



HAL
open science

Reverse blending : une réponse efficace au défi de la personnalisation de masse dans la production de granulés

Latifa Benhamou, Vincent Giard, Pierre Fenies, Frédéric Fontane, Mehdi Khouloud

► **To cite this version:**

Latifa Benhamou, Vincent Giard, Pierre Fenies, Frédéric Fontane, Mehdi Khouloud. Reverse blending : une réponse efficace au défi de la personnalisation de masse dans la production de granulés. 13ème Conférence internationale de CIGI QUALITA 2019, Jun 2019, Montréal, Canada. hal-02277532

HAL Id: hal-02277532

<https://hal.science/hal-02277532>

Submitted on 3 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

REVERSE BLENDING : UNE REPOSE EFFICACE AU DEFI DE LA PERSONNALISATION DE MASSE DANS LA PRODUCTION DE GRANULES

LATIFA BENHAMOU^{1,2}, VINCENT GIARD^{1,3}, PIERRE FENIES^{1,2}, FRÉDÉRIC FONTANE^{1,4}, MEHDI KHOULOUD⁵

¹ EMINES School of Industrial Management, University Mohammed VI Polytechnique, 43150 Ben Guerir, Morocco

² Paris II Panthéon Assas University, 75006 Paris, France

³ Paris-Dauphine University, PSL Research University, CNRS, LAMSADE, 75016 Paris, France

⁴ Mines-Paris Tech, PSL Research University, 75005 Paris, France

⁵ Fertilizers unit UM6P-lab OCP-group, 24025 Jorf Lasfar, Morocco

{Latifa.Benhamou, Vincent.Giard, Pierre.Fenies, Frederic.Fontane}@emines.um6p.ma; Mehdi.khouloud@um6p.ma

Résumé - Dans la production manufacturière, la personnalisation de masse s'effectue par une combinaison de composants alternatifs montés sur une ligne d'assemblage. Dans l'industrie de process, elle est plus difficile car elle implique la fabrication successive de lots de produits différents, ce qui limite la diversité offerte en raison de l'inertie temporelle que cette production séquentielle implique. Dans ce contexte, la diversité croissante des flux à produire et transporter empêche toute économie d'échelle. Dans le cadre d'une agriculture durable, les producteurs d'engrais doivent accroître considérablement la variété des engrais produits, tout écart par rapport à la formule recommandée pour un couple « sol - culture », se traduisant par une perte de productivité et/ou un appauvrissement des sols. La solution disruptive du *Reverse Blending* (RB) que nous apportons à ce problème, repose sur une différenciation retardée réalisée à proximité des lieux de distribution et non sur les lieux de production. C'est une extension du problème de *blending* dans laquelle les inputs ne sont pas préexistants et doivent être définis, en nombre et en composition, simultanément à leur utilisation pour produire les engrais désirés. Sa formulation repose sur un programme quadratique paramétrique. Une illustration numérique de ce modèle est proposée sur un jeu de données réel.

Abstract - Mass customization, a major trend in modern economy, relies, in discrete production, on the alternative components assembly while it consists, in the continuous one, in the production of a sequence of batches of different products, which limits feasible diversity, increases transportation issues and therefore prevents economies of scale. In the context of sustainable agriculture, fertilizer producers must significantly increase the variety of their produced fertilizers; any deviation from the recommended formula, for a certain crop on a given soil, results in a loss of productivity and/or soil depletion. The disruptive solution of the *Reverse Blending* (RB) that we are proposing for this problem, is based on a delayed differentiation performed nearby end-users. It is an extension of the blending problem where inputs does not pre-exist and are to be defined, in number and composition, simultaneously with their use in blending to satisfy exactly outputs requirement. Of course, the number of the inputs to be produced must be as small as possible. RB formulation lays on a parametric quadratic problem. A real case study of this approach is provided.

Mots clés – Personnalisation de masse, production continue, blending, conception d'input, engrais.

Keywords – Mass customization, continuous production, blending, input conception, fertilizer.

1 INTRODUCTION

Pour une population mondiale qui est en constante augmentation, nourrir l'humanité est un véritable défi qui doit être relevé dès à présent. Tout pays doit se montrer à la hauteur de ce défi à travers l'amélioration de sa productivité agricole. Les agriculteurs doivent ainsi adopter une agriculture raisonnée permettant à la fois d'augmenter la fertilité des sols et de conserver, dans le cadre du développement durable, la biodiversité et la fertilité des sols. De tous les facteurs à court terme capables d'augmenter rapidement la production agricole, l'engrais chimique est le facteur qui permet d'atteindre les rendements les plus élevés et les retours sur

investissement les plus substantiels [Pratt, 1965]. Pour préserver l'avenir, il est nécessaire de lutter contre l'utilisation inefficace des engrais en appliquant sur chaque parcelle de terre arable l'engrais spécifiquement adapté à ses justes besoins en éléments fertilisants, pour la culture choisie. En pratique, un engrais sur mesure se définit par une formule dont les nutriments et leurs portions diffèrent selon les caractéristiques pédologiques et les cultures agricoles désirées. Pour un producteur d'engrais, cette contrainte conduit à commercialiser une très grande variété d'engrais et donc à gérer une grande variété de flux dans la distribution. L'objectif est donc de trouver un bon compromis entre la satisfaction exacte de cette grande variété de fertilisants et la diminution des coûts logistiques.

Pour atteindre cet objectif de personnalisation de masse, au lieu de mélanger les engrais existants dont la composition nutritionnelle est connue, cet article propose une nouvelle approche, introduite dans [Benhamou *et al.*, 2018], qui se fonde sur la définition chimique d'un très faible nombre de produits (inputs) à mélanger, ne correspondant pas à des engrais directement utilisables et permettant par mélange de couvrir toute la variété voulue des engrais sur mesure (outputs) dont nous pouvons avoir besoin. La composition nutritive de ces inputs est à déterminer. Cette nouvelle approche, que nous qualifions de **Reverse blending**, vise, à travers un programme quadratique paramétré, à définir les spécifications optimales d'un nombre N d'inputs intermédiaires, que nous qualifions de bases canoniques, dont le *blending* permettra d'offrir la diversité souhaitée d'outputs (formules d'engrais). Ce nombre N est un paramètre que l'on cherche à minimiser. Nous proposons ici une extension de ce modèle de base [Benhamou *et al.*, 2018] permettant, en plus, de déterminer en même temps comment fabriquer ces bases canoniques à partir de matières premières classiquement utilisées dans la fabrication d'engrais.

Dans ce cadre, nous pensons possible d'utiliser de nombreuses unités de *blending* de petite capacité, localisées dans les régions à desservir, alimentées par des flux fortement massifiés d'un petit nombre de bases canoniques. Il faut souligner que de telles unités décentralisées sont assez répandues mais qu'elles effectuent des mélanges d'engrais, avec une efficacité très contestable d'un point de vue agronomique. Le RB utilise donc une approche déjà utilisée mais portant sur quelques bases canoniques et non sur une grande variété d'engrais. Ces bases canoniques doivent être produites dans des usines chimiques avant d'être acheminées vers de petites unités de mélange capables de produire, au même coût, pour les agriculteurs du voisinage, n'importe quel engrais nécessaire en utilisant sa formule de mélange appropriée. Cette approche relève de la différenciation retardée (DR) menée à proximité des clients, plutôt que sur les sites de production, solution habituelle en production discrète. La massification des flux permise par cette approche simplifie la production et la gestion des flux logistiques.

La section 2 est consacrée à une brève revue de la littérature où nous discutons d'abord, dans le cadre de notre projet, les principaux points soulevés par la DR, en tant que technique principale de la personnalisation de masse (PM) avant de la comparer à la DR permise par l'approche proposée du RB. Nous démontrons ensuite que les engrais constituent un exemple pertinent d'application de la production de masse de produits personnalisés par la DR, en raison de la nécessité de la personnalisation des engrais, seule capable d'assurer une agriculture raisonnée et durable. Nous abordons finalement la solution répandue du *blending* d'engrais pour souligner l'avantage incontestable du RB. Dans la section 3, nous décrivons notre modèle RB avant de l'illustrer par un exemple réel simplifié dans la section 4.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature doit porter sur les trois sujets concernés par le problème étudié. La section 2.1 traite du concept de DR, largement utilisé par la personnalisation de masse dans la production discrète, et vérifie son éventuelle adaptation dans le cas d'une production non-discrète. La section 2.2 démontre qu'une très grande variété d'engrais est nécessaire pour atteindre

une agriculture efficace et durable, économiquement inaccessible avec les solutions actuelles. La section 3.2 évoque l'utilisation des approches de mélange d'engrais, trouvées dans la littérature et utilisées par certaines entreprises, pour augmenter la variété d'engrais.

2.1 Différenciation Retardée : une méthode classique de personnalisation d'une production de masse

Afin de bénéficier à la fois des avantages de la production de masse et de la personnalisation, un concept théorisant des pratiques observées dans la production de masse (principalement dans le secteur automobile) a été proposé par Stanley Davis en 1987 : la Personnalisation de Masse (PM). La PM est la production à faible coût d'une grande variété de produits et de services individuellement personnalisés [Pine, 1993]. L'une de ses principales techniques est la différenciation retardée (DR) [McIntosh *et al.*, 2008]. Il s'agit de combiner des processus communs et de retarder le plus possible d'autres processus de différenciation jusqu'à ce que la chaîne logistique atteigne son rapport coût-efficacité [Boone *et al.*, 2007]. Pour ce faire, la conception de la structure des produits et des processus de la supply chain (SC) doit être réalisée de manière simultanée [Shao et Ji, 2008 ; B. Lavigne *et al.*, 2010]. Dans ce contexte, le point de différenciation du produit (PDP) dans la PM peut être retardé pour accroître la flexibilité et la réactivité à la demande du client. Ce concept, qui a intéressé de nombreux chercheurs [Skipworthy et Harrison, 2006 ; Shao et Ji, 2008 ; Algeddawy et Elmaraghy, 2010, Wong *et al.*, 2010, Daaboul et Cunha, 2016 ; et autres], est défini comme étant une opération qui transforme un ou plusieurs produits communs en des produits personnalisés en fonction des besoins des clients. Son emplacement est une décision importante dans la PM et a suscité plusieurs débats dans la littérature : Si le fait de retarder le PDP envisage généralement de réduire les investissements dans le stock des composants à valeur ajoutée et d'affecter la réactivité de l'entreprise aux commandes des clients [Shao et Ji, 2008], plusieurs modèles d'optimisation, correspondant tous à la production discrète, ont été développés afin de pouvoir le localiser de manière optimale [Algeddawy et Elmaraghy, 2010 ; Hanafy et Elmaraghy, 2015...].

Il est également admis que la position optimale du PDP dépend de la stratégie de production adoptée. Pour les entreprises fonctionnant selon le mode « Assemble-to-order » (ATO) (ex. automobile), le PDP se trouve généralement dans les ateliers de montage au sein des sites de production. Pour les entreprises adoptant le mode « Make-to-stock », le PDP peut être soit situé dans les sites de production soit dans les centres de distribution, quoiqu'ici la personnalisation concerne généralement l'étiquetage et/ou l'emballage (ex. Nestlé). Par ailleurs, bien qu'il ait été prouvé que la DR fonctionne bien dans une production discrète (ex. produits de Hewlett-Packard), nous pensons qu'elle n'avait jamais été prise en compte dans une production à flux continu, sauf bien sûr, dans le cas où la personnalisation est effectuée sur la forme et le conditionnement du produit. En revanche, par le moyen du RB, la différenciation retardée agit à la fois sur les produits et leur emballage dans des unités de *blending* de petite capacité, situées à proximité de l'utilisateur final ; la différenciation des produits, faite sur commande, est basée sur un mélange d'inputs déjà produits.

2.2 Engrais personnalisés : un préalable à l'agriculture raisonnée

Les projections montrent que pour pouvoir nourrir une population mondiale de 9,1 milliards de personnes en 2050, la production alimentaire globale devra augmenter d'environ 70 % par rapport à son niveau de 2005 [FAO, 2009]. La rationalisation de la fertilisation est alors indispensable pour le bien de notre planète et pour augmenter les rendements agricoles des agriculteurs. Autrement dit, l'étude du concept de la personnalisation et de son impact sur la chaîne logistique dans le secteur des engrais est extrêmement importante puisqu'elle rend service à la fois aux producteurs, aux consommateurs et à l'environnement. En effet, conséquence directe des faibles taux d'utilisation des engrais et des taux élevés d'extraction des nutriments, les sols sont souvent incapables de fournir sans apport complémentaire les ingrédients nécessaires à la production des biens alimentaires [Fixen *et al.*, 2015]. Ces ingrédients doivent contenir les proportions appropriées d'un certain nombre d'éléments nutritifs, les plus importants étant l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K).

- L'azote joue un rôle essentiel dans la croissance des plantes et le rendement des cultures [Hirel *et al.*, 2007 ; Krapp *et al.*, 2014 ; Ruffel *et al.*, 2014 ; Vidal *et al.*, 2014 ; Wang *et al.*, 2012]. Sa disponibilité et sa concentration interne affectent la répartition de la biomasse entre les racines et les pousses [Bown *et al.*, 2010] ainsi que le métabolisme, la physiologie et le développement des plantes [O'Brien *et al.*, 2016].

- Le phosphore P est un nutriment indispensable et pour le développement des racines et pour la disponibilité des nutriments [Jin *et al.*, 2005]. Il est essentiel pour la division cellulaire, la reproduction et le métabolisme des plantes et permet de stocker l'énergie et gérer son utilisation [Epstein et Bloom, 2004].

- Le potassium K est extrêmement important pour la productivité de la plante. Il joue un rôle majeur dans l'activation des enzymes impliquées dans la croissance des plantes et la régularisation de l'ouverture et la fermeture des stomates dont le bon fonctionnement est essentiel pour la photosynthèse, le transport de l'eau et des nutriments et le refroidissement des plantes [Kalavati et Modi, 2012].

Pour définir le besoin d'une parcelle de terre en ces trois éléments, il est nécessaire de connaître ses propriétés pédologiques et la culture agricole désirée. En effet, les recommandations d'engrais exigent une bonne connaissance de tous les aspects de la fertilisation et de la nutrition des cultures considérées dont les plus importants sont le rendement objectif, le besoin nutritif de la culture et la fourniture de ce nutriment par le sol [Cottenie, 1978]. Pour qu'il quantifie cet apport, l'agriculteur doit passer par les analyses de sol qui jouent un rôle important dans la gestion des éléments nutritifs et la prévention des problèmes nutritionnels et sanitaires à long terme [Watson *et al.*, 2007]. Ces analyses sont à effectuer au moins tous les trois ans [Warneke *et al.*, 2000] pour permettre de déceler les changements dans la composition du sol avant que les rendements ou l'efficacité du programme de fertilisation ne soient gravement compromis. En effet, le sol est un milieu dont les propriétés peuvent varier au fil des mois et des années en réponse aux changements des pratiques de gestion des terres et des propriétés inhérentes du sol [Jenny, 1941] qui varient sous l'influence de plusieurs processus biologiques, physiques et chimiques. Pas un seul hectare de terre de culture n'est donc complètement homogène du point de vue pédologique. Dans le cadre de l'utilisation raisonnée des engrais, cette hétérogénéité peut se traduire par une très grande variété de besoins en engrais,

d'où la nécessité de produire des formules d'engrais personnalisées.

Cette personnalisation permettra d'augmenter le taux de fidélité des exploitants agricoles et donc d'augmenter les parts du marché, à condition d'être économiquement abordable, ce qui est pratiquement impossible avec une forte diversité d'engrais à produire et transporter. L'approche du RB attaque ce problème d'une différenciation retardée efficace et efficiente de manière radicalement différente. Elle vise à produire une très grande variété d'engrais (outputs) à partir d'un nombre très réduit d'inputs, ne correspondant pas à des engrais utilisables mais à des produits dont nous cherchons à définir la composition optimale en nutriments.

2.3 Blending vs Reverse blending

Après des années d'utilisation d'engrais fabriqués à partir de substances extraites ou isolées de sources naturelles, les agriculteurs avaient commencé à utiliser des engrais chimiques depuis 1849, année où le premier brevet pour la production d'engrais chimiques a été délivré [Sheridan, R.C., 1979]. Les engrais sont fabriqués par des réactions chimiques à partir de diverses matières premières dépendant de la composition nutritive du produit final. La production chimique permet certes d'obtenir les structures nutritionnelles requises dans chaque granule, mais la variété générée par ce mode de production incite les producteurs à opter pour la technique alternative du « *blending* d'engrais ».

Les problèmes de *blending* d'engrais ont beaucoup attiré l'attention, comme démontré dans les articles de Babcock *et al.* [1984], Mínguez *et al.* [1988], Ashayeri *et al.* [1994], Traoré *et al.* [2007], Lima *et al.* [2011], Aldeseit [2014], Srichaipanya *et al.* [2014], Cole *et al.* [2015], Loh *et al.* [2015], et leurs références respectives. Ces problèmes consistent à déterminer les quantités optimales à prendre d'un sous-ensemble d'inputs afin de produire une ou plusieurs formules d'engrais. Les inputs utilisés peuvent être des matières premières nutritives [Cole *et al.*, 2015 ; Srichaipanya *et al.*, 2014] ou des engrais, obtenus par réaction chimique ou par mélange, pour lesquels nous connaissons le pourcentage en poids de chaque élément nutritif [Mínguez *et al.*, 1988]. Dans les deux cas, ces inputs, approvisionnés ou produits, existent dans la réalité.

En revanche, dans l'approche RB, consistant à déterminer la composition d'un minimum d'inputs permettant de produire une grande variété de produits, les inputs ne sont pas préexistants mais doivent être créés et leur composition doit être déterminée. Après avoir poursuivi plusieurs pistes de recherche, nous souhaitons souligner l'originalité de l'approche RB car, à notre connaissance, tous les inputs associés aux problèmes de mélange abordés dans la littérature existent déjà. Pour parvenir à cette conclusion, nous avons cherché dans plusieurs bases de données scientifiques, incluses dans la metabase bib.cnrs.fr, en utilisant plusieurs combinaisons de mots-clés (*blending* / inputs, *blending* / inputs properties, *blending* / inputs characteristics / modelling, *blending* / inputs specifications, *blending* / raw materials, *blending* / raw materials properties / modelling, mixture problems / identifying inputs, mixture problems / non-existing inputs...). Les articles extraits de cette recherche traitent tous du *blending* qui implique le mélange des inputs, dont nous pouvons certes ignorer la composition exacte, mais dont nous savons avec certitude qu'elles existent déjà. À cet égard, il est important d'établir une distinction claire entre inputs inconnus et inputs inexistantes. Le premier type

correspond à des intrants existants mais dont les propriétés peuvent varier dans le temps, sont non mesurées, inconnues ou mal connues. Les pourcentages en poids des composants de ce type d'intrants sont d'abord récupérés ou estimés avant de les intégrer, en tant que paramètres, dans le modèle d'optimisation. Pour le deuxième type, les intrants n'existent pas déjà et leurs spécifications sont dérivées des variables de décision du RB.

3 MODÉLISATION

3.1 Reverse Blending

Le RB, appliqué aux engrais, est un problème de mélange où nous cherchons à définir l'ensemble des N intrants (les bases canoniques) dont on ignore initialement la composition nécessairement caractérisée par les mêmes composants c ($c=1..C$) (se référant ici aux nutriments : N, P, K...) qui sont contenus dans les outputs j ($j=1..J$) (se référant ici aux formules d'engrais). Dans cette approche, l'objectif est en fait de partir des demandes des outputs j pour définir les caractéristiques α_{ci} (part du composant c dans le poids de l'intrant i ($i=1..N$)) des N intrants (d'où le nom du *Reverse Blending*) tout en gardant N aussi petit que possible et en respectant l'ensemble des trois jeux de contraintes suivants.

a) Contraintes liées au respect de la quantité demandée pour chaque output j

Simultanément à la recherche de la composition optimale des intrants, le RB vise à définir le mélange optimal des intrants sélectionnés pris en quantités x_{ij} (variables de décision) pour obtenir la quantité D_j , quantité demandée pour chaque output j :

$$D_j = \sum_i x_{ij}, \forall j \quad (1)$$

La quantité D_j demandée pour chaque formule d'engrais j dépend à la fois des surfaces cultivées et du taux d'utilisation d'engrais. Ces deux facteurs peuvent changer d'une saison à l'autre, ce qui explique pourquoi la demande, en tonnes, peut également varier. Pour la déterminer, une étude préalable du marché est nécessaire. Or, vu que la composition et le nombre des intrants ne dépendent pas de la quantité D_j , nous décidons de la fixer à 100 tonnes pour l'ensemble des J outputs. Par la suite, pour adapter la solution trouvée aux demandes réelles $D_j^{réelle}$, il suffit

de multiplier les variables x_{ij} par $(D_j^{réelle} / D_j^{fictive})$.

b) Contraintes liées au respect des exigences nutritionnelles de chaque output j

Le poids relatif $\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j$ du composant c dans l'output j obtenu par mélange doit être égal à une valeur β_{cj} :

$$\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = \beta_{cj}, \forall c, j \quad (2)$$

La formulation de la contrainte liée aux exigences nutritionnelles reste identique à celle du *blending* classique mais le fait que x_{ij} et α_{ci} soient des variables de décision rend le problème quadratique. Comme nous cherchons à réduire au minimum le nombre N d'intrants, le RB devient un **problème quadratique paramétrique** dans lequel nous cherchons la solution de la valeur la plus basse possible de N, en commençant par 3 et en y ajoutant 1, jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée.

c) Contraintes liées à la faisabilité physico-chimiques des intrants
Dans la première version du modèle RB, introduite dans [Benhamou *et al.*, 2018], nous avons supposé que la production de toutes les bases canoniques était possible et nous n'avons donc imposé aucune contrainte de faisabilité sur les variables α_{ci} . En pratique, les matières premières (MP) utilisées pour fabriquer ces bases canoniques doivent être physiquement et chimiquement compatibles et leurs granulométries doivent être proches et suffisamment resserrées.

- D'un point de vue chimique, les MP doivent être sélectionnées de telle sorte à ne pas générer une perte de gaz, une diminution de la disponibilité des éléments nutritifs, une prise en masse due à une mauvaise réaction chimique entre les MP (par exemple, le mélange d'urée avec les phosphates d'ammonium engendre la formation d'une substance gluante générant ainsi une perte d'efficacité du produit obtenu).

- D'un point de vue physique, les calibres (taille et densité des particules) des MP à mélanger doivent être similaires afin d'éviter l'effet de ségrégation des granules durant le transport et l'épandage (par exemple, le mélange de l'urée avec certaines MP peut causer des problèmes d'hétérogénéité vu le faible poids de ses particules comparées aux autres MP).

Par ailleurs, plusieurs contraintes peuvent limiter les compatibilités entre les MP d'un point de vue réglementaire ou sécuritaire (par exemple, le soufre élémentaire est combustible et peut réagir, par exemple, avec les nitrates d'ammonium). Les différentes incompatibilités entre les 19 matières premières généralement utilisées dans le cas des engrais granulés sont représentées dans l'annexe 1. Ces incompatibilités se présentent sous trois catégories : compatible (indiquée en vert), compatibilité limitée (indiquée en jaune) et incompatible (indiquée en rouge). Le risque dû aux incompatibilités entre substances chimiques n'est pas un problème simple à résoudre parce qu'il varie non seulement en fonction de la combinaison mais aussi des rapports des substances dans les mélanges et des conditions ambiantes. Ceci dit, le mélange des MP à compatibilité limitée peut être autorisé mais il est possible que ce mélange soit incompatible dans certains cas (ex. MP consommée à une quantité dépassant un certain seuil minimal). Pour ces raisons, dans un premier temps, nous considérons les MP à compatibilité limitée comme étant non compatibles ; les bases canoniques proposées peuvent alors être fabriquées mais ne pas être les moins chères à produire.

Trouver les bases canoniques demandées en quantité $\sum_j x_{ij}$ qui respectent les contraintes (1) et (2) tout en étant physiquement et chimiquement faisables, implique que leur création soit possible par un mélange de matières premières pris dans un ensemble de M matières premières ($m=1..M$) disponibles. Chaque matière première m est caractérisée par le même ensemble des composants ($c=1..C$) contenus dans les intrants et les outputs. Le paramètre γ_{cm} correspond à la part du composant c dans le poids de la matière première m . Compte tenu des incompatibilités entre ces matières premières et de leurs teneurs nutritionnelles, la recherche des valeurs optimales de α_{ci} doit se faire en respectant les contraintes définies ci-après.

- La quantité demandée de l'intrant i , $\sum_j x_{ij}$, est nécessairement égale à la quantité des matières premières utilisées pour fabriquer

cet input, égale à $\sum_m y_{mi}$, où y_{mi} est la quantité de la matière première m utilisée pour produire l'input i dans la quantité demandée. D'où la relation (3)

$$\sum_j x_{ij} = \sum_m y_{mi}, \forall i \quad (3)$$

- Le poids du composant c dans le poids total de l'input i , $\alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}$, doit être égal au poids $\sum_m \gamma_{cm} \cdot y_{mi}$ obtenu par le mélange des matières premières utilisées pour produire la quantité demandée de l'input i ; d'où la relation quadratique (4)

$$\sum_m \gamma_{cm} \cdot y_{mi} = \alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}, \forall c, i \quad (4)$$

Les demandes d'engrais sont inconnues et ont été fixées arbitrairement ($D_j = 100, \forall j$), parce que le RB a pour objectif ultime de répondre à des demandes potentielles d'engrais sur-mesure et que notre préoccupation ici est de montrer que l'on peut répondre autrement aux exigences d'une agriculture durable. La demande des bases canoniques ($\sum_j x_{ij}, \forall i$), découlant de l'équation de conservation (3), est de ce fait également arbitraire. Dans ces conditions, on a intérêt à supprimer la relation (3) et à remplacer la relation (4) par la relation (4'), qui simplifie le problème à résoudre parce qu'elle est linéaire, et dans laquelle Q est une quantité arbitraire (par exemple 100). La solution à ce nouveau problème est la création de bases canoniques i chimiquement réalisables, dont la composition en matières premières est y_{mi} / Q %.

$$\sum_m \gamma_{cm} \cdot y_{mi} = \alpha_{ci} \cdot Q, \forall c, i \quad (4')$$

Pour formuler les limites concernant les incompatibilités entre les matières premières, nous devons introduire des variables binaires indiquant si une matière première m est utilisée ou non dans la production de l'input i

$$\delta_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{si la matière première } m \text{ est utilisée pour produire l'input } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les contraintes (5) relient les variables continues y_{mi} et binaires δ_{mi} pour les M matières premières et les N inputs.

$$\begin{cases} y_{mi} \leq M \cdot \delta_{mi}, \forall m, i \\ y_{mi} \geq \varepsilon \cdot \delta_{mi}, \forall m, i \end{cases} \quad (5)$$

M est une limite supérieure pour y_{mi} et ε est une très petite valeur positive. Après avoir formulé ces relations entre y_{mi} et δ_{mi} , nous traduisons l'incompatibilité entre les deux matières premières m et m' par la contrainte (6).

$$\delta_{mi} + \delta_{m'i} \leq 1, \forall i \quad (6)$$

En ce qui concerne la fonction-objectif, étant donné que chaque MP m est caractérisée par un coût d'acquisition λ_m , nous considérons que, parmi toutes les solutions possibles avec la valeur la plus faible de N, la meilleure est celle assurant le total des coûts d'acquisition le plus faible. Cela étant, compte tenu du caractère arbitraire des demandes D_j , qui influe sur les demandes de bases canoniques et, en cascade, sur celle des matières premières, cette fonction-objectif doit être considérée comme nécessaire à l'obtention d'une solution, plus que destinée à trouver un optimum économique. Ultérieurement, en partant de demandes prévisionnelles connues, on pourrait affiner l'efficacité de la

spécification des bases canoniques à créer. Le modèle complet du RB est présenté dans Annexe 2.

$$\text{Min}_{m,i} \left[\sum_m \lambda_m \sum_i y_{mi} \right] \quad (7)$$

3.2 Diminution de la variété à produire en mélangeant les outputs

Comme mentionné précédemment, RB vise à minimiser le nombre d'inputs dont la composition optimale doit être trouvée. Dans l'objectif de démontrer la valeur ajoutée du RB par rapport à l'approche actuelle qui consiste à obtenir un engrais (output) en mélangeant des engrais existants (inputs), nous avons décidé d'adapter le modèle du *blending* classique. Pour rappel, ce dernier vise à répondre aux demandes de J outputs en définissant les quantités optimales x_{ij} (variables de décision) à prélever d'un ensemble disponible de N inputs possibles ce qui fait justement la principale différence avec le RB où cet ensemble d'inputs est non encore disponible et doit être défini. Dans sa version standard, ces quantités x_{ij} doivent satisfaire les relations (8), (9) et (10)

respectivement liées au respect de la quantité demandée D_j pour chaque output j , de leurs exigences nutritives β_{cj} et de la quantité

A_i disponible pour chaque input i .

$$D_j = \sum_i x_{ij}, \forall j \quad (8)$$

$$\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = \beta_{cj}, \forall c, j \quad (9)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq A_i, \forall i \quad (10)$$

En revanche, plutôt que de viser une minimisation des coûts, ce modèle est conçu pour déterminer le nombre minimum d'inputs existants (N engrais correspondant à un sous-ensemble des J engrais) à mélanger afin de produire l'ensemble de la variété souhaitée des outputs (J engrais). Il utilise la formulation du *blending* classique et la complète en introduisant deux variables binaires : w_j égal à 1 si l'output j est produit, et 0, sinon ; v_i qui est égal à 1 si l'input i est utilisé, et 0, sinon.

En fixant ici les demandes D_j à une valeur arbitraire K (par exemple, 100 tonnes) et en supposant que tout input i est suffisamment disponible ($A_i \geq J \times K, \forall i$), les relations (8), (9) et (10) seront donc respectivement remplacées par les relations (8'), (9') et (10') :

$$\sum_i x_{ij} = K \cdot w_j, \forall j \quad (8')$$

$$\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = \beta_{cj} \cdot w_j, \forall c, j \quad (9')$$

$$\sum_j x_{ij} \leq J \cdot K \cdot v_i, \forall i \quad (10')$$

Avec S égal au nombre total d'inputs utilisés (11) et une fonction-objectif visant la maximisation du nombre d'outputs produits (12), on cherche à trouver le nombre minimal que prendra S si nous désirons produire toute la variété des outputs. Pour ce faire, on commence par S = J valeur que l'on décrémente progressivement jusqu'à ce que tous les outputs puissent être obtenus soit par fabrication directe, soit par mélange d'outputs fabriqués.

$$S = \sum_i v_i \quad (11)$$

$$\text{Max} \left(\sum_j w_j \right) \quad (12)$$

Ce problème paramétrique est linéaire avec des variables continues, sa solution passe par l'utilisation d'un simplexe. Ses

résultats sont présentés à la fin du §4.2 et son modèle complet est présenté dans Annexe 3.

4 ÉTUDE DE CAS

Le RB est une solution efficace et efficiente destinée à faciliter une agriculture durable par une mise à disposition d'engrais personnalisés de faible coût. Une étude portant sur une quarantaine d'engrais a été réalisée dans un contexte marocain dans cette perspective [Benhamou *et al.*, 2018]. Cependant, il nous a semblé plus intéressant ici de tester le RB sur les J=101 fertilisants (NPKS) commercialisés par les plus grands producteurs d'engrais. On présentera successivement les données (§4.1) et les résultats du RB (§4.2).

4.1 Jeu de données

OCP, Agrium, Potashcorp, Uralkali, Belrarskali, Yara et K+S comptent parmi les plus grands producteurs d'engrais au monde,

chacun représentant une part de marché substantielle dans leur spécialité respective (engrais azotés, phosphatés ou potassiques). Ils offrent une gamme assez large de produits (une centaine de produits) mais en ne prenant en compte que les différents engrais NPKS, nous atteignons un total de J=101 formules d'engrais (Annexe 4).

Comme expliqué au §3.1, l'objectif est de proposer une solution consistant à trouver l'ensemble minimal des bases canoniques et leurs compositions qui vont permettre de répondre à toute la variété souhaitée (101 engrais). Pour qu'elle soit possible, cette solution doit porter sur des bases canoniques pouvant être produites à partir de M = 15 matières premières, tout en respectant les incompatibilités. La composition et le coût d'acquisition de chacune d'entre elles sont fournis dans (Tableau 1).

Tableau 1. Composition (γ_{cm}) et coûts (λ_m) des matières premières sélectionnées

			Matière première m														
			m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7	m=8	m=9	m=10	m=11	m=12	m=13	m=14	m=15
Composant c	%N	c=1	46.0	0	0	11.2	18.3	21.2	0	0	18.3	11.2	34.0	0	0	13.0	0
	%P	c=2	0	46.0	0	55.0	46.4	0	19.0	46.0	46.4	55.0	0	0	0	0	0
	%K	c=3	0	0	60.0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.0	0	46.0	0
	%S	c=4	0	0	0	0	0	24.3	13.0	1.4	2.0	2.4	0	18.0	89.0	0	0
% Filler			54.0	54.0	40.0	33.8	35.3	54.5	68.0	52.6	33.3	31.4	66.0	32.0	11.0	41.0	100.0
Coût d'acquisition (\$/tonne)			405	310	230	499	506	140	385	310	506	499	400	425	550	750	35.29

En plus des quatre nutriments : azote (N), phosphate (P), potasse (K) et soufre (S), un engrais NPKS contient un composant supplémentaire qui n'a généralement aucun impact sur le rendement agricole, appelé « Filler ». Le Filler est utilisé pour des raisons chimiques (stabilisation de la composition des granules) et ne doit pas affecter la structure nutritive. Il est donc censé contenir 0 % de chaque nutriment. C'est le cas de la 15^e matière première (m=15) qui joue le rôle d'un Filler dans l'obtention de la quantité souhaitée pour chaque input. Nous supposons ici que le Filler est composé complètement de sable. Les compatibilités entre ces matières premières sont traduites dans le Tableau 2, qui est dérivé du tableau d'incompatibilité de l'annexe 1, en considérant les incompatibilités faibles comme des incompatibilités strictes.

L'association de deux matières premières est permise si leur intersection dans (Tableau 2) est égale à 1. Si elle est égale à 0, alors, en faisant référence à la contrainte (6) du §3.1, $\delta_{mi} + \delta_{m'i} \leq 1, \forall i$.

Tableau 2. Les incompatibilités entre les matières premières

		Matière première m														
		m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7	m=8	m=9	m=10	m=11	m=12	m=13	m=14	m=15
Matière première m	m=1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
	m=2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	m=3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	m=4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	m=5	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	m=6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
	m=7	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1
	m=8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	m=9	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	m=10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	m=11	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
	m=12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	m=13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
	m=14	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	m=15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4.2 Résultats

L'application du modèle RB à l'exemple ci-dessus pour satisfaire les J = 101 outputs génère un problème avec 1 350 variables et 715 contraintes, dont 404 sont quadratiques non convexes. Le solveur (solveur Xpress-Non linéaire de Xpress-IVE de Fico) a trouvé que seulement 10 bases canoniques (10 inputs) sont nécessaires, dont l'une joue le rôle d'un Filler.

Le tableau 3 contient la composition proposée pour les 9 autres inputs, tandis que le tableau 4 indique les quantités, en tonnes, à prendre de chaque input pour répondre à la demande, en exigences nutritionnelles et en quantité fixée arbitrairement à 100, de chaque output.

Tableau 3. Composition optimale des bases canoniques (inputs) trouvées α_{ci}

			Input i									
			i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
Composant c	%N	c=1	46.0	0	0	10.8	0	11.5	2.7	14.3	8.0	0
	%P	c=2	0	46.0	0	54.2	0	0	6.9	35.4	20.2	0
	%K	c=3	0	0	60.0	0	38.6	0	50.4	0	33.9	0
	%S	c=4	0	0	0	0	0	13.2	0	21.1	0.9	0
% Filler			54.0	54.0	40.0	34.9	61.4	75.4	39.9	29.1	37.1	100

On peut remarquer que les inputs $i=1$, $i=2$ et $i=3$ sont respectivement identiques aux matières premières $m=1$, $m=2$ et $m=3$. De ce fait, les incompatibilités limitant les possibilités de mélange entre ces trois matières premières doivent également être prises en compte dans la recherche des quantités optimales $x_{ij}|_{i \leq 3}$.

Le Tableau 4 montre que si, pour répondre à n'importe quel output, nous devons utiliser l'input 1, alors les inputs 2 et 3 ne doivent absolument pas être retenus. Inversement, si l'input 3 ou

2 est utilisé, alors l'input 1 ne doit pas être présent dans le mélange. Le surlignage vert et rouge a été adopté pour souligner la prise en compte de cette contrainte.

La colonne en gris correspond aux quantités prises du 10^e input, se référant ici au Filler, pour atteindre les 100 tonnes demandées. La valeur optimale de la fonction-objectif est de 281 082 \$, mais elle n'a pas de signification réelle dans la mesure où les demandes d'engrais ont été arbitrairement fixées ($D_j = 100, \forall j$). La composition des quantités y_{mi} est indiquée dans (Tableau 5).

Pour montrer les avantages de notre approche du RB par rapport à celle consistant à satisfaire des formules d'engrais par le mélange d'engrais existants (problème correspondant au modèle du §3.2), nous avons testé cette approche pour trouver le nombre minimal S d'engrais (inputs) nécessaires pour produire les 101 engrais de (Annexe 4). Nous avons trouvé qu'en utilisant N=17 inputs (sur les 101 potentiels), il est possible de produire les 84 autres outputs (Annexe 5). Au-dessous de S = 17 inputs, certaines formules sont impossibles à produire. Nous admettons que ces résultats sont assez satisfaisants mais clairement, avec le RB qui

propose de répondre aux 101 formules avec seulement 10 au lieu de 17 inputs, les coûts seront davantage réduits.

Tableau 4. Les quantités optimales x_{ij}^* à prélever de chaque base canonique (input) i pour produire les engrais j (output)

		input i										Demande (tonnes)
		i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	
Output j	j=1	1.30	0	0	95.88	0	0	0	0	0	2.82	100
	j=2	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100
	j=3	0	0	0	92.19	0	0	0	0	0	7.81	100
	j=4	0	0	24.58	19.09	0	9.76	0	1.54	45.04	0	100
	j=5	0	0	0	16.57	0	5.48	56.92	5.42	15.61	0	100
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	j=97	6.98	0	0	32.07	0	23.17	23.79	14.00	0	0	100
	j=98	5.47	0	0	30.29	0	0	0	17.01	47.24	0	100
	j=99	7.30	0	0	5.44	0	0	47.58	33.18	0	6.50	100
	j=100	8.70	0	0	73.75	0	0	0	0	0	17.55	100
	j=101	1.06	0	0	74.17	0	2.84	0	21.93	0	0	100

Tableau 5. Les quantités optimales y_{mi}^* à prélever de chaque matière première m pour produire les bases canoniques i

		Matière première m														Q (tonnes)	
		m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7	m=8	m=9	m=10	m=11	m=12	m=13	m=14		m=15
Input i	i=1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	i=2	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	i=3	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	i=4	0	5.28	0	91.36	3.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	i=5	0	0	64.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.60	100
	i=6	0	0	0	0	0	54.13	0	0	0	0	0	0	0	0	45.87	100
	i=7	0	0	84.08	0	14.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.01	100
	i=8	0	0	0	0	0	2.90	0	0	73.31	2.59	0	0	21.20	0	0	100
	i=9	0	0	56.45	0	0	0	0	0	43.55	0	0	0	0	0	0	100
	i=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100

5 CONCLUSION

La *Reverse blending* est une méthode efficace pour fournir des engrais personnalisés qui répondent exactement aux besoins d'une agriculture durable tout en réduisant les problèmes de production et de transport, grâce à une massification des flux. Son adoption implique des changements importants dans les processus de production et de distribution. Il s'ensuit que les industriels souhaitant appliquer le RB doivent être prêts à restructurer leur chaîne logistique. Le RB fait donc partie d'un projet stratégique à long terme, dont l'impact peut être évalué. Au stade de cette recherche, on peut seulement affirmer que cette massification liée à une forte réduction de la diversité produite et d'un passage d'une production majoritairement à la commande à une production pour stock conduira à : une augmentation de la capacité de production (en raison de la réduction des temps de lancement), une forte réduction des problèmes de stockage (liée à une diminution des contraintes de ségrégation des stocks) et de manutention (liée à une diminution de la complexité des flux), à la réduction des coûts d'expédition, etc. Par ailleurs, au moins pour l'industrie des engrais, les études de marché préliminaires ne seront plus nécessaires dans la mesure où « c'est l'offre qui crée la demande » (et non pas « la demande crée l'offre », comme c'est généralement le cas).

Bien que l'intérêt potentiel de cette approche soit évident, un certain nombre de problèmes doivent encore être traités dans une perspective multidisciplinaire.

- Pour travailler sur de grandes instances correspondant aux engrais personnalisés destinés à un ensemble de pays, nous devons solliciter l'aide des agronomes pour définir les besoins exacts en éléments nutritifs qui dépendent du couple « sol / culture ». Le choix des cultures peut porter sur les cultures actuelles ou éventuellement sur celles que les administrations locales voudraient promouvoir, notamment pour assurer une autosuffisance alimentaire.

- L'expertise de chimistes doit aussi être sollicitée pour élargir la base des matières premières actuellement utilisées pour fabriquer les bases canoniques, tenir compte de la disponibilité de ces matières premières et pour examiner l'usage possible de certaines combinaisons impliquant des incompatibilités faibles (considérées comme strictes dans notre étude de cas). Il faut prendre en compte d'autres contraintes techniques liées à l'environnement de fabrication, telles que la nature des matières premières et du matériel utilisé, les stocks de matières premières disponibles, etc.

- Il faut enfin étudier l'impact de cette transformation des processus de production sur la chaîne logistique d'OCP (notre sponsor), par l'étude de nouveaux schémas de distribution et de

production. Ces derniers seront basés sur plusieurs scénarios décrivant l'impact de la massification des flux sur le transport, ainsi que la nature, l'emplacement et le dimensionnement des unités de *blending* à implanter (notamment en Afrique qui est l'un des plus grands marchés d'OCP).

Deux remarques pour conclure. D'autres industries de process, comme celle des cosmétiques, peuvent avoir intérêt à mobiliser l'approche du RB dans une optique de production de masse sur mesure. Enfin, dans le cas de la filière des engrais, les gains de performance induits par le RB ne jouent pas seulement sur la rentabilité de l'entreprise : ses conséquences sur une agriculture durable à coûts maîtrisés ont une dimension éthique qui relève de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) de ce secteur, en raison des enjeux de survie alimentaire de l'humanité dans les prochaines décennies.

6 RÉFÉRENCES

- Aldesait, B., (2014). Linear Programming-Based Optimization of Synthetic Fertilizers Formulation. *Journal of Agricultural Science* 6.
- AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., (2010). Assembly systems layout design model for delayed products differentiation. *International Journal of Production Research* 48, 5281–5305.
- Ashayeri, J., van Eijs, A.G.M., Nederstigt, P., (1994). Blending modelling in a process manufacturing: A case study. *European Journal of Operational Research* 72, 460–468.
- Babcock, B., Rister, M.E., Kay, R.D., Wallers, J.A., (1984). Identifying Least-Cost Sources of Required Fertilizer Nutrients. *American Journal of Agricultural Economics* 66, 385–391.
- Baud-Lavigne, B., Agard, B., Penz, B., (2012). Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics, Advances in Optimization and Design of Supply Chains* 135, 50–60.
- Benhamou, L., Giard, V., Fontane, F., Grabot, B., (2018). Reverse Blending: an efficient answer to the challenge of obtaining required fertilizer variety. *Information System, Logistics and Supply (ILS 2018 & Cahier de recherche 385 du LAMSADE*.
- Boone, C.A., Craighead, C.W., Hanna, J.B., (2007). Postponement: an evolving supply chain concept. *Int Jnl Phys Dist & Log Manage* 37, 594–611.
- Bown, H.E., Watt, M.S., Clinton, P.W., Mason, E.G., (2010). Influence of ammonium and nitrate supply on growth, dry matter partitioning, N uptake and photosynthetic capacity of *Pinus radiata* seedlings. *Trees* 24, 1097–1107.
- C. Brady, N., Weil, R., (2004). *Elements of the nature and properties of soils* / Nyle C. Brady, Ray R. Weil, 2nd ed. Atlanta, GA : Prentice Hall.
- Cottenie, A., (1980). Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. *F.A.O. Soils Bulletin*.
- Da Silveira, G., Borenstein, D., Fogliatto, F.S., (2001). Mass customization: Literature review and research directions. *International Journal of Production Economics* 72, 1–13.
- Daaboul, J., Da Cunha, C.M., (2014). Differentiation and Customer Decoupling Points: Key Value Enablers for Mass Customization, in: Grabot, B., Vallespir, B., Gomes, S., Bouras, A., Kiritsis, D. (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 43–50.
- Epstein, E., Bloom, A.J., (2005). *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*, 2nd ed. ed. Sunderland, Mass. ; [Great Britain] : Sinauer Associates.
- FAO, (2009). 2050: 2,3 milliards de bouches de plus à nourrir, Comment nourrir le monde 2050. High Level Expert Forum.
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., Zingore, S., n.d. Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends, in: *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*. p. 8.
- Guidance For Compatibility Of Fertilizer Blending Materials [WWW Document], n.d. URL http://www.productstewardship.eu/fileadmin/user_upload/user_upload_prodstew/documents/Guidance_for_compatibility2.pdf
- Hanafy, M., ElMaraghy, H., (2015). >Developing assembly line layout for delayed product differentiation using phylogenetic networks. *International Journal of Production Research* 53, 2633–2651.
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P., Dubois, F., (2011). Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability* 3 1452–1485.
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*.
- Jin, J., Tang, C., Sale, P., (2015). The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: a review. *Ann Bot* 116, 987–999.
- Krapp, A., David, L.C., Chardin, C., Girin, T., Marmagne, A., Leprince, A.-S., Chaillou, S., Ferrario-Méry, S., Meyer, C., Daniel-Vedele, F., (2014). Nitrate transport and signalling in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.* 65, 789–798.
- Lima, R.L.S., Severino, L.S., Sampaio, L.R., Sofiatti, V., Gomes, J.A., Beltrão, N.E.M., 2011. Blends of castor meal and castor husks for optimized use as organic fertilizer. *Industrial Crops and Products* 33, 364–368.
- Loh, S.K., Cheong, K.Y., Choo, Y.M., Salimon, J., (2015). Formulation and optimisation of spent bleaching earth-based bioorganic fertiliser. *Journal of Oil Palm Research* 27, 57–66.
- M. Cole, B., Bradshaw, S., Potgieter, H., (2015). An optimisation methodology for a supply chain operating under any pertinent conditions of uncertainty - an application with two forms of operational uncertainty, multi-objectivity and fuzziness. *International Journal of Operational Research* 23, 200–227.
- McIntosh, R.I., Matthews, J., Mullineux, G., Medland, A.J., (2010). Late customisation : issues of mass customisation in the food industry. *International Journal of Production Research* 48, 1557–1574.
- Mínguez, M.I., Romero, C., Domingo, J., (1988). Determining Optimum Fertilizer Combinations through Goal Programming with Penalty Functions: An Application to Sugar Beet production in Spain. *J Oper Res Soc* 39, 61–70.
- O'Brien, J.A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., Gutiérrez, R.A., (2016). Nitrate Transport, Sensing, and Responses in Plants. *Molecular Plant* 9, 837–856.
- Pine, B.J., (1993). Mass customizing products and services. *Planning Review* 21, 6–55.
- Pratt, C.J., (1965). *Chemical Fertilizers*. *Scientific American* 212, 62–75.
- Prix des engrais agricoles [WWW Document], n.d. . Terre-net. URL <https://www.terre-net.fr/marche-agricole/engrais>
- Ruffel, S., Gojon, A., Lejay, L., (2014). Signal interactions in the

regulation of root nitrate uptake. *J. Exp. Bot.* 65, 5509–5517.

Shao, X.-F., Ji, J.-H., (2008). Evaluation of postponement strategies in mass customization with service guarantees. *International Journal of Production Research* 46, 153–171.

Sheridan, R.C., (1979). *Chemical Fertilizers in Southern Agriculture*. *Agricultural History* 53, 308–318.

Skipworth, H., Harrison, A., (2004). Implications of form postponement to manufacturing: a case study. *International Journal of Production Research* 42, 2063–2081.

Srichaipanya, W., Artrit, P., Sangrung, A., (2014). Fertilizer Quality Control of a Bulk-Blending Plant Using Intelligent Systems. *Suranaree Journal of Science & Technology* 21, 137–146.

Traoré, O., Koulibaly, B., Dakuo, D., (2007). Effets comparés de deux formes d’engrais sur les rendements et la nutrition minérale en zone cotonnière au Burkina Faso. *TROPICULTURA* 25, 200–203.

Vidal, E.A., Álvarez, J.M., Gutiérrez, R.A., (2014). Nitrate regulation of AFB3 and NAC4 gene expression in Arabidopsis roots depends on NRT1.1 nitrate transport function. *Plant Signal Behav* 9, e28501.

Wang, Y.-Y., Hsu, P.-K., Tsay, Y.-F., 2012. Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends Plant Sci.* 17, 458–467.

Warncke, D.D., (2000). *Sampling Soils for Fertilizer and Lime Recommendations (Extension Bulletin No. E498)*. Michigan State University Extension.

Watson, C. a., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L. r., Rayns, F. w., (2002). Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239–247.

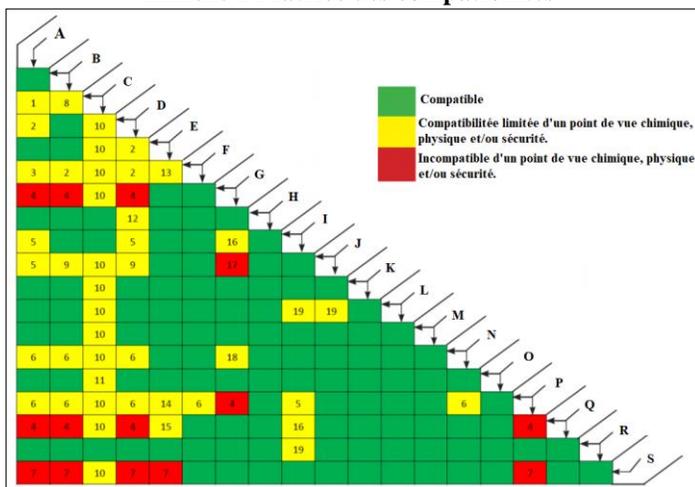
Watson, C., Stockdale, E., Lois, P., (2015). *Soil Analysis and Management (Results of Organic Research No. Technical Leaflet 4)*, Agricolology. Institute of Organic Training & Advice.

Wong, H., Potter, A., Naim, M., (2011). Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain: A case study. *International Journal of Production Economics* 131, 355–364.

1	En raison du comportement hygroscopique des deux produits (nitrate d’ammonium et nitrate de calcium), le type de stabilisation du nitrate d’ammonium peut impacter le maintien des caractéristiques du produit lors de stockage.
2	Prendre en compte les implications liées à la sécurité quant au risque de détonabilité du mélange dans certaines proportions (mélanges d’engrais simples azotés à base de nitrate d’ammonium et de sulfate d’ammonium) et les aspects réglementaires.
3	Prendre en compte les implications liées à la sécurité quant au risque de détonabilité du mélange dans certaines proportions (mélanges d’engrais simples azotés à base de nitrate d’ammonium et de sulfate d’ammonium), la présence d’impuretés organiques et d’acide libre ainsi que les aspects réglementaires.
4	Le mélange deviendra rapidement humide, par absorption d’humidité, pour conduire à la formation de liquide ou boue.
5	La présence potentielle d’acide libre peut entraîner une décomposition très lente du nitrate d’ammonium, générant un gonflement de l’emballage.
6	Prendre en compte l’aptitude à la décomposition autoentretenu (DAE).
7	Le soufre élémentaire est combustible et peut réagir avec des nitrates par exemple les nitrates d’ammonium, de potassium et de sodium
8	En raison du comportement hygroscopique des deux produits, le type de stabilisant du nitrate d’ammonium peut influencer le maintien des caractéristiques du produit lors de stockage.
9	Prendre en compte la teneur en eau du SSP/TSP
10	Prendre en compte la reprise d’humidité pendant les opérations de mélange.
11	Risque de formation de gypse.
12	Pas de données expérimentales démontrant l’incompatibilité.
13	Prendre en compte les impuretés du sulfate d’ammonium, ainsi que l’augmentation de la reprise d’humidité du mélange.
14	Attention à l’augmentation de la teneur en nitrate.
15	Prendre en compte la possibilité de réaction du phosphate monoammonique/nitrate de potassium avec l’urée ainsi que la possibilité de reprise d’humidité pendant le mélange afin d’éviter la prise en masse.
16	La présence potentielle d’acide libre peut provoquer l’hydrolyse de l’urée, conduisant à des émissions d’ammoniac et de dioxyde de carbone.
17	Formation de phosphate d’urée très gluant.
18	Risque de prise en masse si présence d’humidité.
19	Cas du SSP : la présence d’acide résiduel peut entraîner une réaction, par exemple une neutralisation avec émission d’ammoniac et une attaque acide avec des carbonates.

7 ANNEXES

Annexe 1 Matrice des compatibilités



A	Nitrate d'ammonium (NA)	H	Phosphate naturel	
B	CAN (NA + Dolomie ou Craie)	I	Phosphate naturel partiellement solubilisé	O Sulfate de potassium / Sulfate de magnésium
C	Nitrate de calcium	J	Superphosphate simple (SSP) ou triple (TSP)	P NPK, NP, NK (base Nitrate d'ammonium)
D	ASN (Sulfonitrate)	K	Phosphate monoammonique (MAP)	Q NPK, NP, NK (Base urée)
E	Nitrate de potassium / Nitrate de sodium	L	Phosphate d'ammoniaque (DAP)	R Carbonate/ dolomie/ gypse
F	Sulfate d'ammonium	M	Phosphate de potassium	S Soufre (élémentaire)
G	Urée	N	Chlorure de potassium	

Annexe 2 Modèle du Reverse Blending

Type	Symbole	Description
Indices	$i = 1..N$	- Base canonique (BC)
	$j = 1..101$	- Formule d'engrais
	$c = 1..4$	- Nutriment
	$m = 1..15$	- Matière première (MP)
Paramètres	N	- Nombre des bases canoniques (paramètre à minimiser)
	D_j	- Quantité demandée pour chaque formule d'engrais j
	β_{cj}	- Part exigée du nutriment c dans la formule d'engrais j
	γ_{cm}	- Part du nutriment c dans le poids de la MP m
	λ_m	- Coût d'acquisition de la matière première m
	$\zeta_{mm'}$	- Compatibilité entre les matières premières m et m' (m et m' sont compatibles $\Leftrightarrow \zeta_{mm'} = 1$)
Variables	x_{ij}	- Quantité à prélever de la BC i pour produire l'engrais j
	α_{ci}	- Part du nutriment c dans le poids de la BC i
	y_{mi}	- Quantité à prélever de la MP m pour la BC i
	δ_{mi}	- Variable binaire qui est égale à 1 si la MP m est utilisée pour produire la BC i ; 0 sinon.
Contraintes	$\sum_c \alpha_{ci} = 1, \forall i$	- Somme des poids relatifs α_{ci} doit être égale à 100%
	$D_j = \sum_i x_{ij}, \forall j$	- Respect de la quantité demandée pour chaque output j
	$\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = \beta_{cj}, \forall c, j$	- Respect des exigences nutritionnelles de chaque output j
	$\sum_j x_{ij} = \sum_m y_{mi}, \forall i$	- Contrainte liée à la conservation des quantités
	$\sum_m \gamma_{cm} \cdot y_{mi} = \alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}, \forall c, i$	- Contrainte liée à la conservation de la structure nutritionnelle
	$\delta_{mi} + \delta_{m'i} \leq 1, \forall i, m, m' m \neq m' \wedge \zeta_{mm'} = 0$	- Contrainte liée à l'interdiction des mélanges incompatibles
	$\begin{cases} y_{mi} \leq M \cdot \delta_{mi}, \forall m, i \\ y_{mi} \geq \varepsilon \cdot \delta_{mi}, \forall m, i \end{cases}$	- Contraintes liant les variables binaires δ_{mi} aux variables continues y_{mi}
Fonction-objectif	$\text{Min}_{m,i} \left[\sum_m \lambda_m \sum_i y_{mi} \right]$	Minimisation des coûts d'acquisition

Annexe 3 Modèle consistant à diminuer la variété à produire par mélange des outputs

Type	Symbole	Description
Indices	$i = 1..101$	- Engrais Input
	$j = 1..101$	- Engrais Output
	$c = 1..4$	- Nutriment
Paramètres	D_j	- Quantité demandée pour chaque engrais j
	β_{cj}	- Part exigée du nutriment c dans l'engrais j
	α_{ci}	- Part du nutriment c dans le poids de l'engrais i
	S	- Nombre minimal d'engrais nécessaire pour produire $J=101$ engrais
Variables	x_{ij}	- Quantité à prélever de l'input i pour l'output j
	w_j	- Variable binaire qui est égale à 1 si l'output j est produit ; 0 sinon.
	v_i	- Variable binaire qui est égale à 1 si l'input i est utilisé ; 0 sinon.
Contraintes	$\sum_i x_{ij} = D_j \cdot w_j, \forall j$	- Respect de la quantité demandée pour chaque output j
	$\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = \beta_{cj} \cdot w_j, \forall c, j$	- Respect des exigences nutritionnelles de chaque output j
	$\sum_j x_{ij} \leq J \cdot K \cdot v_i, \forall i$	- Contrainte liée à la disponibilité de l'input i
	$S = \sum_i v_i$	- S égal au nombre total d'inputs utilisés
Fonction-objectif	$\text{Max}(\sum_j w_j)$	Maximisation du nombre des engrais (outputs) à produire

Annexe 4 Producteurs et composition de l'ensemble des J=101 outputs (NPKS)

Annexe 5 Les 17 inputs sélectionnés nécessaires à la production des 84 autres outputs

			Composant c				Composant c						
			%N	%P	%K	%S	%N	%P	%K	%S			
			c=1	c=2	c=3	c=4	c=1	c=2	c=3	c=4			
Producteurs des engrais NPKS	Potashcrop	j=1	11.0	52.0	0	0	Agrium	j=52	5.0	20.0	20.0	0	
	K+S	j=2	0	0	60.0	0		j=53	6.0	6.0	18.0	0	
		j=3	10.0	50.0	0	0		j=54	6.0	6.0	22.0	0	
		j=4	7.0	20.0	30.0	2.0		j=55	6.0	12.0	18.0	0	
	Belaruskali	j=5	6.0	18.0	34.0	2.0		j=56	8.0	8.0	8.0	0	
		j=6	15.0	15.0	15.0	8.0		j=57	8.0	8.0	24.0	0	
		j=7	13.0	13.0	21.0	8.0		j=58	10.0	10.0	10.0	0	
		j=8	9.0	25.0	25.0	2.0		j=59	13.0	0	14.0	0	
		j=9	5.0	20.5	36.0	0		j=60	13.0	13.0	13.0	0	
		j=10	6.0	26.0	30.0	0		j=61	14.0	4.0	14.0	0	
		j=11	5.0	20.0	30.0	0		j=62	14.0	7.0	14.0	0	
		j=12	4.0	16.0	34.0	0		j=63	15.0	5.0	10.0	0	
		j=13	22.0	5.0	27.0	0		j=64	10.0	5.0	25.0	0	
		Yara	j=14	30.0	0	0		2.8	j=65	5.0	10.0	25.0	0
			j=15	33.5	0	0		0	j=66	7.0	20.0	20.0	0
			j=16	27.0	0	0		4.8	j=67	16.0	4.0	8.0	0
			j=17	25.0	0	0		8.0	j=68	3.0	7.0	28.0	0
	j=18		24.0	0	0	7.2		j=69	5.0	22.0	6.0	0	
	j=19		20.0	10.0	10.0	4.0		j=70	21.0	0	21.0	0	
	j=20		27.0	5.0	5.0	3.6		j=71	2.0	6.0	42.0	0	
	j=21		26.0	0	6.0	4.0		j=72	5.0	5.0	5.0	0	
	j=22		14.0	16.0	10.0	4.0		j=73	6.0	24.0	24.0	0	
	j=23		16.0	15.0	10.0	6.8		j=74	8.0	16.0	16.0	0	
	j=24		15.0	15.0	15.0	0		j=75	3.0	5.0	28.0	0	
	j=25		20.0	6.0	9.0	4.0		j=76	5.0	12.0	12.0	0	
	j=26		27.0	6.0	0	5.2		j=77	8.0	16.0	24.0	0	
	j=27		13.0	6.0	23.0	4.8		j=78	9.0	10.0	30.0	0	
	j=28		14.0	10.0	20.0	4.8		j=79	16.0	0	16.0	0	
	j=29		13.0	10.0	18.0	5.6		j=80	12.0	12.0	12.0	0	
	j=30		17.0	17.0	0	6.8		j=81	4.0	6.0	32.0	0	
	j=31		21.0	13.0	0	6.8		j=82	1.0	3.0	23.0	0	
	Uralkali	j=32	46.0	0	0	0		j=83	0	46.0	0	0	
		j=33	34.0	0	0	0		j=84	11.0	54.0	0	0	
		j=34	12.0	46.0	0	7.0		j=85	16.0	20.0	0	0	
		j=35	20.0	10.0	10.0	3.0		j=86	19.0	38.0	0	0	
		j=36	27.0	0	0	0		j=87	12.0	23.0	14.0	0	
		j=37	44.0	0	0	0		j=88	12.0	24.0	12.0	0	
		j=38	25.0	0	0	0		j=89	14.0	15.0	15.0	0	
		j=39	20.5	0	0	0		j=90	14.0	28.0	14.0	0	
		j=40	12.0	52.0	0	0		j=91	12.0	46.0	0	5.0	
		j=41	20.2	0	0	0		j=92	12.0	48.0	0	7.0	
		Agrium	j=42	0	0	50.0		0	j=93	16.0	20.0	0	13.0
			j=43	6.0	3.0	18.0		0	j=94	20.0	20.0	0	15.0
			j=44	0	20.0	20.0		0	j=95	14.0	15.0	15.0	10.0
			j=45	3.0	9.0	9.0		0	j=96	10.0	20.0	10.0	6.0
			j=46	3.0	9.0	18.0		0	j=97	12.0	24.0	12.0	6.0
			j=47	4.0	8.0	12.0		0	j=98	12.0	32.0	16.0	4.0
			j=48	5.0	5.0	25.0		0	j=99	10.0	18.0	24.0	7.0
			j=49	5.0	8.0	21.0		0	j=100	12.0	40.0	0	0
			j=50	5.0	10.0	15.0		0	j=101	12.0	48.0	0	5.0
			j=51	5.0	10.0	30.0		0					

	17 inputs sélectionnés																	Dj
	i=2	i=8	i=9	i=10	i=11	i=15	i=19	i=24	i=25	i=26	i=34	i=59	i=68	i=80	i=81	i=82	i=86	
	j=1	51.6	48.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
j=3	53.5	46.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=4	26.4	73.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=5	92.2	7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=6	18.6	81.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=7	1.2	98.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=12	2.5	0	8.0	0	0	89.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=13	0	5.4	13.6	0	0	81.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=14	3.4	0	1.8	0	0	94.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=16	17.8	38.8	43.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=17	20.4	9.2	0	0	0	70.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=18	18.5	0	49.9	0	0	31.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=20	30.5	34.5	0	35.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=21	4.6	68.7	0	26.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=22	32.3	28.9	0	0	0	0	0	0	38.9	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=23	15.2	24.8	0	0	0	0	60.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=27	1.8	0	0	60.0	0	37.9	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	100
j=28	1.3	0.6	0	50.0	0	48.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=29	1.6	0	0	47.5	0	34.3	0	0	0	0	16.6	0	0	0	0	0	0	100
j=30	1.8	0	0	0	67.0	28.7	0	0	0	2.4	0	0	0	0	0	0	0	100
j=31	45.7	0	0.4	45.0	0	8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=32	32.6	0	20.0	0	18.4	0	0	0	0	28.9	0	0	0	0	0	0	0	100
j=33	0	26.6	0	0	4.7	0	0	0	0	5.5	0	0	63.2	0	0	0	0	100
j=35	0	5.6	7.4	0	24.8	0	0	0	0	0	62.2	0	0	0	0	0	0	100
j=36	0	3.9	0	0	8.0	0	0	0	0	24.0	0	64.1	0	0	0	0	0	100
j=37	0	23.5	0	0	29.8	0	0	0	0	21.2	0	0	25.6	0	0	0	0	100
j=38	0	20.2	0	0	26.0	0	0	0	0	35.4	0	18.4	0	0	0	0	0	100
j=39	0	17.2	0	0	10.0	0	0	0	0	42.4	0	30.3	0	0	0	0	0	100
j=40	5.1	13.2	21.7	0	60.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=41	0	3.7	0	15.6	0	34.5	0	0	0	0	0	0	46.2	0	0	0	0	100
j=42	0	21.7	0	0	24.0	0	0	0	0	21.9	0	32.4	0	0	0	0	0	100
j=43	0	25.6	0	0	32.0	0	0	0	0	25.9	0	16.5	0	0	0	0	0	100
j=44	0	28.9	0	0	13.6	1.5	0	0	0	56.1	0	0	0	0	0	0	0	100
j=45	0	27.3	12.0	0	11.0	0	0	0	0	0	0	49.7	0	0	0	0	0	100
j=46	0	38.3	16.8	39.6	0	0	0	0	0	5.4	0	0	0	0	0	0	0	100
j=47	0	49.3	0	0	0	0	0	0	0	49.8	0	1.0	0	0	0	0	0	100
j=48	27.4	0	0	0	0	0	0	0	0	58.7	13.9	0	0	0	0	0	0	100
j=49	4.7	58.6	8.7	0	28.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=50	9.8	47.0	15.2	0	28.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=51	4.0	65.1	10.9	0	20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=52	1.6	45.9	10.9	41.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
j=53	3.7	16.3	0	0	30.0	0	0	0	0	50.0	0	0	0	0	0	0	0	100

	17 inputs sélectionnés																	Dj
	i=2	i=8	i=9	i=10	i=11	i=15	i=19	i=24	i=25	i=26	i=34	i=59	i=68	i=80	i=81	i=82	i=86	
	j=54	15.2	0	40.0	0	36.8	0	0	0	0	7.9	0	0	0	0	0	0	