

## AVANTAGES POTENTIELS DU REVERSE BLENDING SUR LA CHAÎNE LOGISTIQUE DE L'INDUSTRIE DES ENGRAIS

<sup>1,2</sup>L. BENHAMOU, <sup>1,2</sup>P. FÉNIÈS

<sup>1,3</sup>V. GIARD

<sup>1</sup>EMINES - School of Industrial Management, UM6P,  
Benguerir, Maroc

<sup>2</sup> Université Panthéon Assas Paris II, Paris, France  
{latifa.benhamou, pierre.fenies}@emines.um6p.ma

<sup>3</sup>Université Paris-Dauphine, Université PSL Research,  
Paris, France

[vincent.giard@emines.um6p.ma](mailto:vincent.giard@emines.um6p.ma)  
[vincent.giard@dauphine.psl.eu](mailto:vincent.giard@dauphine.psl.eu)

**RÉSUMÉ :** *La différenciation retardée, l'une des techniques clés de la personnalisation de masse, s'est avérée être une stratégie de haute performance dans l'industrie de production discrète. Dans l'industrie de production continue, elle reste mal explorée, surtout lorsque la différenciation intervient aussi sur la composition du produit et non pas seulement sur sa forme. Le Reverse Blending est un nouveau problème de mélange de la recherche opérationnelle basé sur une formulation quadratique, où les exigences des outputs sont similaires à celles du blending classique, mais où les inputs ne sont pas préexistants et doivent être définis simultanément avec leur utilisation dans le processus de mélange, tout en répondant exactement aux exigences des outputs. Le Reverse Blending peut être utilisé pour obtenir une grande variété d'engrais personnalisés (outputs) à partir d'un petit nombre d'inputs pouvant être mélangés à l'extérieur de l'usine chimique, près des utilisateurs finaux. Cette solution permettrait de remplacer la production d'une grande variété de petits lots de produits finis par celle d'un petit nombre de grands lots de produits intermédiaires, permettant une rationalisation logistique précieuse et des économies substantielles. Cet article propose une étude de cas de l'impact potentiel du Reverse Blending sur la chaîne logistique de l'industrie des engrais.*

**MOTS-CLÉS :** *Chaîne logistique, Recherche Opérationnelle, Innovation, Gestion de Production, Reverse Blending, Différenciation retardée*

### 1 INTRODUCTION

Maximiser les rendements des variétés agricoles tout en préservant la fertilité des sols est essentiel pour pouvoir assurer la sécurité alimentaire et accompagner la croissance démographique. À cette fin, la concentration du sol en éléments nutritifs doit être optimale pour que ces derniers soient utilisés de manière efficace (Incrocci et al., 2017). Pour ce faire, il faut recourir à des formules d'engrais personnalisées dont les nutriments et les proportions diffèrent selon les caractéristiques pédologiques et les cultures agricoles. En plus des nutriments majeurs (azote N, phosphore P et potassium K), ces engrais peuvent être complétés par plusieurs nutriments secondaires (par exemple, le soufre) et/ou micronutriments (par exemple, le zinc), ce qui peut se traduire par des centaines, voire des milliers de formules d'engrais. Pour un fabricant d'engrais, cela revient à : *i*) produire un grand nombre de différents lots d'engrais personnalisés sur des lignes de production à flux continue, et *ii*) relever un défi majeur qui est celui de gérer la production, le stockage et la distribution d'une grande variété de produits finis.

Dans le contexte de la production continue, la performance de la production et de la distribution d'une grande variété de produits ne peut être optimale car elle accroît significativement les coûts directs de la main-d'œuvre et des matériaux, les frais généraux de fabrication, le délai de livraison et les niveaux de stock (Salvador et al., 2002). En ce qui concerne la production discrète, des

études bibliographiques approfondies sont disponibles quant à l'organisation industrielle la plus appropriée pour gérer une grande variété de produits. Par exemple, dans une étude de 60 articles (dont 80 % concernent une production discrète et 20 % concernent le secteur des services), Reis et al. (2013) ont identifié sept stratégies capables d'atténuer les effets négatifs de la variété des produits. La stratégie la plus fréquente consiste à utiliser des composants communs (Reis et al., 2013). Selon Johnson et Kirchain (2009), ceci s'avère être le moyen le plus efficace pour réduire les coûts. Cette stratégie, également connue sous le nom de la standardisation, est communément associée à la Différenciation Retardée (DR). Cette dernière vise à retarder les processus de différenciation en retardant la combinaison des produits communs aussi tard que possible afin que la chaîne logistique atteigne son rapport coût-efficacité (Boone et al., 2007). Dans la production discrète, DR fait référence à la production successive de différents produits obtenus en assemblant des composants alternatifs sur une chaîne de montage permettant des milliers de combinaisons de produits avec un niveau élevé de réactivité (par exemple, l'industrie automobile).

À notre connaissance, aucune recherche n'a jamais été menée sur la gestion d'une très grande diversité dans la production continue, sauf là où cette diversité provient de la personnalisation de la forme et/ou le conditionnement (par exemple, emballage dans l'industrie du café (Van Hoek, 2011) ou forme/coupe de produits dans l'industrie sidérurgique (Kerkkänen, 2007)). Nous pensons que, dans l'industrie continue, le Reverse Blending

(RB) (une extension du mélange classique où les inputs doivent être définis), peut-être une approche disruptive efficace pour mettre en œuvre une différenciation retardée efficace en ajoutant à un simple emballage une dimension concernant la composition interne du produit (Benhamou et al., 2019). En montrant son impact sur l'organisation de la Supply Chain (SC), notre article traite des avantages potentiels du RB pour les producteurs d'engrais qui seraient prêts à restructurer leur chaîne logistique.

À la suite de cette brève introduction, notre article est structuré comme suit : la section 2 décrit les principes fondamentaux du RB avant de discuter en section 3, les avantages potentiels d'une organisation basée sur le RB; la section 4 présente les principales conclusions de notre étude de cas et, pour conclure, la section 5 met en évidence des pistes importantes pour les futures recherches.

## 2 PRINCIPES FONDAMENTAUX DU REVERSE BLENDING

Pour atteindre une grande variété d'engrais personnalisés, le RB cherche les spécifications chimiques optimales du plus petit ensemble – appelé « Base Canonique (BC) » – d'inputs de mélange – appelés « Composites de la Base Canonique (CBC) » – dont les combinaisons de mélange forment une nomenclature à utiliser pour produire toute quantité de tout output appartenant à la variété d'engrais à l'étude (Benhamou et al., 2019). D'autres nouvelles formules d'engrais supplémentaires peuvent être obtenues à partir de ces CBC par un problème linéaire classique de mélange visant à minimiser les écarts par rapport aux spécifications exactes de ces formules. En termes de RO, le RB est un nouveau problème de mélange mono-étage dont les caractéristiques des inputs (CBC) sont des variables de décision par opposition au blending classique où les spécifications des inputs sont des paramètres d'entrée. La revue de littérature, présentée dans (Benhamou et al., 2019), démontre l'originalité de cette approche par rapport aux problèmes de mélange traités dans diverses industries (secteurs agroalimentaire, minier, pétrolier et chimique) et l'industrie des engrais en particulier.

Étant non préexistants, certains CBC peuvent devoir être créés de toutes pièces, et des expériences en laboratoire peuvent donc être nécessaires pour obtenir des réactions chimiquement stables pour le développement des nouvelles formules cibles. Une alternative consiste à produire les CBC en mélangeant les composites préexistants disponibles sur le marché. Cette approche constitue un problème de mélange à deux étages dont les composites existants sont mélangés pour obtenir les CBC (premier étage) et dont les CBC sont mélangés pour obtenir les engrais personnalisés (deuxième étage). Cette méthode, appelée Problème de Pooling Adapté (PPA), diffère du Problème de Pooling (PP), qui fait également référence à des problèmes de mélange multi-étages (Chang et al., 2019). Les raisons de cette différence, énoncées dans (Benhamou et al., 2019), comprennent le fait que les

spécifications chimiques des composites existants peuvent interdire l'utilisation simultanée de certains d'entre eux dans la production d'un CBC, empêchant ainsi la combinaison libre de tous les CBC dans la production d'un engrais ; les différences entre les modèles PPA et PP sont décrites dans (Benhamou et al., 2019). Compte tenu de ces contraintes chimiques, il est très probable qu'un certain nombre des composites considérés ne conviennent pas pour produire une BC capable de satisfaire tous les besoins en engrais. Nous avons donc opté pour une version étendue du RB consistant à produire un sous-ensemble des CBC en mélangeant les composites existants par PPA tout en complétant la fabrication du sous-ensemble restant par RB.

Indépendamment de la façon dont les CBC sont créés, cette approche permet une concentration massive des flux car elle peut réduire les flux à gérer de 100 % à seulement 1 % comme le montrent les résultats de notre étude de cas rapportée dans (Benhamou et al., 2019) où 700 solutions d'engrais pourraient être fournies avec pas plus de 10 CBC.

## 3 LES AVANTAGES POTENTIELS DU REVERSE BLENDING

Un producteur d'engrais qui utiliserait le RB bénéficierait d'un mode de production dans lequel très peu de CBC (produits communs) seraient produits sur son site de production avant d'être expédiés vers des unités de blending situées à proximité des consommateurs finaux, où tout engrais personnalisé pourrait être obtenu en mélangeant les CBC communs selon la nomenclature appropriée. Lorsque l'on considère l'ensemble de la SC (du fournisseur à l'agriculteur), ce mode de production est basé sur une combinaison de politiques « Production Pour Stock (PPS) », à l'usine du producteur, et « Production À la Commande (PAC) », en réponse à des commandes spécifiquement personnalisées.

Les conclusions d'analyses bibliographiques comparant la PPS, la PAC et la PPS/PAC hybride sont les suivantes. En général, la PPS est utilisée lorsque la production peut être basée sur des prévisions de la demande (Kerkkänen, 2007 ; Sharda et Akiya, 2012), ce qui conduit généralement à peu de produits standards à faible coût. Si cette approche permet de rationaliser les coûts de production, de réduire les délais de livraison aux clients, d'augmenter la capacité de production et de réduire les coûts liés aux temps de lancement, peu de systèmes productifs utilisent pleinement la PPS. Cela s'explique par le fait que pour rester compétitives, les industries doivent désormais répondre aux attentes des clients (Kerkkänen, 2007). En revanche, la PAC, qui consiste à lancer la production à la demande des clients en acceptant de livrer une assez grande variété de produits, induit des délais de livraison plus longs pour les clients et des coûts de changement de séries plus élevés (Gupta et Benjaafar, 2004). Une dernière solution consiste à combiner ces deux approches dans un système hybride PPS/PAC, impliquant une approche hiérarchique (par exemple, priorité à la PAC et

recours à la PPS pour la capacité restante (Agra et al., 2018), ou stockage de produits semi-finis dans un entrepôt intermédiaire (PPS) puis assemblage en fonction des commandes des clients (PAC) (Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Morikawa et al., 2014).

Le choix de la stratégie de production optimale est influencé par plusieurs facteurs qui dépendent des caractéristiques des produits, des processus et du marché (Van Hoek, 2011) : par exemple, industrie discrète/continue, variété de produits, expiration/contamination des produits, compétitivité du marché, structure de la SC, procédés flexibles/rigides, etc. Cependant, comme l'affirment de nombreux chercheurs (Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Soman et al., 2004 ; Jewkes et Alfa, 2009), lorsque le contexte industriel est propice, le mode de production le plus efficace est l'approche hybride PPS/PAC qui peut permettre de fournir des produits personnalisés avec un délai d'exécution des commandes des clients plus court (Jewkes et Alfa, 2009). L'idée est de développer des approches *Lean* basées sur l'efficacité, l'élimination des déchets, la réduction des coûts dans les phases amont de la SC, et de concevoir des processus agiles qui permettent de répondre rapidement aux changements de la demande en temps réel dans les phases aval (Fornasiero et al., 2015). Pour ce faire, de nombreux chercheurs considèrent la DR comme la meilleure option (Van Hoek, 2011; Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Jewkes et Alfa, 2009). La DR s'est avérée très pertinente dans la production discrète (par exemple, Hewlett Packard a fait état d'économies à deux chiffres sur les coûts logistiques en appliquant la DR (Van Hoek, 2011)). En revanche, dans l'industrie continue, elle est plus difficile à mettre en œuvre. Ceci est dû au fait que les processus de transformation chimique ne peuvent être découplés à un stade intermédiaire (Van Hoek, 2011), comme c'est le cas dans l'industrie discrète où le produit fini peut se décomposer en plusieurs sous-modules assemblés à la commande.

La difficulté consiste en fait à trouver des points communs entre différentes variétés de produits afin de pouvoir concevoir une plateforme commune à laquelle des briques spécifiques peuvent être ajoutées pour obtenir des produits personnalisables pour des segments bien spécifiques (Tyagi, 2015). En outre, dans l'industrie continue, lorsque la personnalisation affecte la composition interne d'un produit et n'est pas un simple problème d'emballage/étiquetage, il devient difficile de reporter le point de différenciation des produits aux étapes en aval de la SC, ce qui limite la flexibilité et la réactivité à la demande des clients (Benhamou et al., 2019).

Dans l'industrie des engrais, le RB est une solution qui permet de surmonter ces difficultés car : *i*) il fournit une plateforme commune solide qui peut servir une base étendue d'engrais personnalisés ; *ii*) il garantit une DR efficace et efficiente puisque la différenciation peut être effectuée à proximité des agriculteurs, plutôt que sur les sites de production, dans de petites unités de blending qui peuvent produire, à des coûts similaires (par un processus commun de mélange), tout engrais requis en utili-

sant la formule appropriée des CBC. Le RB peut ainsi devenir un levier clé pour la mise en œuvre réussie d'un système hybride PPS/PAC dans les industrie de process.

Avec une configuration basée sur le RB, au niveau de l'usine chimique, la production est pour stock et implique très peu de CBC. En plus d'exploiter la principale force de la PAC, grâce à une grande réactivité et à la prévention des pertes de ventes, la transformation organisationnelle requise par le RB offre plusieurs avantages. Elle simplifie le système de production car elle permet un flux continu sans (ou avec très peu) de changements de séries sur les lignes de production. En effet, comme les changements de séries peuvent entraîner des charges importantes dans les usines chimiques (par exemple, pertes de produits et de temps, consommation supplémentaire d'eau et d'énergie, création d'eaux usées, utilisation de produits chimiques à des fins de nettoyage, etc. (Gungor et Evans, 2017)), la réduction des temps de lancement est très importante pour répondre à la demande des clients et atteindre les objectifs de productivité (Karam, 2018; Gungor et Evans, 2017 ; Ferradás et Salonitis, 2013; Meixell, 2005). Une production en flux continu d'un nombre réduit de CBC (un/deux CBC par ligne de production) améliorerait donc considérablement la performance des lignes de production par rapport à une production en flux tiré impliquant de petites quantités d'une grande diversité de produits (par exemple, Grundermann et al. (2012) ont évalué l'impact de la transformation d'une production discontinue en production continue et ont conclu que cette transformation pourrait réduire l'utilisation de détergent et d'eau jusqu'à 95 %). La suppression des arrêts dus aux temps de lancement permettrait également d'augmenter la capacité de production et d'éviter de perdre des parts de marché au profit des concurrents.

Par ailleurs, il est admis que la production pour stock entraîne des coûts de stockage élevés et comporte des risques que les commandes prévues ne se concrétisent pas (Agra et al., 2018 ; Karasu et al., 2014). RB élimine presque ces risques puisque les quelques CBC à stocker sont censés correspondre à une plateforme commune universelle pour tout engrais sur mesure, ce qui va assurer une forte demande pour ces CBC.

Le RB simplifierait également la gestion des hangars de stockage (un ou deux CBC par hangar), éliminant ainsi les problèmes de stockage découlant d'une diversité accrue (espace vacant en raison de petits lots de production, engrais contaminés en raison d'une mauvaise séparation des différents produits, arrêt de la production en raison de la saturation des stocks, etc.)

Au niveau des expéditions, la standardisation liée au RB simplifierait les opérations d'acheminement en facilitant la séparation des flux (puisque les mêmes CBC sont utilisés pour tous les clients), réduirait les coûts liés au processus de nettoyage des convoyeurs, ainsi que les coûts de livraison et tous les problèmes liés au chargement des engrais sur les navires, pour n'en citer que quelques-uns.

D'un point de vue commercial, le RB garantirait une grande flexibilité et une grande réactivité à la demande

de chaque client car la différenciation serait effectuée : *i*) à proximité des agriculteurs et *ii*) par un simple processus de mélange dans des unités de blending probablement déjà existantes. Il convient de noter que le blending reporté est en effet déjà utilisé, mais avec des résultats peu satisfaisants : il se limite au mélange de quelques engrais existants qui ne répondent pas vraiment à la totalité des besoins en éléments nutritifs. En bref, le RB améliorerait considérablement la satisfaction des clients et augmenterait la base de clientèle, d'autant plus que cette personnalisation serait plus rentable que la personnalisation basée sur la PAC. En plus de ces avantages économiques, la RB préserverait la fertilité des sols à long terme, garantissant ainsi une agriculture durable et la sécurité alimentaire mondiale.

## 4 ÉTUDE DE CAS

### 4.1 Description

Le groupe OCP, l'un des leaders mondiaux dans le secteur des engrais, cherche à accroître sa part du marché mondial des engrais et à conquérir de nouveaux clients en leur offrant des solutions d'engrais personnalisées. Accroître la diversité de son portefeuille de produits est une stratégie que le groupe OCP poursuit depuis de nombreuses années. En effet, depuis 2000, le groupe OCP a décuplé la variété de ses engrais et vend aujourd'hui environ 50 engrais. La figure 1 souligne l'évolution du nombre des engrais produits par OCP depuis 2000.

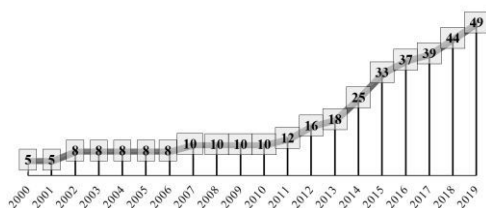


Figure 1: Évolution du nombre d'engrais OCP depuis 2000.

Cette diversité croissante améliore l'agilité et la flexibilité, et conforte le leadership du groupe. Cependant, dans une approche dominée par la PAC, plus la diversité est grande, plus il est difficile de gérer la production, le stockage et la distribution. L'objectif de notre étude de cas est alors de montrer que les problèmes liés à la diversité produite par OCP pourraient être résolus par le RB à travers le passage d'une PAC à une PPS. À cette fin, nous partons du programme de production journalière de l'OCP en 2019 et cherchons la composition optimale des CBC qui satisferaient ce programme de production.

En 2019, le carnet de commandes d'OCP comprenait 28 engrais dont la production globale sur 7 lignes de production est fournie dans le fichier Annual\_Production.xlsx inclus dans le lien Mendeley (<http://dx.doi.org/10.17632/zfp6nzy87w.1>) utilisé pour stocker nos grandes tables afin de conserver le texte dans le format prescrit. Nous avons d'abord appliqué le mo-

dèle RB à cet ensemble de données annuelles avant d'analyser ses résultats sur un maillage mensuel. La production mensuelle de l'OCP est indiquée dans le fichier Monthly\_Production.xlsx.

### 4.2 Résultats

L'application du RB aux 28 engrais différents a révélé qu'ils peuvent tous être produits en utilisant seulement 8 CBC. Il convient de souligner que les résultats qui suivent visent à montrer la réduction de la complexité de la production et du stockage en répondant à la demande avec seulement une dizaine de CBC, sachant qu'avec une dizaine de CBC, il est possible de répondre à la demande de plusieurs centaines d'engrais.

Le tableau 1 décrit la composition chimique de chaque CBC en termes de N, P, K, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zn et de *filler* (un composant neutre ajouté à des fins de stabilisation chimique n'ayant aucun impact sur la structure nutritionnelle).

	Composites de la Base Canonique (CBC)								filler
	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	
%N	46,00%	11,86%	12,70%	19,00%	0%	2,34%	2,14%	0%	0%
%P	0%	56,08%	16,11%	38,00%	0%	56,00%	56,00%	51,24%	0%
%K	0%	0%	16,11%	0%	63,60%	0%	0%	0%	0%
%S	0%	0%	0%	7,00%	25,27%	11,78%	7,06%	19,67%	0%
%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0%	0%	0%	0%	6,13%	3,15%	0%	0%	0%
%Zn	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7,79%	0%
filler	54,00%	32,06%	55,07%	36,00%	5,00%	26,72%	34,81%	21,30%	100%

Tableau 1: Composition optimale des CBC

En plus d'identifier les CBC, RB indique les quantités de chaque CBC nécessaires pour produire le volume exact requis pour chaque engrais et pour satisfaire leur composition chimique précise (voir les détails de cette solution dans le fichier RB\_Annual\_Results.xlsx). Il convient de rappeler que le *filler* doit être utilisé en combinaison avec les CBC pour obtenir les quantités souhaitées.

#### 4.2.1 Résultats annuels

Une étude plus approfondie des résultats montre que le volume de production annuel du groupe OCP, soit 4 440 150 tonnes, comprenant 28 engrais (voir les parts correspondantes en % dans la partie gauche de la figure 2) peut être entièrement obtenu en produisant seulement 4 290 687 tonnes réparties sur 8 CBC (voir la part en % de chaque CBC dans la partie droite de la figure 2) dont les quatre premiers représentent plus de 96 % de la production totale.

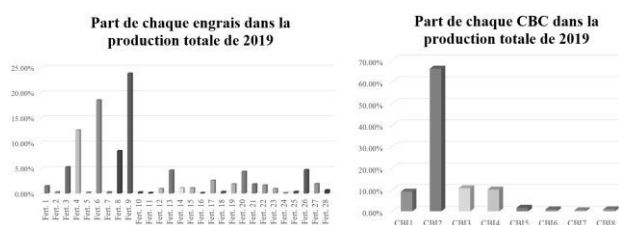


Figure 2 : Production actuelle de l'OCP vs. Production basée sur le RB.

La massification des flux ci-dessus aurait été encore plus importante si nous nous étions face à une variété plus grande que 28 engrais. Dans (Benhamou et al., 2019), le RB répondait aux exigences de plus de 480 formules NPK avec un maximum de dix CBC. Nous croyons cependant qu'avec l'accent mis aujourd'hui sur l'agriculture de précision, en particulier en Afrique, l'OCP devra accroître considérablement la diversité de son portefeuille au cours des prochaines années et la contribution du RB sera à ce moment-là plus révélatrice.

#### 4.2.2 Résultats mensuels

L'intérêt du RB est encore plus évident sur la base des résultats mensuels. En effet, en adoptant le système productif actuel (voir la figure 3), nous observons que la diversité des produits et les volumes de production varient d'un mois à l'autre et que les volumes correspondent à de petits lots (le système de production étant alimenté par des commandes réelles (PAC)).

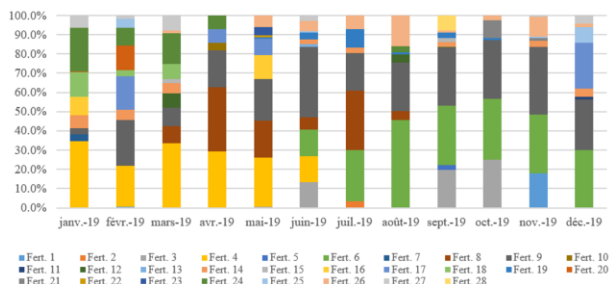


Figure 3: Part des engrais dans la production mensuelle globale de l'OCP

Les différentes couleurs (pour chaque référence d'engrais différente) dans chaque bâton (production mensuelle globale) illustrent la diversité et fournissent une indication quant au nombre de changements de séries qui ont dû être effectués sur les lignes de production en 2019. Compte tenu du calendrier de production quotidienne, le nombre total de changements de séries pour les 7 lignes de production s'élevait à 175. Comme le temps de lancement dépend de la nature du couple « référence précédente/référence suivante » et même en considérant le plus petit temps de lancement qui est d'environ deux heures, la production a dû être arrêtée pendant au moins 350 heures (175\*2). L'OCP a deux types de lignes de production (lignes 107 et 07 avec des taux de production de 108,3 tonnes/heure et 80,82 tonnes/heure, respectivement). En termes de capacité de

production, sur les lignes 107, où l'arrêt de la production s'est élevé à 200 heures, la capacité de production perdue a atteint 21 660 tonnes (108,3\*200) et sur les lignes 07, où la production a été arrêtée pendant au moins 150 heures, la capacité de production perdue était de 12 123 tonnes (80,82\*150 tonnes). En outre, OCP connaît une gestion ardue des stocks dans ses 9 hangars de stockage, en raison, entre autres, de son système de production qui est basé sur le lancement irrégulier de petits lots.

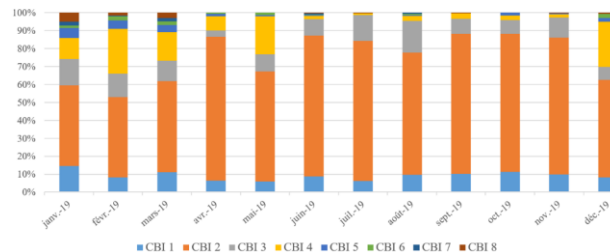


Figure 4: Part des CBC dans la production mensuelle globale de l'OCP

Par ailleurs, puisque nous examinons l'impact du RB sur le système productif de l'usine chimique, la préoccupation du producteur est le volume des CBC à produire dans son site de production et non la manière dont ceux-ci seront utilisés plus loin dans la chaîne logistique au niveau des unités de blending.

Cela dit, la figure 4 montre comment la production aurait été obtenue mois par mois si les CBC auraient été utilisées. Une comparaison des figures 3 et 4 montre comment cette transformation simplifie considérablement la gestion de la production puisque les 4 premiers CBC, en particulier le deuxième, représentent plus de 90 % de la production mensuelle.

La massification des flux présentée ci-dessus montre l'opportunité de concevoir un nouveau système de production basé sur une PPS. En utilisant sept lignes de production, dont trois ont un débit annuel d'environ 897 000 tonnes et quatre un débit annuel d'environ 669 000 tonnes, la gestion de la production de 8 CBC est relativement simple. En effet, compte tenu des parts respectives des CBC (cf. figure 2) et des débits de ces lignes de production, nous recommandons d'affecter les CBC à des lignes de production dédiées afin d'assurer une production continue dans toute la mesure du possible (un CBC par ligne de production) et de profiter ainsi d'une production rationalisée et économique. En effet, étant donné que CBC 2 représente plus de 66 % du volume de production annuel, on peut lui dédier trois lignes de production complètes. Pour les CBC 1, 3 et 4, représentant chacun environ 10 %, nous proposons de consacrer une ligne de production à chacun d'eux. Enfin, le reste des CBC représentant moins de 4 % de la production totale, nous recommandons de leur affecter une seule ligne de production.

En produisant en flux continu, les lignes mono-produits élimineraient les arrêts dus aux temps de lancement, augmentant ainsi la capacité de production. Quant à la seule ligne multi-produits restante, elle pourrait conser-

ver une logique de production au point de commande (la production démarre lorsqu'un niveau de stock donné est atteint) pour produire CBC 5 qui représente près de 2 % de la production annuelle. Concernant les CBC 6, 7 et 8 (représentant chacun moins de 1 % de la production annuelle), la production pourrait être déclenchée lorsque le stock descend en dessous du stock de sécurité et arrêtée lorsque la capacité de stockage est pleinement utilisée.

Le portefeuille de produits actuel de l'OCP couvre un ensemble limité d'engrais avec 5 références représentant plus de 60 % des ventes. Dans ce contexte, la contribution du RB paraît peu cruciale. Néanmoins, notre objectif n'est pas de remplacer la production des 28 engrais par celle des 8 CBC, mais plutôt de démontrer l'impact sur la production et le stockage d'une BC permettant de fabriquer à la demande des centaines de formules d'engrais. L'argument en faveur de notre solution devient très convaincant si OCP poursuit sa stratégie de conquête des marchés émergents en leur proposant des engrais personnalisés, car il devra alors augmenter considérablement la diversité de ses produits (à hauteur d'une centaine d'engrais) : dans ces conditions, la contribution de RB devient évidente.

## 5 CONCLUSION

À travers la différenciation retardée (un hybride PPS/PAC), le Reverse Blending — une technique qui peut être utilisée dans les industries opérant dans des contextes de mélange — offre les avantages à la fois d'une PPS (c'est-à-dire faciliter la gestion de la production, du stockage et de la distribution, augmenter la capacité de production et réduire les délais de livraison aux clients) et d'une PAC (c'est-à-dire offrir des produits personnalisés et conserver un avantage concurrentiel), tout en supprimant leurs principaux inconvénients respectifs : les coûts élevés de stockage et les longs délais de livraison.

Notre étude de cas montre que des économies importantes peuvent être réalisées au niveau du système de production, l'impact au niveau des stocks et des expéditions reste encore à étudier. Enfin, il convient de rappeler que cette approche peut nécessiter un redesign des processus de production et de distribution, car les industries qui cherchent à implémenter le RB pourraient devoir modifier leurs points de découplage. Ainsi, alors que plusieurs avantages potentiels du RB sont explorés dans cet article, la prochaine étape de cette recherche devrait consister à examiner les défis auxquels seraient confrontés les producteurs souhaitant mettre en œuvre le RB.

## REFERENCES

Incrocci, L., D. Massa, and A. Pardossi, New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. *Horticulturae*, 2017. 3(2): p. 37.

Salvador, F., C. Forza, and M. Rungtusanatham, Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic

prescriptions. *Journal of operations management*, 2002. 20(5): p. 549-575.

Da Cunha Reis, A., L.F. Scavarda, and B.M. Pancieri, Product variety management: A synthesis of existing research. *African Journal of Business Management*, 2013. 7(1): p. 39.

Johnson, M.D. and R.E. Kirchain, Quantifying the effects of product family decisions on material selection: A process-based costing approach. *International Journal of Production Economics*, 2009. 120(2): p. 653-668.

Boone, C.A., C.W. Craighead, and J.B. Hanna, Postponement: an evolving supply chain concept. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2007.

Van Hoek, R.I., The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. *Journal of operations management*, 2001. 19(2): p. 161-184.

Kerkkänen, A., Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill. *International Journal of Production Economics*, 2007. 108(1-2): p. 111-118.

Benhamou, L., Giard, V., Khouloud, M., Fenies, P., & Fontane, F. (2019). Reverse Blending: An economically efficient approach to the challenge of fertilizer mass customization. *International Journal of Production Economics*, 107603.

Karam, A.-A., Liviu, M., Cristina, V., & Radu, H. (2018). The contribution of lean manufacturing tools to changeover time decrease in the pharmaceutical industry. A SMED project. *Procedia Manufacturing*, 22, 886-892.

Chang, J. C., Graves, S. C., Kirchain, R. E., & Olivetti, E. A. (2019). Integrated planning for design and production in two-stage recycling operations. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 535-547.

Sharda, B. and N. Akiya, Selecting make-to-stock and postponement policies for different products in a chemical plant: A case study using discrete event simulation. *International Journal of Production Economics*, 2012. 136(1): p. 161-171.

Gupta, D. and S. Benjaafar, Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation? A common framework for modeling and analysis. *IIE transactions*, 2004. 36(6): p. 529-546.

Agra, A., M. Poss, and M. Santos, Optimizing make-to-stock policies through a robust lot-sizing model. *International Journal of Production Economics*, 2018. 200: p. 302-310.

Morikawa, K., K. Takahashi, and D. Hirotani, Make-to-stock policies for a multistage serial system under a make-to-order production environment. *International Journal of Production Economics*, 2014. 147: p. 30-37.

Soman, C.A., D.P. Van Donk, and G. Gaalman, Combined make-to-order and make-to-stock in a

- food production system. *International Journal of Production Economics*, 2004. 90(2): p. 223-235.
- Jewkes, E.M. and A.S. Alfa, A queueing model of delayed product differentiation. *European Journal of Operational Research*, 2009. 199(3): p. 734-743.
- Fornasiero, R., L. Macchion, and A. Vinelli, Supply chain configuration towards customization: a comparison between small and large series production. *IFAC-PapersOnLine*, 2015. 48(3): p. 1428-1433.
- Tyagi, S., Optimization of a platform configuration with generational changes. *International Journal of Production Economics*, 2015. 169: p. 299-309.
- Gungor, Z.E. and S. Evans, Understanding the hidden cost and identifying the root causes of changeover impacts. *Journal of Cleaner Production*, 2017. 167: p. 1138-1147.
- Ferradás, P.G. and K. Salonitis, Improving changeover time: a tailored SMED approach for welding cells. *Procedia CIRP*, 2013. 7: p. 598-603.
- Meixell, M.J., The impact of setup costs, commonality, and capacity on schedule stability: An exploratory study. *International Journal of Production Economics*, 2005. 95(1): p. 95-107.
- Grundemann, L., Gonschorowski, V., Fischer, N., & Scholl, S. (2012). Cleaning waste minimization for multiproduct plants: Transferring macro batch to micro conti manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 24, 92 101.
- Karasu, M. K., Cakmakci, M., Cakiroglu, M. B., Ayva, E., & Demirel-Ortabas, N. (2014). Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production. *Measurement*, 47, 741 748.