

Optimisation du plan de fertilisation de blé en zone saharienne

Tatah A., Rachedi K. et Aïssani D.

lamos_bejaia@hotmail.com

Résumé Dans l'optique de renforcer la production céréalière nationale, le potentiel du Sahara algérien n'est plus à négliger. Un vaste programme de mise en valeur des terres sahariennes pour l'intensification céréalière est lancé. Cependant, ces terres sont généralement pauvres en éléments nutritifs. La maîtrise de la fertilisation minérale est le moyen le plus efficace pour l'obtention de rendements acceptables, certaines régions du Sud atteignent les 80 quintaux /ha.

Grâce aux tests d'analyse de la variance, à l'implémentation d'une métaheuristique et sur la base de données expérimentales et de catalogues d'engrais de trois entreprises, nous répondons aux préoccupations des décideurs quant au choix du plan de fertilisation à adopter. Que choisir entre deux engrais phosphatés différents et quelle dose utiliser relativement aux rendements qu'ils offrent et au coût global de fertilisation.

Mots clés : Principes d'expérimentation, Analyse de la variance (ANOVA), Optimisation Combinatoire, Métaheuristique, GRASP.

Abstract In order to reinforce the national grain production, the potential of the Algerian Sahara, should not be overlooked. An extensive program of development of land for Saharan cereals' intensification is launched. However, these lands are generally poor in nutrients. Control of mineral fertilization is the most effective way to obtain acceptable yields. Thus in some areas the yields are 80 quintals/ha.

Through tests of analysis of variance, the implementation of a metaheuristic and on the basis of experimental data and fertilizers' catalogs of three companies, we respond to the concerns of policy makers on the choice of fertilization plan to adopt. What to choose between two different phosphate fertilizers and which dose use relatively to yields they offer and the overall cost of fertilization.

Key words : Principles of experimentation, Analysis of variance (ANOVA), Combinatorial Optimization, Metaheuristics, GRASP.

Introduction

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en voie de développement, particulièrement dans les pays maghrébins. La consommation céréalière annuelle en Algérie dépasse les 8 millions de tonnes, mais seuls 70% de ces besoins sont produits sur le territoire national. Pour combler ce manque, l'Algérie est contrainte à l'importation, elle figure parmi les cinq premiers importateurs de blé à l'échelle mondiale.

En 2011, les importations de blé dur et tendre se sont établies à 5,7 millions de tonnes, dont 4,4 millions de tonnes pour le blé tendre, détaille un document du Centre National de l'Informatique et des Statistiques des Douanes (CNIS). En outre, les rendements moyens de blé en Algérie, ne dépassent pas les 18 quintaux/ha, ce qui est faible relativement à nos voisins, tels que l'Egypte dont les rendements annuels moyens dépassent les 60 quintaux/ha. De ce fait, beaucoup reste à faire en termes de céréaliculture dans notre pays. Une solution pour remédier

à cette situation de déficit, est de ne plus négliger le potentiel des terres sahariennes. En effet, les régions sahariennes représentent 80% du territoire algérien, certaines de ces terres conviennent à l'agriculture, notamment dans la ville d'El Goléa (wilaya de Ghardaïa), où des domaines agricoles ont enregistré des pics de rendements de blé dur dépassant les 80 quintaux/ha. L'intensification céréalière au Sud algérien est donc possible.

Cependant, les terres du Sud algérien sont généralement pauvres en éléments nutritifs. La maîtrise de l'irrigation et de la fertilisation minérale reste à l'heure actuelle le moyen le plus efficace pour l'obtention de rendements acceptables. Dès lors, il est impératif de raisonner convenablement les apports d'engrais minéraux pour améliorer les rendements et les processus physiologiques de la culture [12]. La question de fertilisation des terres du Sud est donc cruciale. L'agriculteur se pose alors la question : "Quel fertilisant utiliser et à quelles quantités ?"

Dans l'optique de répondre aux préoccupations des décideurs, à savoir l'accroissement des rendements et la minimisation des coûts de fertilisation, nous utilisons des outils statistiques et d'optimisation combinatoire et ce, relativement à des données issues d'une expérimentation en irrigation sous pivot menée au titre de la saison agricole 2007-2008 à El Goléa et aux catalogues 2012 de trois entreprises de fertilisants sur le marché algérien.

5.1 Développement de la fertilisation et politique agricole en Algérie

En Agronomie, l'établissement d'un plan de fertilisation : fertilisation azotée, phosphatée ou potassique, se fonde sur quatre critères principaux :

- L'exigence de l'espèce et de la variété cultivée ;
- L'analyse du sol ;
- Le passé récent de fertilisation ;
- Le précédent culturel : la restitution ou non des résidus de cultures du précédent.

Durant de nombreuses années, la fertilisation est restée archaïque en Algérie. Peu de produits étaient utilisés. Peu d'analyses des sols étaient faites. Les rares exceptions ont été les exploitations d'agriculteurs leaders dans le nord et dans la région d'Ain Oussera, là où les agriculteurs étaient confrontés à de nombreux problèmes de nutrition, générant de nombreuses carences.

Le peu de produits disponibles, sur un marché monopolisé pendant de nombreuses années par une société nationale, ne correspondaient pas aux besoins des sols et des cultures. Les formes d'éléments (l'azote et le phosphore, par exemple), étaient soit facilement lessivables, soit indisponibles car non assimilables par des sols qui ont des particularités spécifiques en Algérie (calcaire, salinité, ...).

La culture des céréales est longtemps restée le parent pauvre de la fertilisation. Les engrais qui étaient proposés étaient principalement du N-P-K équilibrés en concentrations. L'équilibre de ces formules ne correspond pas aux besoins des cultures. Les éléments qui composent ces engrais (Phosphate peu soluble et Azote nitrique) ne sont pas adaptés aux besoins des sols et climats algériens. Certains produits, aggravent lourdement la salinité [23, 24].

La politique du renouveau de l'économie agricole vise l'intensification des productions céréalières pour l'amélioration de la sécurité alimentaire et la réduction des importations. Cette politique encourage l'utilisation de fertilisants, de semences de qualité et l'introduction de technologies d'irrigation d'appoint. Elle inclut des mesures d'accompagnement pour soutenir au mieux l'agriculteur. Dans un souci de renforcer la production céréalière nationale, le gouvernement encourage l'expansion de l'agriculture vers les terres du Sud.

5.2 Position du problème et démarche

Face à une concurrence rude, les firmes font des efforts de recherche pour proposer des catalogues riches en formules d'engrais, toutes diversifiées en composition en éléments fertilisants. Ces formules, aussi nombreuses soient elles, ne peuvent pas toujours correspondre simplement et parfaitement aux besoins de fertilisation de l'agriculteur. Une combinaison entre les produits des différentes firmes peut s'avérer nécessaire.

Néanmoins, le choix de tel ou tel produit en fonction de sa composition peut s'avérer être une tâche complexe en raison de la présence d'un large choix de produits. Compte tenu du prix relativement important des engrais, un choix mal fondé pèsera lourd sur le budget de l'entreprise agricole.

La question de la fertilisation est cruciale, particulièrement pour l'agriculteur du Sud, puisque les terres sahariennes sont pauvres en éléments nutritifs, les engrais sont apportés en grande quantité c'est pourquoi nous nous proposons de fournir une réponse à la question du choix optimal du plan de fertilisation à faire au vu des catalogues de trois entreprises leaders du marché, sachant la composition de chaque produit et son coût et ce, afin de répondre aux besoins annuels des agriculteurs en engrais solides de façon à minimiser son coût d'acquisition.

Au vu de cette problématique, la première étape de notre travail portera sur une étude statistique relative aux données issues d'une expérimentation menée au niveau d'une exploitation à El Goléa au cours de la saison agricole 2007-2008, qui va nous permettre d'apporter une réponse quant à l'effet sur le rendement de blé dur, en utilisant deux marques d'engrais phosphatés distinctes, utilisées à différentes doses. Si l'analyse établit l'existence de l'effet d'un facteur sur le rendement, nous tâcherons de dégager quelles sont les modalités des facteurs offrant un rendement maximal et ce à l'aide de tests statistiques.

La seconde étape sera d'essayer de déterminer la combinaison optimale d'engrais solides à acquérir auprès des trois entreprises, de façon à répondre aux exigences de l'agriculteur et ce grâce à l'implémentation d'une métaheuristique. Enfin, nous tâcherons de lier les deux parties d'application : partie statistique et optimisation combinatoire, en estimant les coûts de fertilisation de l'expérimentation. Nous tâcherons ainsi de répondre aux décideurs quant au choix à faire entre les deux produits testées et les doses appropriées de phosphore, relativement au rendement qu'ils offrent et à leur coût d'acquisition.

5.3 Matériel et méthodes

5.3.1 Outils statistiques

5.3.1.1. Dispositif d'essai expérimental

Dans le domaine agronomique, le choix d'un dispositif expérimental dépend des objectifs de l'essai, de son application pratique, des conditions environnementales, des méthodes d'application, des cultures et des traitements. Il faut bien analyser tous ces facteurs avant de choisir le dispositif adéquat qui répondra aux objectifs de l'expérimentation pour démontrer l'efficacité d'un produit.

On utilise habituellement un dispositif en blocs aléatoires complets ou un dispositif en parcelles subdivisées, dans lequel les parcelles traitées sont réparties au hasard dans chaque bloc [2].

5.3.1.2. L'analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance est, à quelques exceptions près, la méthode statistique la plus appropriée pour déterminer s'il existe une différence statistique entre les ensembles de données agronomiques [2].

Ce test s'applique lorsqu'on mesure une ou plusieurs variables explicatives appelées facteurs de variabilité, qui ont une influence sur la distribution d'une variable continue à expliquer.

En ANOVA, plusieurs modélisations existent suivant le nombre de facteurs et leurs effets, le modèle décrit ci-dessous servira de support à notre étude.

$$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{i,j} + \epsilon_{i,j,k} \quad (5.1)$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, k = 1 \dots, K$$

Où $Y_{i,j,k}$ est la valeur prise par la réponse Y dans la condition (A_i, B_j) lors de la $k^{\text{ème}}$ répétition.

Avec les contraintes :

$$\sum_{i=1}^I \alpha_i = 0, \sum_{j=1}^J \beta_j = 0, \sum_{i=1}^I (\alpha\beta)_{i,j} = 0 \forall j = 1, \dots, J, \sum_{j=1}^J (\alpha\beta)_{i,j} = 0 \forall i = 1, \dots, I$$

Nous postulons les hypothèses classiques suivantes pour les erreurs :

$$\forall (i, j, k), i = 1 \dots I, j = 1 \dots J, k = 1 \dots K, \epsilon_{i,j,k} \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

$$Cov(\epsilon_{i,j,k}, \epsilon_{l,m,n}) = 0 \text{ si } (i, j, k) \neq (l, m, n) \text{ avec } 1 \leq i, l \leq I, 1 \leq j, m \leq J, 1 \leq k, n \leq K$$

La forme générale de l'analyse de variance repose sur le test de Fisher et donc sur la normalité des distributions, l'homoscédasticité et l'indépendance des échantillons.

Nous souhaitons faire des tests d'hypothèse, pour montrer l'existence de l'effet d'un facteur sur la variable réponse. Ces tests se basent sur les statistiques $f_{FACTEUR}$ qui sont la réalisation d'une variable aléatoire qui suit une loi de Fisher. Lorsqu'on détermine si un facteur a un effet significatif sur la réponse, nous pouvons procéder à des comparaisons multiples des différents effets des niveaux du facteur, tels que le test de Student-Newman-Keuls [3, 4, 5, 9].

5.3.2 Optimisation combinatoire

5.3.2.1. Formulation d'un problème d'optimisation combinatoire

Un problème d'optimisation combinatoire est défini [27] par un ensemble fini $E = \{1, \dots, n\}$, un ensemble de solutions réalisables $X \subseteq 2^E$ et une fonction objectif $f : 2^E \rightarrow \mathbb{R}$.

Dans le cas d'une "minimisation", nous cherchons une solution optimale $x^* \in X$ telle que $f(x^*) \leq f(x), \forall x \in X$.

Cas particulier : PLNE

Un programme linéaire en nombres entiers, usuellement noté PLNE, sous forme standard s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= c^t x \\ \text{sc : } Ax &\leq b \\ x &\in \mathbb{N}^n \end{aligned}$$

Où : c, b et x sont des vecteurs de taille n ,
 A est une matrice d'ordre (m, n) .

5.3.2.2. Méthodes de résolution d'un problème d'optimisation combinatoire

Etant donnée l'importance des problèmes d'optimisation combinatoire, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle. Ces méthodes peuvent être classées sommairement en deux grandes catégories : les méthodes exactes (complètes) qui garantissent la complétude de la résolution telles que les techniques de séparation et évaluation progressive (SEP ou Branch and Bound) et les méthodes approchées (incomplètes) qui perdent la complétude pour gagner en efficacité, on peut citer les méthodes gloutonnes et l'amélioration itérative [10, 14].

5.3.2.3. Métaheuristiques

Depuis une dizaine d'années, des progrès importants ont été réalisés avec l'apparition d'une nouvelle génération de méthodes approchées puissantes et générales, souvent appelées métaheuristiques [1, 24].

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global de la fonction objectif, sans être piégé par les optima locaux.

Méthode GRASP

Développée par Feo et Resende 1989 [10] (Resende and Ribeiro 2001 [26], Pitsouli and Resende 2002 [22]), la méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) est une métaheuristique adaptée aux problèmes dont les solutions se construisent pas à pas. Son algorithme contient deux phases :

- une phase de construction d'une solution,
- une phase d'amélioration de la solution.

La phase de construction est basée sur une procédure gloutonne aléatoire. Quant à la phase d'amélioration, elle est faite grâce à une procédure de recherche locale. Pour plus de précisions, se référer à l'article de NETO T. et PEDROSO J.P. [20].

5.4 Résultats et discussion

5.4.1 Analyse statistique des données

Il s'agit d'une expérimentation en blocs aléatoires complets qui a pour objectif de déterminer la dose et la marque d'engrais phosphaté qui maximiseraient le rendement.

Les trois blocs sont partagés en six parcelles chacun, où chaque parcelle a été fertilisée par une combinaison de dose d'engrais associé à une marque. Nous disposons donc de trois répétitions (3 blocs), soient trois observations par combinaison des deux facteurs.

Nous disposons des données suivantes :

- **La dose de phosphore utilisée** : 3 doses : D1 : 30 unités, D2 : 60 unités et D3 : 90 unités.
La dose est un facteur à effet fixe : c'est une variable contrôlée
- **La marque de l'engrais phosphaté utilisée** : deux marques différentes PHOSFERT et FOSFACTYL. **La marque est un facteur à effet fixe : c'est une variable contrôlée**
- **Le rendement** : la variable rendement est considérée comme quantitative, c'est la réponse, la variable à expliquer.

Le modèle d'analyse de la variance qui pourrait donc, répondre à la question de l'influence des facteurs contrôlés DOSE et MARQUE sur la variable réponse RENDEMENT, serait celui décrit par l'équation (5.1) :

$$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{i,j} + \epsilon_{i,j,k} / i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, k = 1 \dots, K$$

5.4.1.1. Analyse graphique de l'interaction des deux facteurs

Une analyse graphique de l'effet de l'interaction des facteurs DOSE et MARQUE sur la variable RENDEMENT est faite en traçant le graphe d'interaction entre les valeurs du rendement et chacun des facteurs du modèle.

Le graphe obtenu est présenté ci-dessous.

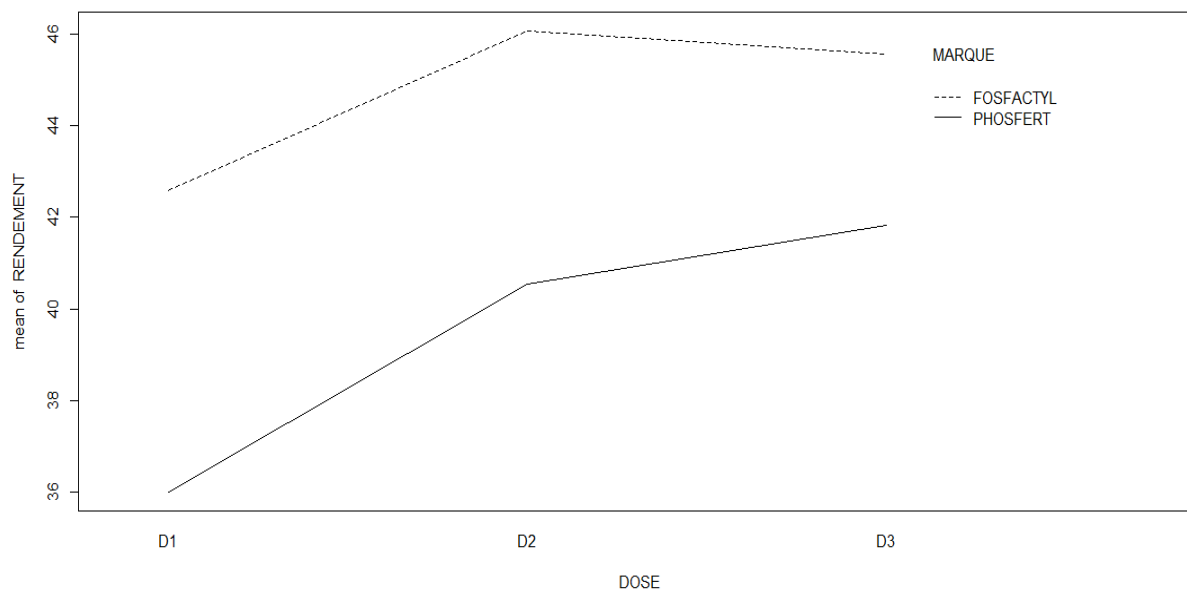


FIGURE 5.1: Graphe d'interaction des facteurs MARQUE et DOSE.

Nous constatons que les deux courbes restent parallèles, il n'y a donc pas d'effet d'interaction entre les deux facteurs. Celui-ci peut donc être négligé dans le modèle d'ANOVA à deux facteurs.

Le modèle d'ANOVA qui correspond à nos données serait un modèle additif de la forme :

$$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{i,j,k}$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, k = 1 \dots, K$$

A l'aide du logiciel statistique R, nous effectuons des tests statistiques qui nous permettent de valider cette affirmation.

5.4.1.2. Conclusions partielles

Les conditions d'application de l'ANOVA étant vérifiées, grâce à l'analyse statistique des données, nous pouvons apporter les conclusions suivantes à l'expérimentateur :

- Le rendement observé ne varie pas significativement en fonction des doses (D1, D2, D3) de phosphore utilisées lors de l'expérimentation. Le test de Kruskal-Wallis confirme ce résultat.
Cependant, nous constatons que les rendements les plus élevés pour le produit FOSFACTYL sont ceux des parcelles ayant reçu 60 unités de phosphore (dose D2), avec des rendements de 35,88 quintaux/ha, 42,57 quintaux/ha, 49,27 quintaux/ha pour cette même dose, soit une moyenne de 46,07 quintaux/ha. Pour le produit PHOSFERT, les rendements les plus élevés sont ceux de la dose D3, avec pour chaque bloc 46,3 quintaux/ha, 36,54 quintaux/ha, 42,62 quintaux/ha et une moyenne de 41,82 quintaux/ha, ce qui se confirme sur le graphe d'interaction précédent.
- Le rendement observé varie significativement en fonction des marques de fertilisant utilisées lors de l'expérimentation. Le produit FOSFACTYL se place devant PHOSFERT offrant un rendement moyen de 44,74 quintaux/ha, contre 39,46 quintaux/ha. Le test post-hoc de comparaison multiple de Newman et Keuls confirme ce résultat.

Notre étude tient compte de deux critères pour la prise de décision, le critère maximisation du rendement et le critère minimisation des coûts ou bien maximisation des profits. La partie statistique de ce travail a déterminé les combinaisons offrant les plus hauts rendements pour chacun des produits testés. Grâce à la seconde partie de notre étude, nous tâcherons de répondre à la question du choix optimal offrant un haut rendement et maximisant les profits.

5.4.2 Etude des coûts de fertilisation

5.4.2.1. Modélisation du problème de coûts

Considérons de manière générale I fournisseurs sur le marché, qui offrent chacun un nombre J_i d'engrais solides, $i \in \{1, \dots, I\}$.

A chaque produit P_{ij} est associé un coût d'acquisition c_{ij} , $i \in \{1, \dots, I\}$, $j \in \{1, \dots, J_i\}$.

Dans un produit P_{ij} destiné à la fertilisation d'un hectare de terre, la concentration (exprimée en pourcentage) d'un élément fertilisant $k \in E = \{\text{Azote, Phosphate, Potassium, Soufreg}\}$ est a_{ij}^k , $i \in \{1, \dots, I\}$, $j \in \{1, \dots, J_i\}$.

$\mathbf{Q} = (q_k)$, $k \in E$, est le vecteur des quantités de chacun des k éléments fertilisants dont le sol a besoin. Les quantités sont fixées par l'agriculteur et calculées relativement à la surface que couvre le pivot en question.

Cette étude de coût tient uniquement compte des engrais solides, car moins cher et plus largement utilisés par les agriculteurs. Ils sont conditionnés dans des sacs de 50 kg, nous cherchons le nombre de sacs x_{ij} à prendre d'un produit P_{ij} de façon à atteindre les quantités données par le vecteur \mathbf{Q} et ce avec un coût minimum. Le problème s'écrit alors sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers :

$$\text{Min } \{cx : Ax \geq \mathbf{Q}, x \in \mathbb{N}^n\} \quad (5.2)$$

Avec

$x = (x_{ij})$, $\forall j \in \{1, \dots, J_i\}$, $\forall i \in \{1, \dots, I\}$ vecteur solution de taille n , où les composantes correspondent aux nombres de sacs à prendre de chaque entreprise pour chaque produit,

$$n = \sum_I^{i=1} J_i.$$

$c = (c_{ij})$, $\forall j \in \{1, \dots, J_i\}$, $\forall i \in \{1, \dots, I\}$ vecteur de coûts,

$A = (a_{ij}^k)$, $\forall j \in \{1, \dots, J_i\}$, $\forall i \in \{1, \dots, I\}$, $\forall k \in E$, matrice des concentrations.

5.4.2.2. Estimation des coûts par la métaheuristique GRASP

Afin de résoudre le problème, nous avons opté pour la méthode GRAPS appliquée aux problèmes de programmation linéaire en nombres entiers. Notre choix s'est orienté vers la méthode en raison de son efficacité démontrée sur plusieurs problèmes de programmation combinatoire. Nous avons donc implémenté l'algorithme, avec à la phase de construction, les deux méthodes décrites dans l'article de NETO et PEDROSO [20].

A l'aide de l'outil de programmation Matlab, nous récupérons les données puis appliquons la méthode GRASP au problème de minimisation des coûts de fertilisation posé. Une application nous renvoie le nombre de sac à prendre, d'un produit et d'une entreprise donnés.

Les agriculteurs expriment généralement leurs besoins en engrais pour un hectare de terre à fertiliser. Dans un algorithme itératif comme celui de GRASP, traiter le problème avec une formule de fertilisation destinée à un hectare de terre et multiplier la solution trouvée par la surface que couvre un pivot (surface du pivot variable allant jusqu'à 40 hectares) peut s'avérer inefficace. En effet, pour que l'algorithme gagne en efficacité, il serait meilleur de fournir un vecteur de quantités (\bar{Q}) représentant les besoins en éléments nutritifs pour la totalité de la surface à fertiliser. Nous tenons à vérifier ce fait et ce, en considérant deux cas de figures lors de l'implémentation :

- (a) cas de fertilisation d'un hectare de terre, avec le vecteur quantités que nous cherchons à satisfaire $Q = (N, P, K, S)$.
- (b) cas de fertilisation d'une surface couverte par un pivot de 35 hectares (atteindre les besoins $\bar{Q} = Q \times 35$).

5.4.2.3. Solution initiale

Pour l'application de la méthode GRASP, une solution initiale doit être fournie à l'algorithme. Un plan de fertilisation trivial, visant la satisfaction des besoins de la terre en matière de fertilisants sans se soucier du problème de coût est le suivant :

1. Cibler la plus importante quantité à satisfaire parmi les éléments : Azote, Phosphore, Potassium et Soufre,
2. Chercher le produit ayant la meilleure composition en cet élément,
3. Prendre un nombre de sac nécessaire pour satisfaire cette contrainte,
4. Calculer l'apport de notre variable de décision fixée, x_{ij} en éléments non encore traités,
5. Répéter l'opération pour l'élément fertilisant suivant, jusqu'à satisfaire toutes les contraintes.

A la fin de l'opération, nous obtenons donc une solution réalisable mais pas optimale que nous soumettrons à la procédure de construction semi gloutonne, puis amélioreront par une recherche locale.

5.4.2.4. Implémentation de GRASP et discussion des résultats

Méthodes de construction

En comparant les résultats renvoyés par GRASP à ceux trouvés par la méthode exacte - obtenus à l'aide du solveur LP-Solve, en vue de mesurer l'efficacité de GRASP - il est révélé qu'aucune des deux constructions ne permet d'atteindre l'optimum de manière exacte. Ce qui confirme la nature de la solution de la métaheuristique (solution approchée).

Les méthodes s'approchent de l'optimum en un temps qui, pour le même nombre d'itérations peut être variable d'un essai à l'autre. Selon la solution construite à cette phase de l'algorithme, la phase de recherche locale met un temps variable à l'exploration du voisinage.

Une différence importante en temps d'exécution et en nombre maximal d'itérations séparent les deux méthodes :

- La méthode avec arrondissement probabiliste s'approche de la solution optimale, à partir des premières itérations ; mais prend un temps d'exécution très important pour l'amélioration. En effet, puisque la solution initiale choisie est à composantes naturelles. La fonction de l'algorithme se réduit dans ce cas à une simple procédure de recherche locale.
- La méthode bi-triangulaire prend quant à elle un temps moindre, en comparaison à la première méthode. Néanmoins, cette construction nécessite beaucoup d'itérations pour s'approcher de l'optimum en raison de son caractère aléatoire. D'autant plus que le programme mémorise les solutions déjà parcourues, la méthode explore donc, à chaque fois de nouvelles pistes.

Solutions

Dans tous les essais effectués avec l'algorithme GRASP, les produits qui apparaissent à l'optimum sont ceux fournis par l'entreprise E1 et E2. Cela voudrait dire que l'étude montre une différence de coûts significative entre les trois fournisseurs, en faveur des deux entreprises citées.

Les prix proposés par l'entreprise E3 sont relativement élevés, surtout par rapport aux prix proposés par l'entreprise E2, mais aussi, la composition de ses produits en éléments nutritifs fait que les produits de E3 sont exclus des solutions trouvées, une simple observation du rapport quantité d'éléments nutritifs / prix, induit une telle conclusion. Soulignons que, cette cherté des produits peut être due à une qualité supérieure.

5.4.2.5. Synthèse

Les tests montrent qu'il est plus avantageux de dérouler l'algorithme, non pas avec des besoins pour un hectare, mais en offrant au départ à l'algorithme les besoins en N-P-K-S pour toute la surface à fertiliser. Néanmoins, la situation est renversée dans le cas de la construction bi-triangulaire (le coût avec \bar{Q} est inférieur au coût avec Q , multiplié à la fin par la taille du pivot). Cela s'explique par le fait que lorsque Q contient de grandes valeurs, l'intervalle de recherche délimité par deux bornes a et b (phase de construction) s'élargit considérablement. L'ensemble des solutions que l'algorithme GRASP doit parcourir et tester à chaque fois s'accroît lui aussi. Il est alors impératif d'autoriser un nombre tout aussi considérable d'itérations afin que l'algorithme puisse s'approcher au mieux de l'optimum, ce qui peut devenir incommode vu le temps d'exécution.

5.4.3 Evaluation du coût de l'expérimentation

Nous avons conclu dans le chapitre concernant l'analyse statistique des données que le produit FOSFACTYL proposé par l'entreprise E3, surclasse PHOSFERT proposé par l'entreprise E1 en terme de rendement ; offrant ainsi un rendement moyen de 44,74 quintaux/ha contre 39,46 quintaux/ha pour PHOSFERT, soit 5,28 quintaux/ha de différence.

Nous allons évaluer le coût lié à l'utilisation des deux produits et le bénéfice engendré en administrant respectivement 60 et 90 unités de phosphore (doses D2 et D3).

Dans tout ce qui suit, nous raisonnons par rapport à la fertilisation d'un hectare de terre. Comme nous l'avons déjà démontré, il est plus avantageux pour un algorithme de travailler par rapport à la surface globale à fertiliser. Nos résultats calculés pour un hectare puis généralisés pour la surface globale sont donc

considérés comme un gain minimum garanti.

Sur la base des besoins en N-P-K-S pour la fertilisation d'un hectare de terre sous conditions sahariennes, $Q_2 = (\%N, \%P = D2, \%K, \%S)$ et $Q_3 = (\%N, \%P = D3, \%K, \%S)$, nous calculons alternativement, le coût de fertilisation associés à l'utilisation des produits FOSFACTYL et PHOSFERT pour satisfaire la quantité de phosphore D2 puis D3. Par la suite, à l'aide de l'algorithme GRASP, nous déterminons les quantités optimales des trois autres éléments fertilisants à savoir l'azote, le potassium et le soufre de manière à compléter les besoins exprimés dans les vecteurs Q_2 et Q_3 .

Comparaisons et conclusion

Pour les quatre combinaisons évaluées, à savoir PROFERT*D2, PROFERT*D3, FOSFACTYL*D2, FOSFACTYL*D3, il en ressort que les rendements obtenus en utilisant le produit FOSFACTYL pour la dose D2 sont 14% supérieurs à ceux obtenus pour la même dose en utilisant le produit PHOSFERT, contre une supériorité de seulement 9% pour la dose D3.

De plus l'utilisation de la dose D2 est moins onéreuse quelque soit le produit. En combinant ces informations, il en ressort que la combinaison la plus avantageuse est FOSFACTYL*D2 quant au bénéfice réalisé. En effet, il a été démontré que le produit FOSFACTYL offrait des rendements significativement différents de ceux offerts par PHOSFERT, nous hésitions entre les doses de phosphore D2 et D3 à utiliser, doses qui offraient toutes deux de hauts rendements, l'analyse du coût et du bénéfice engendré en utilisant D2 et le produit FOSFACTYL offre un bénéfice maximal et également un rendement maximal soit 46,07 quintaux/ha.

Conclusion et Perspectives

La maîtrise de la fertilisation est un passage obligatoire : fertiliser à bonne dose et avec les bons produits sera une des clés de l'aboutissement des objectifs en terme de rendement. A côté de l'objectif "rendement", l'objectif de minimisation des coûts de fertilisation est tout aussi primordial pour l'agriculteur. Il peut être atteint avec un choix optimal des produits fertilisants disponibles sur le marché.

Face à l'objectif d'amélioration des rendements de blé, nous avons tâché de mettre les outils de la recherche opérationnelle au service de l'agronomie et ce, en exploitant des données concernant le rendement de blé dur, pour élaborer un modèle statistique expliquant l'effet de deux engrais phosphatés sur le rendement, testés à trois doses chacun. Par la suite, en réponse à la question d'optimisation des coûts de fertilisation, nous avons modélisé le problème sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers que nous avons résolu grâce à la métaheuristique GRASP. Le logiciel LP-Solve nous a guidé dans l'évaluation de la performance de la métaheuristique choisie. Nous avons établi un lien entre l'effet de la marque de l'engrais sur le rendement et le coût de fertilisation associé à chacune des marques.

Il est important de souligner que plusieurs facteurs peuvent influencer le rendement de blé. Nous pouvons citer les doses d'azote, l'irrigation, la date de semis, la quantité de semis, plusieurs travaux en font référence dans la littérature agronomique.

Néanmoins, dans le cadre de notre étude, nous avons souhaité étudier l'effet des facteurs dose de phosphore (D1, D2, D3) et marque d'engrais phosphaté (PHOSFERT, FOSFACTYL). Nos conclusions ne sont donc pas une généralisation, mais relatives à l'expérimentation qui a été menée.

Plusieurs conclusions ont été tirées, notamment, à propos de l'effet de l'engrais sur le rendement et sur le coût de fertilisation. En effet, l'analyse statistique a montré une variation significative du rendement en fonction des marques de fertilisants utilisées lors de l'expérimentation. Le produit FOSFACTYL proposé par l'entreprise E3 se place devant PHOSFERT proposé par l'entreprise E1, offrant un rendement moyen de 44.74 quintaux/ha, contre seulement 39.46 quintaux/ha pour le second produit.

Compte tenu des données dont nous avons disposé, à savoir, les données sur les rendements, les catalogues de prix, les besoins en N-P-K-S . . . , il en ressort que la combinaison optimale à choisir en fertilisation phosphatée serait : FOSFACTYL*D2 soit 60 unités de phosphore pour un hectare de terre à fertiliser sous conditions sahariennes.

Précisons que ces conclusions sont valables relativement à l'expérimentation menée et aux besoins en éléments nutritifs décrits précédemment. Il serait de ce fait intéressant d'étudier l'interaction entre rendements et coûts, d'une manière encore plus vaste, incluant les différents produits émanant de chaque entreprise de fertilisation. L'obstacle auquel nous nous heurtons est que le domaine de l'expérience dépasse le cadre de la recherche opérationnelle, l'intervention d'agronomes dans ce cas serait indispensable, en vue de renforcer et d'élargir notre étude.

D'autres perspectives de recherche, concernent cette fois le domaine de recherche opérationnelle peuvent s'orienter dans le sens suivant :

- Considérer dans l'étape de modélisation, le coût de transport de chaque produit.
- Améliorer la fonction de construction de la méthode GRASP.
- Une autre perspective, relativement à la théorie des jeux et aux problèmes multicritères émerge.

En effet, la situation de concurrence entre les entreprises de fertilisants peut donner naissance à un jeu.

De plus, dans certains cas, il peut être financièrement moins avantageux pour l'agriculteur d'utiliser des engrais offrant de hauts rendements. L'agriculteur augmentera ses profits en utilisant des engrais moins onéreux mais offrant de plus faibles rendements, ce qui ne va pas dans le sens de l'Etat algérien qui souhaiterait renforcer la production nationale et ne plus importer de céréales. Ce qui peut être une situation de conflit et pourrait donc être vu comme un jeu entre l'Etat et l'agriculteur, où les stratégies du gouvernement seraient de financer ou non ces engrais dont l'efficacité sur le rendement est avérée à travers les expérimentations, dans la mesure où le rendement est une question qui n'est pas moindres. Les stratégies de l'agriculteur seraient d'utiliser ou non ces engrais.

Enfin, ce problème peut être abordé par les méthodes multicritères d'aide à la décision et ainsi augmenter le nombre de critères à satisfaire tels que la préservation de l'environnement,

la minimisation des déplacements pour l'acheminement des engrais, ou encore la minimisation de ressources humaines et matérielles lors de la fertilisation.

Références

1. AARTS E. and LENSTRA J.K., *Local search in combinatorial optimization*, Princeton University Press, 1997.
2. ACIA, *Circulaires à la profession : Données relatives à l'efficacité nécessaires pour les engrais et les suppléments réglementés en vertu de la loi sur les engrais*, Août 2008.
3. ADJABI S., *Statistique Mathématique*, Editions Universitaires Européennes, 2011.
4. AZAIS J.M. and BARDET J.M., *Le modèle linéaire par l'exemple*, Edition Dunod, Paris, 2005.
5. BERTRAND F. et MAUMY M., *Outils élémentaires de statistique appliquée*, IRMA-Université de Strasbourg, Septembre 2010.
6. BESSE P., *Ressources pédagogiques*, [http : //wikistat.fr/](http://wikistat.fr/), Consulté le 12-06-2012.
7. BRAUNE P., *Qualité de blé dur, Perspectives agricoles*, Volume N 188, 1996, pp. 30-34.
8. DEMASSEY S., *Méthodes hybrides de Programmation par Contraintes et Programmation Linéaire pour le Problème d'Ordonnement de Projet à Contraintes de Ressources*, Laboratoire Informatique d'Avignon, 2003.
9. DODJE Y. et ROUSSON V., *Analyse de la régression appliquée*, Edition Dunod, 2004.
10. DREO et al, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Editions Eyrolles, 2005.
11. FEO T.A. and RESENDE M.G.C., *A probabilistic heuristic for a computationally set covering problem*, Operations Research Letters, 1989, pp. 67-71.
12. GHOUAR W., *Effet du cumul de pluie hivernale sur la réponse du cultivar Waha à la fertilisation azotée*, Université de Batna, 2006.
13. HALILAT M.T., *Effect of potash and nitrogen fertilization on wheat under Saharan conditions*, Workshop on potassium and fertigation developement in West Asia North, Morocco 24-28 November 2004.
14. HANSAN P. and MLADENOVIC N., *Variable Neighborhood Search : Principles and Applications*, European Journal of Operational Research, Vol 130, 2001, pp. 449-467.
15. HAO J.K. et al, *Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes*, Revue d'Intelligence Artificielle N°2, Vol 13, 1999, pp. 283-324.
16. HOOKER J.N., *Logic-based methods for optimization : Combining Optimization and Constraint Satisfaction*, Wiley, New-York, 2000.
17. IDRISSE AOUAD M., *Conception d'Algorithmes Hybrides pour l'Optimisation de l'Energie Mémoire dans les Systèmes Embarqués et de Fonctions Multimodales*, UFR STMIA, Université de Nancy, 2011
18. LENGAUER T., *Combinatorial Algorithms for Integrated Circuit Layout*, In *Applicable Theory in Computer Science*, John Wiley & Sons, chapter 8, 1990, pp.427-446.
19. LOUE A., *Le potassium et les céréales*, Revues de la potasse, Volume 9, N°4, 1993, pp. 1-19.
20. NETO T. and PEDROSO J.P., *GRASP for Linear Integer Programming*, In 4th Metaheuristics International Conference, Faculdade de Ciência da Universidade do Porto, Portugal, 2001.
21. PAPADIMITROU C.H. and STEIGLITZ K., *Combinatorial optimisation - algorithms and complexity*, 1982.
22. PITSOULIS L.S. and RESENDE M.G.C., *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, 2002.
23. PROFERT, [http : //www.profert-dz.com/cerea-phos.html](http://www.profert-dz.com/cerea-phos.html), Consulté le 06-06-2012.
24. PROFERT, [http : //www.profert-dz.com/engrais_solides.html](http://www.profert-dz.com/engrais_solides.html), Consulté le 06-06-2012.
25. REEVES C.R., *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993.
26. RESENDE M.G.C. and RIBEIRO C., *State of the art Handbook in Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
27. RESENDE M.G.C. and RIBEIRO C., *Handbook of metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
28. RIBEIRO C.C. and MACULAN N., *Application of combinatorial optimization*, Annals of Operations Research, Vol 50, 1994.
29. SELMAN B., LEVESQUE H. and MITCHEL D., *A new method for solving hard satisfiability problems*, 10th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), San Jose, Canada, 1992, pp. 440-446.
30. SOLNON C. *Optimisation par colonies de fourmis*, Hermes Sciences, 2008.
31. SOLTNER D., *Les grandes productions végétales*, 16^{ème} édition, Phytotechnie spéciale, Paris 1999.
32. YARA, [http : //www.yara.fr/fertilizer/fertilizer_facts/fertilisationlaws/index.aspx](http://www.yara.fr/fertilizer/fertilizer_facts/fertilisationlaws/index.aspx), Consulté le 12-02-2012.
33. ZLOCHIN et al, *Model-based search for combinatorial optimization : a critical survey*, Annals of Operations Research, Volume 131, 2004, pp.373 - 395.