coupe mécanique, joue en faveur de la canne tronçonnée.

Annexe 8 : description de quelques parties du modèle logistique.

Schéma de présentation générale du modèle logistique :



Coupe et transport de la canne jusqu'à l'usine – « système mécanique C » :



Partie du programme (initialisation) commune à toutes les UP – blocs 1 à 4 :

Au temps 0, un nombre d’entités égal au volume de canne attribué à l’UP est créé au bloc 1. Le bloc 3 permet de compter le nombre d’unités ainsi créées et d’afficher la valeur à l’écran. Le bloc 2 permet de « marquer » chaque entité pour qu’on puisse identifier sa provenance (l’UP à laquelle elle appartient) à n’importe quel endroit du modèle. Le bloc 2 permet d’attribuer à chaque UP entité de cette UP un délai de déchargement à l’usine. Ce délai peut varier d’une UP à l’autre et doit donc être précisé pour chaque UP.

Partie du programme spécifique aux UP mécaniques de type C – blocs 5 à 21 :

Le bloc 5 permet de regrouper 5 unités de une tonne en une unité de 8 tonnes, qui représente le volume d’une remorque élévatrice.

Le bloc 6 permet de stocker les unités de 8 tonnes créées en attendant que des remorques élévatrices soient libres. La queue qui se forme au niveau de ce bloc représente donc en quelque sorte le stock de canne à couper. Cependant, une partie de la canne sur pied (non encore coupée) peut être « stockée » à d’autres endroits du modèle, comme le bloc 8 et le bloc 9. Cette répartition des files d’attente entre plusieurs blocs ne pose pas de problème ici mais complique à certains endroits du modèle les mesures du nombre d’entités dans la queue et du temps moyen passé à attendre.

Le bloc 7 représente l’endroit physique, en l’occurrence : le champ, où la canne se trouve au moment où elle doit être transportée. On repère ces endroits par les blocs rouges du modèle, appelés « stations ».

Le bloc 8 (REQUEST) permet d’associer à l’entité de 8 tonnes un transporteur vide, dit « disponible ». Si plusieurs transporteurs sont disponibles, la règle d’attribution des transporteurs suit une loi cyclique. Ceci est valable pour tous les blocs REQUEST du modèle. Si tous les transporteurs sont utilisés au moment où arrive une nouvelle entité, celle-ci entre dans la file d’attente et attend la libération de l’un des transporteurs. La file d’attente suit une loi du « first in first out », comme toutes les files d’attente du modèle.

La coupe de la canne par la machine de récolte a lieu au bloc 9. Les machines sont définies comme des ressources. Leur nombre est déterminé par la « capacité » de la ressource, variable d’entrée du système. Chaque machine met une minute à « traiter » une entité élémentaire. Cela correspond à une capacité de coupe instantanée de 60 tonnes par heure. Chaque entité de 8 tonnes est donc coupée en 8 minutes.

Le bloc 10 permet de compter le nombre d’entités coupées, et de mettre à jour les statistiques affichées à l’écran.

Les entités de 8 tonnes parviennent ensuite au bloc 11, qui déclenche le mouvement des transporteurs vers la loading zone. Le délai de chargement est nul car la remorque a été remplie directement par la machine lors de la coupe.

Les blocs 12 (« entrée ») et 17 (« sortie ») sont les stations représentant la loading zone. Une fois parvenues à la loading zone, les remorques doivent attendre qu'un camion vide soit disponible, car la remorque élévatrice déverse la canne directement dans le camion. C'est au bloc 13 que l'on vérifie qu'un camion vide est bien présent sur la loading zone.

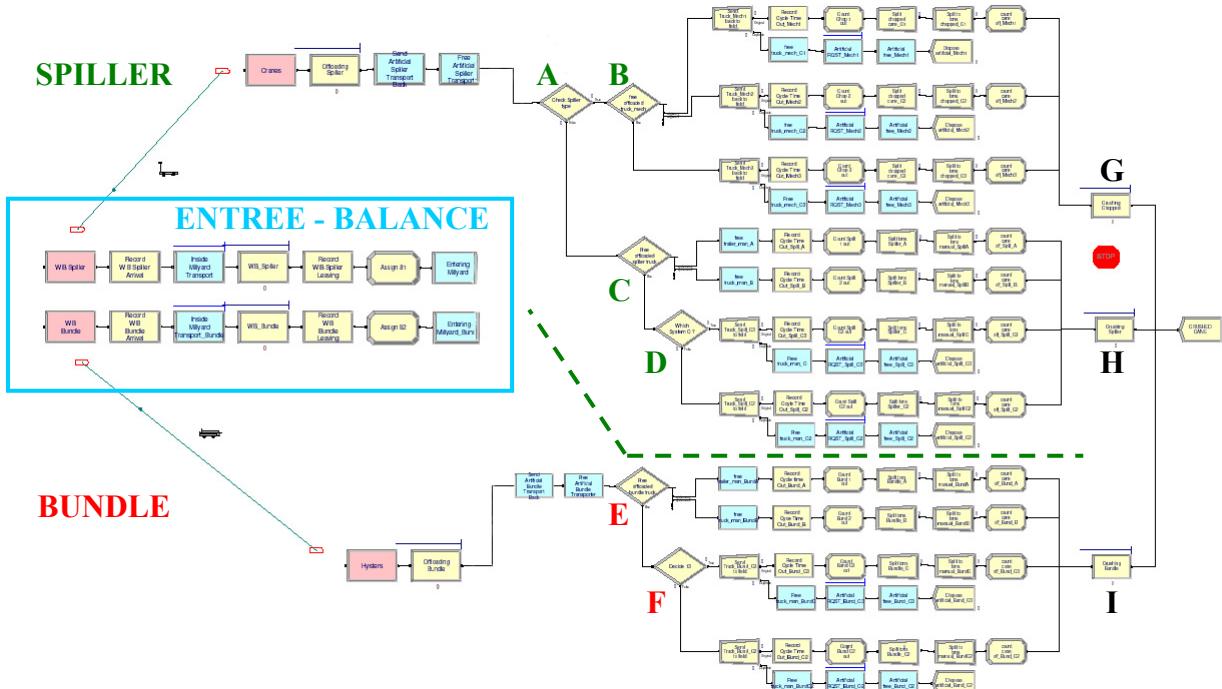
Dès qu'un camion est disponible, le transfert de la canne s'effectue, au bloc 14. Cela prend 7 minutes par entité de 8 tonnes. Une ressource, totalement artificielle car inexistante dans la réalité (la remorque verse son contenu dans le camion grâce à une système hydraulique), est nécessaire pour effectuer l'opération. Cela nous permet de contrôler le nombre de remorques déversant en même temps la canne dans les camions. Il nous faut en effet recourir à des astuces de programmation pour représenter le plus fidèlement possible un fonctionnement logistique qu'un regroupement en unités de production a du mal à restituer. Par exemple, si 4 remorques arrivent en même temps sur la loading zone et qu'un seul camion est disponible, nous ne voulons pas que toutes les remorques déversent en même temps, mais que le transfert s'effectue remorque par remorque, en 4 temps. Cela correspond au fonctionnement réel, et le transfert des 32 tonnes aura été réalisé en 28 minutes. Par contre, si ces 4 remorques arrivent sur une loading zone où 2 camions sont disponibles, il faut donner à deux remorques la possibilité de déverser la canne en même temps. Les 4 remorques seront alors vidées en deux fois, soit 14 minutes au total. Il est en effet fort probable que dans la réalité les deux camions se situent sur 2 loading zones différentes, et soient servis par des machines et des remorques différentes. Au final, le nombre de ressources disponibles au bloc 14 est égal à tout moment au nombre de camions disponibles sur la « méga loading zone » du modèle.

Une fois le transfert de la canne effectué, les remorques sont « libérées » : l'entité de 8 tonnes qui leur était attribuée poursuit son chemin dans le modèle et le transporteur rejoint la station au champ, se rendant disponible pour une autre entité de 8 tonnes passant à la coupe (bloc 15).

Les entités de 8 tonnes libérées sont ensuite groupées par 4 au bloc BATCH numéroté 16, afin de constituer de nouvelles entités de 32 tonnes qui pourront être chargées sur les camions assurant la livraison jusqu'à l'usine. On remarque ici que l'entité de 32 tonnes est constituée seulement maintenant, et n'est pas encore chargée dans le camion contrairement à ce qui se passe dans le système que nous essayons de modéliser. En s'assurant que remorques et camions étaient tous deux présents sur la loading zone au moment du déchargement, nous avons mimé la réalité sans parvenir à représenter exactement le transfert direct qui a réellement lieu. Une conséquence importante de cela est que les 4 entités de 8 tonnes vont constituer la charge d'un camion quand en réalité, les 4 remorques pourraient avoir déversé leur canne dans des camions différents (cf. paragraphes précédents) situés sur des loading zones différentes. Au final, le chargement des camions dans le modèle est en moyenne plus rapide que dans la réalité. Par contre, le nombre de camions quittant la loading zone d'une UP à un moment donné est plus réduit que dans la réalité, ce qui rétablit un certain équilibre au niveau des moyennes : plutôt que d'avoir 2 camions quittant la loading zone au bout de 28 minutes, nous avons un camion quittant la loading toutes les 14 minutes.

Sur le même principe que précédemment, les blocs 17 à 21 permettent d'attribuer un véhicule de livraison à chaque entité de 32 tonnes et d'envoyer les transporteurs à la sucrerie. Le bloc 19 est utilisé pour noter le temps de simulation T1 auquel chaque véhicule quitte la loading zone pour l'usine. Il sera comparé au temps T2 auquel ce même véhicule revient à la loading zone pour calculer les temps de rotation.

Millyard : pesée, réception des cannes et renvoi des véhicules vers leur UP.



Les véhicules de livraison arrivent tous à une station « Weighbridge » représentant l'entrée physique de l'usine. Il y a deux queues à l'entrée de la sucrerie : une pour les camions de livraison « spiller » et une pour les camions de livraison « bundle ». Néanmoins, tous les véhicules passent sur la même balance à l'entrée de l'usine, représentée dans le modèle par une ressource unique, partagée entre tous les véhicules. La pesée dure deux minutes.

La suite du modèle s'appuie sur des astuces de programmation pour modéliser le plus fidèlement possible les règles de déchargement suivies dans la réalité. Celles-ci sont relativement simples et se basent sur le fait que le milliard peut accueillir au maximum 7 véhicules spiller et 10 véhicules bundle en même temps. Tant que ces chiffres ne sont pas atteints, les opérateurs laissent entrer alternativement un camion bundle et un camion spiller. A partir du moment où ces quotas sont atteints, les opérateurs attendent de voir la nature du prochain camion sortant du milliard pour appeler à la balance un véhicule du même type. Pour modéliser cela sous ARENA, nous avons eu recours à des transporteurs « fantômes » relayant les véhicules de livraison à l'intérieur du milliard. Totalement artificiels, ces 17 transporteurs « fantômes » (7 spiller et 10 bundle) permettent de limiter le nombre de véhicules autorisés à circuler à l'intérieur du milliard. Dès qu'un véhicule spiller passe la balance, son chargement « saute » dans un des 7 transporteurs « fantômes » de l'usine, qui effectue toute la partie du trajet à l'intérieur de l'usine. Dès que le transporteur « fantôme » est de retour à la balance – vide, puisque la canne a été déchargée sur la table à canne – il est libéré et peut donc prendre en charge le chargement du premier véhicule spiller dans la file d'attente. Simultanément à la libération du transporteur « fantôme », le « vrai » véhicule de livraison est également libéré et renvoyé vers la loading zone de l'unité de production qu'il dessert. Au final, tout se passe comme si un seul véhicule faisait l'intégralité du trajet de livraison de la canne. Pour la canne bundle, le principe est le même, avec les 10 véhicules « fantômes » spécialement dédiés au transport de la canne bundle dans le milliard.

Pour effectuer le déchargement de la canne, nous utilisons des ressources : une seule grue fixe pour décharger la canne spiller (ce qui conduit à une file d'attente des véhicules spiller « fantômes » dans le millyard) et 5 hysters pour la canne bundle. Le délai du déchargement dépend du volume de canne livré par chaque véhicule et, pour la canne spiller, de la capacité de broyage de la sucrerie. En effet, tout véhicule doit attendre que la table à canne soit libre avant de décharger. Or le temps mis par l'installation pour libérer la table de la canne livrée par le camion précédent dépend du volume de cette livraison précédente et de la vitesse à laquelle l'usine est capable de broyer la canne.

Nous avons fait l'hypothèse que les moyens accordés à chaque UP n'étaient pas transférables d'une UP à une autre. Une grande partie de la programmation du millyard est donc destinée à renvoyer chaque véhicule de livraison vers le champ ou la loading zone de l'UP à laquelle il est affecté. Comme tous les véhicules partagent les mêmes ressources et les mêmes files d'attente dans le millyard, un dispositif a été mis en place après le déchargement des cannes pour séparer à nouveau tous les véhicules selon leur provenance. Des tests (A, B, C, D, E et F sur la figure ci-dessus) sont donc effectués sur les attributs des entités définis au moment de l'initialisation du modèle.

Pour la canne spiller, on détermine tout d'abord si la canne a été coupée mécaniquement ou manuellement (test A). Si le véhicule qui vient de décharger transportait de la canne tronçonnée, on détermine alors de quelle zone il provient (test B) et l'on sait alors vers quelle UP le renvoyer. Si le véhicule transportait de la canne longue, coupée manuellement, on détermine également de quelle zone il provient pour identifier l'UP à laquelle il est attribué (test C). Pour la zone géographique numéro deux, un dernier test est nécessaire pour savoir si le véhicule est utilisé dans un système logistique de type B ou de type C (test D).

Pour la canne bundle, il suffit de savoir de quelle zone géographique provient le camion qui vient de décharger (test E) et éventuellement de savoir si un camion de la zone 2 est utilisé dans un système logistique de type B ou de type C (test F).

La fin du modèle concerne le broyage de la canne. Même si l'on a représenté un bloc « broyage » pour chaque UP (G, H et I), ces blocs partagent la même ressource. Une priorité a été accordée au broyage de la canne spiller par rapport au broyage de la canne Bundle. Cela permet de représenter le stockage de la canne bundle pendant le jour, à travers l'élaboration d'une file d'attente au niveau du bloc « broyage » bundle. Enfin, de nombreux blocs permettent de mesurer des variables, d'en afficher les valeurs à l'écran ou de les enregistrer dans un fichier annexe. Cela concerne notamment l'acquisition du temps de simulation T2 qui, associé à T1, permet de calculer les temps de rotation des véhicules.

Annexe 9 : Inputs du modèle logistique et calcul des TRM.

PU	Loading truck	Transport to mill		WB	Mill in	Offload	Mill out	Driving back		Total TRM
		Distance-km	Speed-km/h					Distance-km	Speed-km/h	
Mech1	14.0	8.0	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	8.0	50.0	63
		22.0	45.0		2.0	10.0	6.4	10.0	9.6	
Mech2	14.0	29.3	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	22.0	50.0	98
		48.0	45.0		2.0	10.0	6.4	10.0	26.4	
Mech3	14.0	64.0	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	48.0	50.0	164
		8.0	30.0		2.0	10.0	2.4	10.0	57.6	
Spiller_A	12.0	16.0	45.0	2.0	10.0	4.4	10.0	8.0	35.0	66
		22.0	33.0		2.0	10.0	6.0	10.0	13.7	
Spiller_B	25.0	40.0	45.0	2.0	10.0	6.0	10.0	22.0	29.3	114
		29.3	30.0		2.0	10.0	6.0	10.0	45.0	
Spiller_C2	30.0	29.3	45.0	2.0	10.0	6.0	10.0	22.0	26.4	114
		64.0	45.0		2.0	10.0	6.0	10.0	50.0	
Spiller_C3	30.0	16.0	45.0	2.0	10.0	4.0	9.0	48.0	57.6	180
		22.0	30.0		2.0	9.0	4.0	9.0	35.0	
Bundle_A	12.0	16.0	45.0	2.0	9.0	4.0	9.0	8.0	13.7	66
		22.0	33.0		2.0	9.0	4.0	9.0	45.0	
Bundle_B	25.0	33.0	45.0	2.0	9.0	4.0	9.0	22.0	29.3	111
		29.3	30.0		2.0	9.0	4.0	9.0	50.0	
Bundle_C2	30.0	29.3	45.0	2.0	9.0	4.0	9.0	22.0	26.4	110
		64.0	45.0		2.0	9.0	4.0	9.0	50.0	
Bundle_C3	30.0	16.0	45.0	2.0	9.0	4.0	9.0	48.0	57.6	176
		22.0	30.0		2.0	9.0	4.0	9.0	35.0	
DIFFERENT VALUES FOR BIN SYSTEM (LOADING AND OFFLOADING BINS IN FIELD)										
Mech1 Bins	24.0	8.0	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	8.0	50.0	73
		24.0	10.7		2.0	10.0	6.4	10.0	9.6	
Mech2 Bins	24.0	22.0	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	22.0	50.0	108
		24.0	29.3		2.0	10.0	6.4	10.0	26.4	
Mech3 Bins	24.0	48.0	45.0	2.0	10.0	6.4	10.0	48.0	50.0	174
		24.0	64.0		2.0	10.0	6.4	10.0	57.6	
DIFFERENT VALUES IF REDUCED LOMS (INSIDE THE MILL DELAYS)										
Mech1 Bins	24.0	8.0	45.0	2.0	10.0	5.65	10.0	8.0	50.0	72
		24.0	10.7		2.0	10.0	5.65	10.0	9.6	
Mech2 Bins	24.0	22.0	45.0	2.0	10.0	5.65	10.0	22.0	50.0	107
		24.0	29.3		2.0	10.0	5.65	10.0	26.4	
Mech3 Bins	24.0	48.0	45.0	2.0	10.0	5.65	10.0	48.0	50.0	173
		24.0	64.0		2.0	10.0	5.65	10.0	57.6	
Spiller_A	12.0	8.0	30.0	2.0	10.0	2.12	10.0	8.0	35.0	66
		22.0	16.0		2.0	10.0	2.12	10.0	13.7	
Spiller_B	25.0	22.0	40.0	2.0	10.0	3.88	10.0	22.0	45.0	113
		25.0	33.0		2.0	10.0	3.88	10.0	29.3	
Spiller_C2	30.0	22.0	45.0	2.0	10.0	5.29	10.0	22.0	50.0	113
		30.0	29.3		2.0	10.0	5.29	10.0	26.4	
Spiller_C3	30.0	48.0	45.0	2.0	10.0	5.29	10.0	48.0	50.0	179
		30.0	64.0		2.0	10.0	5.29	10.0	57.6	
Spiller_A	12.0	8.0	30.0	2.0	9.0	4.00	9.0	8.0	35.0	66
		22.0	16.0		2.0	9.0	4.00	9.0	13.7	
Spiller_B	25.0	22.0	40.0	2.0	9.0	4.00	9.0	22.0	45.0	111
		25.0	33.0		2.0	9.0	4.00	9.0	29.3	
Spiller_C2	30.0	22.0	45.0	2.0	9.0	4.00	9.0	22.0	50.0	113
		30.0	29.3		2.0	9.0	4.00	9.0	26.4	
Spiller_C3	30.0	48.0	45.0	2.0	9.0	4.00	9.0	48.0	50.0	179
		30.0	64.0		2.0	9.0	4.00	9.0	57.6	
Bundle_A	12.0	8.0	30.0	2.0	9.0	4.00	9.0	8.0	35.0	66
		22.0	16.0		2.0	9.0	4.00	9.0	13.7	
Bundle_B	25.0	22.0	40.0	2.0	9.0	4.00	9.0	22.0	45.0	111
		25.0	33.0		2.0	9.0	4.00	9.0	29.3	
Bundle_C2	30.0	22.0	45.0	2.0	9.0	4.00	9.0	22.0	50.0	110
		30.0	29.3		2.0	9.0	4.00	9.0	26.4	
Bundle_C3	30.0	48.0	45.0	2.0	9.0	4.00	9.0	48.0	50.0	176
		30.0	64.0		2.0	9.0	4.00	9.0	57.6	

Annexe 10 : inputs du modèle logistique – caractéristiques de la machine de récolte.

Inputs	heures de W	Cap. Coupe	rendement maximum	
Cutters	8	1,6 hour / ton	5	tons/day
Choppers	8	1 min / ton	480	tons/day

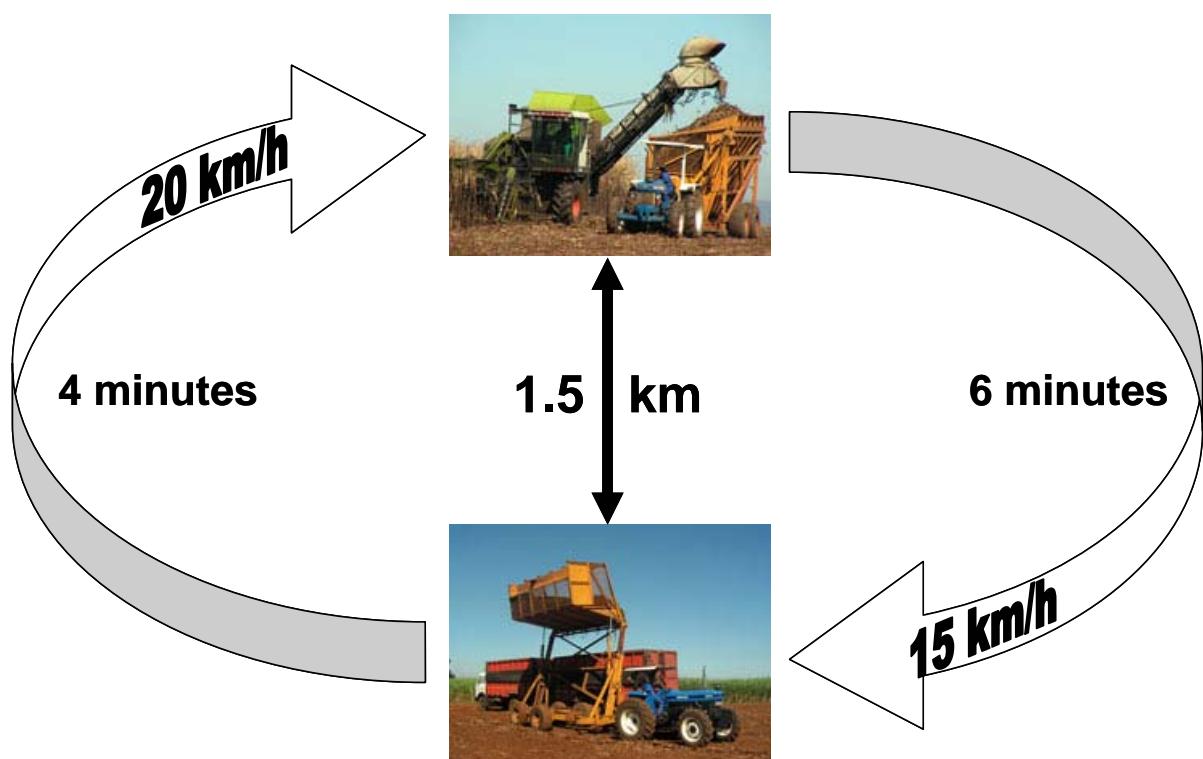
(si 100% efficacité)

Récolte mécanique en système de livraison semi-direct : calcul des délais

remplissage remorque	transport vers loading	Transfert	retour des remorques vides vers la coupeuse	Total	
8 min 1,5 km 15 km/h	6 min	7 min	4 min 1,5 km 20 km/h	25 min	~ 3 x 8 min.

Nous avons choisi d'attribuer 3 remorques à chaque machine de récolte pour tous les scénarios car c'est une combinaison (utilisée dans la réalité) qui permet d'augmenter l'utilisation de la machine.

LOADING: 60 tons/h → 8 tons in 8 minutes



**Annexe 11 : Comparaison par simulation de deux configurations de récolte différentes.
2 remorques par coupeuse vs. 3 remorques par coupeuse.**

Le scénario simulé s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- Le volume à livrer à la sucrerie en 24 heures à l'échelle du bassin est de 6616 tonnes.
- La répartition de ce volume entre les UP est réalisé conformément à ce qui a été fait dans les autres simulations.
- 30 % du volume est livré entre minuit et 7 heures du matin par les UP manuelles.
- Le taux de mécanisation est de 16%.
- Toutes les UP mécaniques utilisent le système de livraison semi-direct (système C).
- Les coupeurs et les machines de récolte travaillent 8 heures par jour.
- Les camions peuvent être chargés à partir de 7 heures et jusqu'à 17 heures.
- La capacité de coupe instantanée des machines est de 60 t/h.

UP	nombre de coupeuses	nombre de camions	Volume livré
M1	1	7	100 %
M2	1	9	100 %
M3	1	4	100 %
SA		23	100 %
SB		12	100 %
SC2		6	100 %
SC3		9	100 %
BA		10	100 %
BB		4	100 %
BC2		3	100 %
BC3		4	100 %

Nous avons appliqué la méthode heuristique pour trouver une configuration (tableau ci-dessous) permettant d'acheminer toute la canne à la sucrerie. Cette configuration a été obtenue en attribuant 3 remorques à chaque machine de récolte.

Si nous gardons cette configuration mais que nous n'attribuons que 2 remorques à chaque machine de récolte, les UP mécaniques ne sont plus capables de livrer toute la canne car le système devient moins efficace : les camions sont remplis plus lentement et les machines sont moins bien rentabilisées.

Le tableau ci-dessous montre que l'efficacité des coupeuses diminue fortement si on ne leur donne que 2 remorques élévatrices chacune. La capacité de coupe effective tombe à des niveaux proches de ceux observés sur le terrain.

3 remorques / machine	Coupeuse de M1	Coupeuse de M2	Coupeuse de M3
Volume coupé	416	448	224
Temps nécessaire (h)	7,8	7,9	7,0
Capacité moyenne (t/h)	53	57	32
Utilisation (% de 60t/h)	89	94	54

2 remorques / machine	Coupeuse de M1	Coupeuse de M2	Coupeuse de M3
Volume coupé	288	288	192
Temps nécessaire (h)	7,9	7,9	7,4
Capacité moyenne (t/h)	36	36	26
Utilisation (% de 60t/h)	61	61	43

Les coupeuses des UP les plus éloignées sont moins efficaces car leurs remorques doivent parfois attendre que les camions soient de retour pour pouvoir décharger leur canne.

Annexe 12 : Photos des systèmes de coupe, du transport de la canne et de l'usine.

Toutes les photos ont été prises dans le bassin de Noodsberg, entre mars 2007 et juillet 2007.



Coupe mécanique avec machine CLAAS et remorque élévatrice.

Système mécanique C : déversement de la canne tronçonnée dans les camions.





Système mécanique A : déversement de la canne tronçonnée en vrac sur la loading zone.

Système mécanique B : stockage de la canne dans des containers sur la loading zone.





Système manuel A : chargement d'une remorque dans la parcelle grâce au BELL.

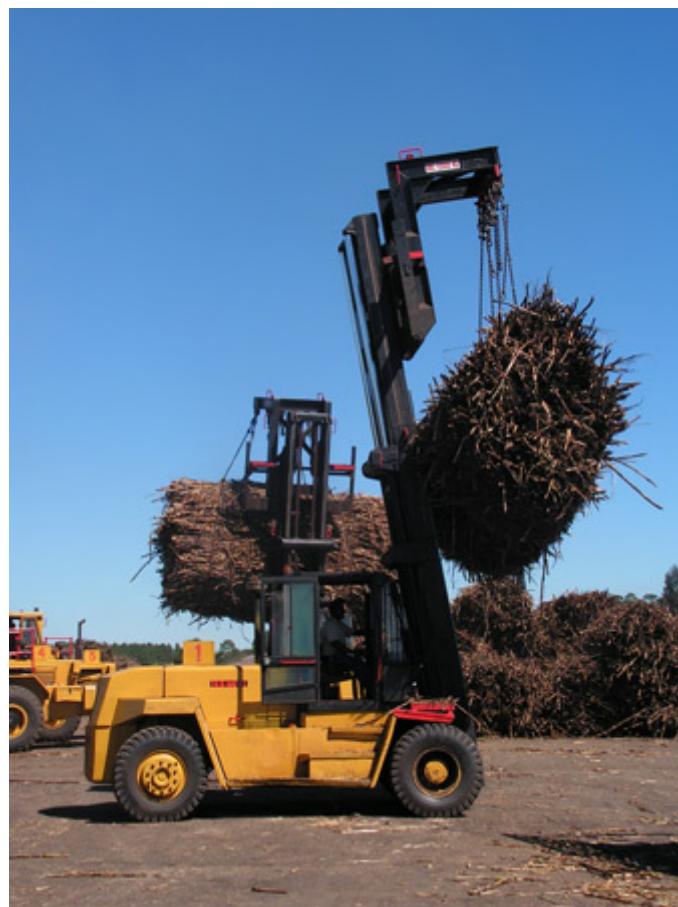
Balance : pesée des véhicules de livraison à l'entrée de l'usine.





Le Millyard de l'usine de Noodsberg. A gauche : véhicules SPILLER. A droite : déchargement des véhicules BUNDLE.

Hyster déchargeant les véhicules BUNDLE.





Déchargement d'un camion Spiller sur la table à canne à l'aide de la grue fixe.

Camion rempli de canne tronçonnée attendant la libération de la table à canne Spiller pour décharger sa livraison.



RESUME

L'industrie sucrière sud-africaine est à la recherche de gains d'efficacité pour demeurer compétitive sur le marché international. L'étude des interactions entre acteurs à l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une sucrerie peut apporter des solutions intéressantes, notamment à travers l'exploration de scénarios alternatifs d'approvisionnement grâce aux outils de modélisation. Les travaux menés jusqu'à présent font appel à des modèles « logistiques » pour étudier l'organisation logistique des flux de canne au quotidien ou à des modèles « d'approvisionnement » pour traiter de l'organisation des approvisionnements au pas de temps de la campagne. Nous voulons ici explorer les possibilités et l'intérêt de coupler ces deux types de modèles pour répondre à un problème concret, en l'occurrence l'extension de la mécanisation de la récolte sur le bassin d'approvisionnement de Noodsberg.

Dans un contexte de fort taux de mécanisation, nous avons simulé différents scénarios de réduction de la durée de campagne à l'aide du modèle d'approvisionnement MAGI®. A l'échelle de la saison, ces scénarios permettent d'augmenter la production de sucre en recentrant les apports sur les mois où la richesse en sucre de la canne est la plus élevée. Du point de vue logistique, cela impose de disposer de capacités de coupe et de transport de la canne plus importantes, afin d'acheminer un même volume de canne sur une plus courte période. La construction d'un modèle logistique grâce au logiciel ARENA™ a permis de trouver des organisations logistiques capables d'atteindre ces capacités. Il apparaît que le système actuel est surdimensionné puisque l'ensemble du matériel disponible aujourd'hui serait amplement suffisant dans des situations de récolte et de transport beaucoup plus intensives.

L'articulation entre les deux modèles passe essentiellement par une représentation commune du bassin d'approvisionnement, qui a été découpé en onze unités de production (UP) définies par des critères logistiques : la distance moyenne entre l'exploitation et la sucrerie, et l'organisation logistique des opérations de coupe et de transport mise en place. La capacité de broyage de l'usine est également un lien fort car elle permet de relier des concepts et des calculs propres aux deux modèles et définis sur des pas de temps différents. D'une façon générale, le recours à des astuces de modélisation, permettant d'adapter les concepts parfois abstraits du modèle d'approvisionnement au modèle logistique plus concret, rend le couplage difficile. Néanmoins, une fois surmontées ces difficultés, la complémentarité des deux types de modèles s'avère intéressante, notamment pour traiter des problèmes de surcapacité dus aux aléas.

ABSTRACT

The South African sugar industry has to improve its efficiency in order to remain competitive internationally. There is a potential to enhance profitability by examining the interactions between stakeholders within the mill supply area and exploring alternative supply scenarios with modelling tools. Until now, such studies would either use “logistic” models to assess different logistic organisations on a day-to-day basis or “supply planning” models to compare alternative supply scenarios at the milling season scale. This study investigates the possibility and the interest of coupling those two kinds of models in a way to analyse a concrete question: the increase of harvest mechanization in Noodsberg milling area.

In a context of a high mechanization rate, different scenarios with a reduced length of milling season (LOMS) were simulated using a supply planning model known as MAGI®. At the milling season scale, those scenarios lead to an increase of the sugar production by concentrating the deliveries during the months of the year when the sugar content of the cane reaches its maximum. From a logistics point of view, the reduction of the LOMS implies higher capacities for both cutting and transport of the cane because a similar amount of cane must be delivered over a shorter period. A logistic model was built using the ARENA™ simulation tool. It was used to determine realistic logistic organisations able to reach the required capacities. It appears that the current system is over fleeted because the number of choppers and trucks available today would be enough in a much more intensive situation.

The articulation between both models is made essentially by using the same representation of the mill supply area, which has been divided into 11 production units (PU) defined with logistic criteria: the average distance between the farms and the mill, and the logistic organisation of cutting and transport operations that are used by the growers. The mill crushing capacity is in the centre of the coupling process as well because it links a lot of concepts specific to the two models and defined on different time steps. From a general point of view, the coupling was not so intuitive, since modelling “tricks” were required to adapt some of the abstract concepts of the supply planning model to the concrete reality of the logistic model. Nevertheless, the complementarity between both models appears to be quite interesting, especially when assessing problems of overcapacity associated with risk management.