

## Résolution du problème d'allocation de cultures par satisfaction de contraintes pondérées

Mahuna Akplogan, Jerome Dury, Simon de Givry, Gauthier Quesnel,  
Alexandre Joannon, Frederick Garcia

► **To cite this version:**

Mahuna Akplogan, Jerome Dury, Simon de Givry, Gauthier Quesnel, Alexandre Joannon, et al.. Résolution du problème d'allocation de cultures par satisfaction de contraintes pondérées. JFPC 2012, May 2012, Toulouse, France. hal-00809833

**HAL Id: hal-00809833**

**<https://hal.inria.fr/hal-00809833>**

Submitted on 9 Apr 2013

**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.

# Résolution du problème d'allocation de culture par satisfaction de contraintes pondérées

---

Mahuna Akplogan<sup>1</sup> Jérôme Dury<sup>2</sup> Simon de Givry<sup>1</sup>  
Gauthier Quesnel<sup>1</sup> Alexandre Joannon<sup>3</sup> Frédéric Garcia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA, UR875 Biométrie et Intelligence Artificielle

<sup>2</sup> INRA, UMR 1248 AGIR

<sup>3</sup> INRA, UR 980 SAD-Paysage, F-35042 Rennes

{makploga, jdury, degivry, gquesnel, joannon, fgarcia}@toulouse.inra.fr

## Résumé

Résoudre un Problème d'Allocation de Cultures (PAC) consiste à planifier, au sein d'une exploitation agricole, l'affectation des cultures aux parcelles de manière à satisfaire un ensemble de contraintes et de préférences agronomiques. Les travaux qui s'adressent à ce problème sont essentiels pour la conception d'outils d'aide à la décision pour la conduite des systèmes de production agricole. De nombreuses méthodes ont été développées en agronomie dans la perspective d'appréhender ce problème. Toutefois, très peu d'entre elles abordent simultanément les dimensions spatiale et temporelle d'un PAC. Dans cet article, nous proposons une approche originale basée sur les CSP pondérés pour appréhender la planification des allocations de cultures. L'utilité des affectations est estimée par une fonction globale combinant linéairement plusieurs critères et qui prends en compte les préférences agronomiques et managériales de l'agriculteur. Nous illustrons les performances de notre approche en nous basant sur une exploitation agricole virtuelle de taille moyenne.

## 1 Introduction

L'allocation de culture est l'une des décisions les plus importantes auxquelles doit faire face un agriculteur. Elle intervient notamment dans la première phase du processus de production des cultures et permet à l'agriculteur de planifier sur plusieurs années sa stratégie d'occupation du sol. Le terme « allocation de culture » fait référence (i) au choix des cultures à produire, (ii) à la détermination des proportions annuelles de chacune des cultures et (iii) à l'allocation de ces cultures aux parcelles de l'exploitation. Le problème d'allocation de cultures (PAC) qui en découle né-

cessite la prise en compte d'un ensemble de critères spatiaux (ex : zones cultivables, type de sol) et temporels (ex : contraintes de succession et effets précédents des cultures) interagissant à différents échelles de l'exploitation agricole. Les dimensions spatiale et temporelle d'un PAC sont étroitement liées dans la mesure où le choix des séquences de culture pour chaque parcelle prédétermine l'occupation annuelle des parcelles de l'exploitation agricole.

Dans cet article, nous nous intéressons à la planification de l'allocation des cultures sur un horizon fixe de quelques années. L'utilité des allocations est estimée par une fonction globale combinant linéairement plusieurs critères relatifs aux préférences agronomiques et managériales de l'agriculteur. Contrairement aux différentes approches existantes, notre objectif est de proposer une nouvelle direction capable d'appréhender l'ensemble des facteurs spatiaux et temporels exploités par l'agriculteur. Ces critères sont formalisés dans le cadre des CSP pondérés sous la forme de contraintes dures et de préférences de l'agriculteur. Notre choix des contraintes repose sur une étude réalisée par Dury [5] sur les différentes pratiques des agriculteurs. En raison de la multiplicité des critères pris en compte lors de la résolution d'un PAC, notre approche semble être une voie prometteuse. Ce travail préliminaire à de plus été exploité pour la mise en œuvre d'un outil (CRASH - *Crop Rotation and Allocation Simulator using Heuristics* -) d'aide à l'allocation explicite des cultures.

L'article est organisé comme suit. Dans la section 2, nous décrivons le problème d'allocation de cultures en introduisant quelques définitions spécifiques. La sec-

tion 3 présente les approches existantes et souligne les limites de celles-ci. Dans la section 4, nous introduisons notre formalisation des contraintes dans le cadre des CSP pondérés. Ensuite, la section 5 illustre les performances de l’approche proposée en se basant sur une exploitation agricole virtuelle. Enfin, dans la section 6, nous discutons de la pertinence et des limites de notre proposition.

## 2 Problème d’allocation de culture (PAC)

### 2.1 Description globale du problème

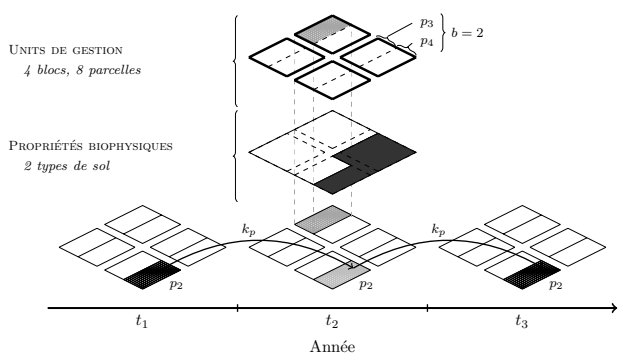


FIG. 1 – Représentation schématique des concepts spatio-temporels d’un PAC ( $t_i$  : année,  $b$  : bloc,  $p_j$  : parcelle,  $k_p$  : effet précédent)

Le problème d’allocation de cultures (PAC) est un problème de planification sur un horizon fini  $\mathcal{H}$ , durant lequel des cultures sont affectées aux parcelles (Figure 1) de manière à prendre en compte un ensemble de concepts agronomiques relatifs (i) à l’organisation spatiale de l’exploitation et (ii) à la succession temporelle des cultures sur les parcelles.

La dimension spatiale repose sur différents niveaux d’organisation appelés *unités de gestion* (Figure 1). Ces unités de gestion sont décidées par l’agriculteur et déterminent la gestion du travail quotidien et l’allocation des ressources. Afin de simplifier notre exemple, nous ne considérons que les deux principales unités de gestion qui sont : les *parcelles* et les *blocs*. Le premier se rapporte à la gestion annuelle des cultures. Une parcelle est une entité spatiale continue d’une exploitation agricole qui est homogène en terme de la culture produite une année donnée [14]. Les délimitations des parcelles sont ajustées d’une année à l’autre. Comme l’indique la Figure 1, les *blocs* sont des sous ensembles de parcelles gérés de la même manière par l’agriculteur. Un bloc caractérise un système de culture c’est-à-dire, une séquence de culture et l’utilisation du même itinéraire techniques pour la conduite de ses cultures (ex : irrigation, fertilisation). Contrairement aux

parcelles, nous considérons ici que la délimitation des blocs est fixe. Cette délimitation dépend cependant des caractéristiques de l’exploitation telles que la disponibilité des ressources (ex : accès à une source d’irrigation) ou encore les propriétés biophysiques (ex : type de sol, topologie, accessibilité des parcelles). Ces *propriétés biophysiques* sont également utilisées afin de déterminer si une culture peut être produite dans de bonnes conditions sur un type de sol donné.

Au niveau temporel, certaines séquences de culture sont interdites ou déconseillées en raison de leurs impacts sur la fertilité du sol, l’apparition de pathogènes et la prépondérance de mauvaises herbes sur les parcelles. La qualité d’une séquence de culture est évaluée suivant deux indicateurs qui sont : le *délai de retour minimum* d’une culture  $v$  ( $rt(v)$ ) et l’*effet précédent* ( $k_p$ ). Le *délai de retour minimum* définit le nombre d’années entre deux instances successives d’une même culture sur une même parcelle. Par exemple, dans la Figure 1, le délai de retour minimum de la culture produite sur  $p_2$  (bloc 3) à la date  $t_1$  est égale à 2 ans. Plus généralement, soient  $t$  et  $t'$  deux différentes années ( $t < t'$ ),  $p_j$  une parcelle et  $v$  une culture,  $p_j(t) = p_j(t') = v$  si  $(t' - t) \geq rt(v)$ .

L’*effet précédent* ( $k_p$ ) détermine la variation de l’état du sol. Il est représenté dans notre cas par un indicateur  $k_p$  [12] qui mesure le bénéfice ou le déficit d’une culture sur son suivant. En nous basant sur le  $k_p$ , nous pouvons mesurer l’utilité d’une séquence de culture par rapport à une autre. Par ailleurs, pour certains auteurs comme [4], la stabilité d’un système de culture ne peut être garantie que lorsque les séquences de cultures sur les parcelles sont répétables dans le temps. Pour ce faire, les séquences de culture que nous recherchons doivent être répétables tout en respectant les délais de retour des cultures. Cette notion connue sous le nom de « *rotation de culture* » est couramment utilisée par les agriculteurs.

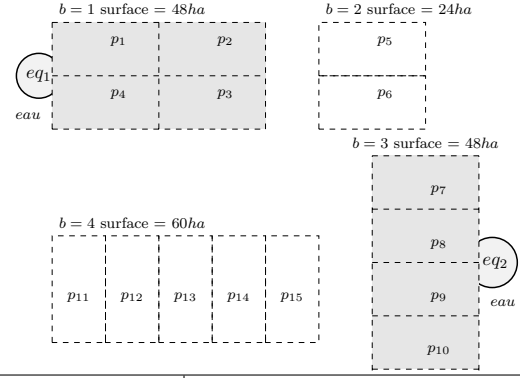
### 2.2 Description des contraintes

Résoudre un problème d’allocation de culture (PAC) consiste à affecter sur un horizon fixe  $\mathcal{H}$  des cultures aux parcelles. Chaque affectation des cultures doit satisfaire un ensemble de contraintes dures et de préférences.

Les contraintes dures que nous retenons dans le cadre de ces travaux sont notamment les *délais de retour minimum* des cultures, l’*historique* des parcelles, les propriétés *physiques* (types de sol, accessibilité des ressources) des parcelles. Les préférences sont quant à elles relatives aux *effets précédents* ( $k_p$ ) et à l’équilibre spatial et temporel des proportions de culture et ceci sous contrainte de ressources. Les contraintes dures et les préférences sont définies aussi bien au niveau :

- *des parcelles* afin d’exprimer pour chacune d’entre elles la possibilité (voir l’impossibilité) d’un redécoupage ou d’une fusion,
- *des blocs* afin d’exprimer la compatibilité spatiale des cultures aux parcelles, les délais de retour minimum et les effets précédents des cultures,
- *de l’exploitation* afin d’exprimer les objectifs de production ou l’usage des ressources.

Considérons le problème d’allocation de culture décrit à la Figure 2. Ce problème, décrit une exploitation virtuelle dont la superficie totale est de 180 *ha*. L’exploitation ainsi considérée comporte 4 blocs ( $b \in \{1, 2, 3, 4\}$ ) et 15 parcelles  $p_{[1-15]}$  de 12 *ha* chacune. L’exploitation virtuelle ainsi considérée correspond à un problème réel de taille moyenne. Quatre différentes cultures sont cultivées sur l’exploitation. Il s’agit du blé d’hiver (BH), de l’orge de printemps (OP), du maïs (MA) et du colza d’hiver (CH). Le maïs est la seule culture irriguée de l’exploitation. Comme l’indique la Figure 2, seuls les blocs 1 ( $eq_1$ ) et 3 ( $eq_2$ ) sont équipés en matériels d’irrigation fixes. Le quota d’eau annuel destiné à l’irrigation est de  $10000m^3$  dont  $6000m^3$  pour  $eq_1$  et  $4000m^3$  pour  $eq_2$ . On distingue deux types de sols sur l’ensemble de l’exploitation. Le premier type de sol est celui des blocs 1 et 3 tandis que le second est celui des blocs 2 et 4. Les allocations réalisées par l’agriculteur durant les cinq dernières années sont décrites par le tableau de la Figure 2.



parcelle / année	t1	t2	t3	t4	t5
<b>p1</b>	MA	MA	BH	OP	MA
<b>p2</b>	OP	MA	MA	BH	OP
<b>p3</b>	BH	OP	MA	MA	BH
<b>p4</b>	MA	BH	OP	MA	MA
<b>p5</b>	BH	OP	BH	CH	BH
<b>p6</b>	OP	BH	CH	BH	OP
<b>p7</b>	MA	MA	MA	MA	MA
<b>p8</b>	MA	MA	MA	MA	MA
<b>p9</b>	MA	MA	MA	MA	MA
<b>p10</b>	MA	MA	MA	MA	MA
<b>p11</b>	BH	CH	BH	OP	BH
<b>p12</b>	CH	BH	OP	BH	CH
<b>p13</b>	BH	OP	BH	CH	BH
<b>p14</b>	OP	BH	CH	BH	OP
<b>p15</b>	BH	CH	BH	OP	BH

FIG. 2 – Exploitation virtuelle de 4 blocs, 15 parcelles de 12ha chacune. Les parcelles grises ont un accès à l’eau ( $eq_1, eq_2$ ). Le tableau contient l’historique des parcelles pour les cinq dernières années.

### 2.2.1 Définition des contraintes dures

1. **h-SCC** - *compatibilité spatiale des cultures* : le colza d’hiver (CH) ne peut pas être affecté aux parcelles élémentaires dont le type de sol est 1 (blocs 1, 3).
2. **h-EQU** - *égalité des parcelles* : les parcelles  $p_7$  (respectivement  $p_9$ ) et  $p_8$  (respectivement  $p_{10}$ ) doivent être affectées à la même culture. Ces parcelles ont été choisies par l’agriculteur pour être conduites de la même manière.
3. **h-HST** - *Historique des parcelles* : pour les cinq dernières années, l’occupation du sol est fixée et présentée dans le tableau de la Figure 2.
4. **h-TSC** - *Délai de retour minimum* : pour chaque couple parcelle/culture, les délais de retour minimum suivants doivent être respectés :  $rt(BH) = 2$ ,  $rt(OP) = 3$ ,  $rt(MA) = 2$  et  $rt(CH) = 3$ .
5. **h-CCS** - *Rotation culturale* : pour chacune des parcelles, la séquence de culture après l’historique doit être indéfiniment répétables sans enfreindre la contrainte de délai de retour minimum.
6. **h-RSC** - *Capacité de ressources* : l’exploitation dispose de quantités fixes de ressources. Pour cha-

cune d’entre elles, le cumul des quantités nécessaires à la production des cultures affectées doit être inférieur à la capacité disponible. Par exemple, seul le maïs est irrigable. Sachant qu’il faut  $165m^3$  d’eau par hectare de maïs, sa production annuelle sur le bloc 1 ne peut excéder 36.36 *ha*.

7. **h-SCA** - *Collection de cultures par bloc* : sur l’horizon de planification, le même sous ensemble de cultures doit être assigné à l’ensemble des parcelles d’un bloc.

### 2.2.2 Définition des préférences

1. **s-TOP** - *Topologie de l’exploitation* : les parcelles assignées à une même culture doivent être spatialement groupées. Autrement dit, pour limiter la perte de temps liée aux déplacements entre parcelles durant la conduite journalière des cultures, il est préférable de grouper autant que possible les cultures. En conséquence, chaque parcelle isolée

	<i>culture précédente</i>			
	BH	OP	MA	CH
BH	4	1	1	0
OP	2	3	1	0
MA	0	0	3	0
CH	0	0	0	4

FIG. 3 – Table des effets précédents ( $k_p$ )

sera pénalisée par un coût  $\delta_2$ .

2. **s-SBC** - *Équilibre spatial des cultures* : pour certaines cultures, les objectifs de production annuelle sont prédéfinis. Par exemple, dans le PAC ci-dessus considéré, les proportions annuelles de maïs (MA) doivent être comprises entre  $[24, 48]$  *ha* sur le bloc 1 et  $[12, 24]$  *ha* sur le bloc 3. Toutes les déviations seront pénalisées par un coût  $\delta_1$ .
3. **s-TBC** - *Équilibre temporel des cultures* : pour de raisons purement agronomiques, les objectifs de production de certaines cultures sur certaines parcelles sont prédéfinis. Par exemple, la proportion de colza d'hiver (CH) produite sur chaque parcelle doit être comprise entre  $[12, 24]$  *ha*. Toutes les déviations seront pénalisées par un coût  $\delta_3$ .
4. **s-CSQ** - *Effet précédent* : chaque succession de culture est associée à un coût  $k_p$  qui mesure l'effet précédent. La Figure 3 présente les valeurs de  $k_p$ .

En pratique, les coûts  $k_p$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  et  $\delta_3$  sont définis tels que  $\sum k_p \gg \sum \delta_1 \gg \sum \delta_2 \gg \sum \delta_3$ . Ce faisant, nous hiérarchisons de manière réaliste les préférences de l'agriculteur. En effet, les effets précédents  $k_p$  doivent être avant tout minimisés en raison des conséquences qu'ils peuvent engendrer sur les cultures suivantes. L'équilibre spatial des cultures (coût  $\delta_1$ ) définit implicitement les revenus annuels de l'agriculteur. De ce fait, il doit être garanti du mieux possible. Ensuite, la charge de travail doit être réduite en groupant (coût  $\delta_2$ ) les cultures identiques. Enfin, l'équilibre temporel des cultures ( $\delta_3$ ) doit être respecté.

### 3 Analyse de l'existant

Depuis Heady [7], différentes approches ont été proposées pour la recherche de la meilleure affectation de cultures aux parcelles [11]. La plupart des travaux sont basés soit sur l'optimisation de la marge brute [1] des cultures soit sur l'utilisation de filtres agronomiques [2] (ex : règles de succession, quantités de produits phytosanitaires dans le sol, etc.) pour fournir des successions de cultures admissibles. Dans les différentes approches existantes, le PAC a été abordé soit sous la forme d'une optimisation de proportions annuelles des cultures [10, 17] soit sous la forme d'une recherche des

successions (rotations) de cultures admissibles [6, 4]. Ces deux aspects constituent cependant deux dimensions (spatiale et temporelle) du PAC. De plus, à défaut d'être spatialement explicites, les solutions proposées sont des agrégations de propositions de cultures sur un ensemble de parcelles de différents types. Nous proposons d'une part, de prendre en compte simultanément les deux dimensions du problème et d'autre part, de rendre les solutions proposées spatialement explicites.

## 4 Modèle CSP pondérés d'un PAC

### 4.1 Le cadre des CSP pondérés

Le formalisme des réseaux de contraintes (CSP) ne permet pas de prendre en compte facilement les préférences de l'agriculteur. Nous nous basons ici sur les réseaux de contraintes pondérées (*Weighted CSP* - WCSP) qui nous semblent plus appropriés à la résolution des problèmes d'optimisation. Le cadre WCSP [13] est une extension qui ajoute aux CSP une structure de valuation permettant de définir une structure algébrique caractérisant les coûts associés à certaines combinaisons de valeurs. Un WCSP est défini par un triplet  $\langle \mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{W} \rangle$  avec :

- $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$  un ensemble fini de variables.
- $\mathcal{D} = \{D_1, \dots, D_n\}$  un ensemble fini de domaines de variables. Chaque variable  $x_i \in \mathcal{X}$  est associée à un domaine fini de valeur  $D_i \in \mathcal{D}$ .
- $\mathcal{W} = \{W_{S_1}, \dots, W_{S_e}\}$  un ensemble de fonctions de coûts. Soit  $l(S_i)$  l'ensemble des combinaisons de valeurs sur la portée  $S_i$ . Chaque fonction de coûts  $W_{S_i} \in \mathcal{W}$  est définie par  $W_{S_i} : l(S_i) \rightarrow [0, m]$  avec  $m \in [1, \dots, +\infty]$ .

La solution d'un WCSP est une affectation complète  $A \in l(\mathcal{X})$  qui minimise  $\sum_{W_{S_i} \in \mathcal{W}} W_{S_i}(A[S_i])$  où  $A[S_i]$  est la projection d'une affectation de valeurs sur le sous ensemble de variables  $S_i$ .

### 4.2 Définition du problème d'allocation de culture

#### 4.2.1 Notion de parcelle élémentaire

Afin de prendre en compte les différentes contraintes numériques, nous proposons d'échantillonner l'exploitation agricole en **parcelles élémentaires**. Chaque parcelle élémentaire est définie comme *une entité spatiale homogène, indivisible, ayant le même historique et les mêmes propriétés biophysique*. Toutes les parcelles élémentaires sont de tailles identiques. Par exemple en divisant chacune des parcelles (Figure 2) en 8 parcelles élémentaires de 1.5 *ha*. Le nombre total de parcelles élémentaires serait égal à 120. Dans

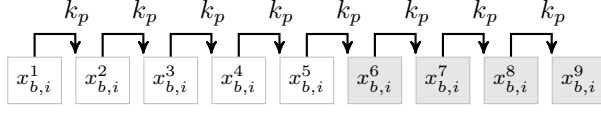


FIG. 4 – Séquence de variables définissant la parcelle élémentaire  $i$  du bloc  $b$ .

ce cas, les parcelles ne seront que des combinaisons de plusieurs parcelles élémentaires.

#### 4.2.2 Définition du problème

Le PAC est défini sur un horizon fini  $\mathcal{H}$  par un ensemble de parcelles élémentaires et de cultures. Nous définissons le WCSP associé de manière suivante.

$\mathcal{X}$  un ensemble de variables  $x_{b,i}^t \in \mathcal{X}$ . Chaque variable  $x_{b,i}^t$  définit la parcelle élémentaire  $i$  du bloc  $b$ ,  $i \in \mathcal{N}_b$ ,  $b \in [1, \mathcal{B}]$  ( $\mathcal{B} = 4$  et  $\mathcal{N}_1 = [1, 32]$ ) dans le PAC décrit par la Figure 2) à la date  $t$  ( $t \in [1, \mathcal{H}]$ ). Ainsi, chaque parcelle élémentaire est décrite par  $\mathcal{H}$  variables correspondant à l'occupation de la parcelle élémentaire à chaque instant. Soient  $[1, h]$  et  $[h + 1, \mathcal{H}]$  respectivement les instants du passé (historique) et du futur. Pour  $\mathcal{H} = 9$  et  $h = 5$ , la Figure 4 représente les 9 variables qui définissent la parcelle élémentaire  $i$  du bloc  $b$ . Les cinq premières (sommets blancs) sont les variables d'historique.

$\mathcal{D}$  les domaines  $D_{b,i}$  des variables  $x_{b,i}^t$  est l'ensemble des cultures possibles sur toutes les parcelles élémentaires. Considérant le PAC de la Figure 2,  $\forall b \in [1, \mathcal{B}], \forall i \in \mathcal{N}_b$ ,  $D_{b,i} = \{1, 2, 3, 4\} = \{BH, OP, MA, CH\}$ .

$\mathcal{W}$  les fonctions de coûts  $\mathcal{W}$  se divisent en cinq différents : (1) fonctions de coût tabulaires (arité maximale de 5), (2) des contraintes globales **same**, (3) des contraintes globales **regular**, (4) des contraintes globales de cardinalité **gcc**, (5) des contraintes globales **soft-gcc**. Ces fonctions de coût sont détaillées dans les sections suivantes.

#### 4.3 Fonctions de coût simples

Les contraintes dures et les préférences h-SCC, h-EQU, h-HST, s-TOP et s-CSQ sont définies par des fonctions de coût tabulaires.

**h-SCC** :  $\forall t \in [h + 1, \mathcal{H}], \forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b$ , soit  $W_{x_{b,i}^t}^{SCC}$  une fonction de coût unaire associée à la compatibilité spatiale des cultures :

$$\forall a \in D_{b,i}$$

$$W_{x_{b,i}^t}^{SCC}(a) = \begin{cases} \infty & \text{si } a \text{ est interdit sur la} \\ & \text{parcelle élémentaire } i \\ & \text{du bloc } b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

**h-EQU** :  $\forall t \in [h + 1, \mathcal{H}], \forall b \in \mathcal{B}$ , pour tous les couples de parcelles élémentaires  $(i, j) \in \mathcal{N}_b \times \mathcal{N}_b$  qui doivent être gérés de la même manière, on définit une contrainte d'égalité  $W_{x_{b,i}^t, x_{b,j}^t}^{EQU}$  sur les variables  $x_{b,i}^t$  et  $x_{b,j}^t$ .

$$\forall a \in D_{b,i}, \forall a' \in D_{b,j}$$

$$W_{x_{b,i}^t, x_{b,j}^t}^{EQU}(a, a') = \begin{cases} 0 & \text{si } a = a' \\ \infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

**h-HST** :  $\forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b, \forall t \in [1, h]$ , soit  $W_{x_{b,i}^t}^{HST}$  une fonction de coût unaire associée à une variable d'historique d'une parcelle élémentaire.

$$\forall a \in D_{b,i}$$

$$W_{x_{b,i}^t}^{HST}(a) = \begin{cases} 0 & \text{si } a = \text{historic}(x_{b,i}^t) \\ \infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

où  $\text{historic}(x_{b,i}^t)$  retourne la valeur de la parcelle élémentaire  $i$  du bloc  $b$  à la date  $t$ .

**s-TOP** :  $\forall t \in [1, \mathcal{H}], \forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b$ , soit  $W_S^{TOP}$  une fonction de coût n-aire associée à la topologie de l'exploitation. Nous définissons une fonction de voisinage  $\text{neighbor}(i)$  qui retourne les parcelles élémentaires  $j \in \mathcal{N}_b$  ayant au moins une frontière commune avec  $i$ . Dans notre exploitation virtuelle nous considérons les 4 plus proches voisins suivant la notion de voisinage de von Neumann. Ainsi, la portée  $S$  est égale à  $\{x_{b,i}^t, x_{b,n}^t, x_{b,s}^t, x_{b,e}^t, x_{b,w}^t\}$  où les parcelles élémentaires  $n, s, e, o$  sont les 4 voisins respectivement au nord, sud, est et ouest de  $i$ .  $\forall a \in D_{b,i}, \forall a_n \in D_{b,n}, \forall a_s \in D_{b,s}, \forall a_e \in D_{b,e}, \forall a_w \in D_{b,w}$

$$W_S^{TOP}(a, a_n, a_s, a_e, a_w) = \begin{cases} 0 & \text{si } a = a_n = a_s \\ & = a_e = a_w \\ \delta_2 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

En fonction de la position de  $i$  dans le bloc, l'arité de  $W_S^{TOP}$  pourrait se réduire à 3 ou 4 (coin et extrémité).

**s-CSQ** :  $\forall t \in [1, \mathcal{H}], \forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b$ , soit  $W_{x_{b,i}^t, x_{b,i}^{t+1}}^{CSQ}$  une fonction de coût binaire associée à l'effet précédent  $k_p$ . Nous définissons une fonction  $\text{KP}(a, a')$  qui retourne le coût  $k_p$  de la succession de culture  $a'$  précédé de  $a$  :

$$\forall a \in D_{b,i}, \forall a' \in D_{b,i}$$

$$W_{x_{b,i}^t, x_{b,i}^{t+1}}^{CSQ}(a, a') = \text{KP}(a, a') \quad (5)$$

#### 4.4 Collection de cultures par bloc via la contrainte « same »

**h-SCA** : considérons un bloc  $b$ , le sous ensemble de  $(\mathcal{H} - h) * |\mathcal{N}_b|$  variables du futur  $x_{b,i}^t$  (avec  $t \in [h + 1, \mathcal{H}]$ )

associé à chaque parcelle élémentaire  $i$  dans  $b$  doit être assignée à une seule et même collection de culture. Ainsi,  $\forall (i, j) \in \mathcal{N}_b \times \mathcal{N}_b$  (avec  $i \neq j$ ), l'ensemble des valeurs affectées à la séquence de variables définissant  $i$  est une permutation de celui de  $j$ . Nous proposons de modéliser h-SCA par une contrainte globale **same** [3]. Pour chaque bloc, on choisit une parcelle élémentaire de référence  $i$ . On définit ensuite une fonction de coût  $W_S^{SCA}$  d'arité  $2 * (\mathcal{H} - h)$  associée à chaque pair de séquences de variables qui définissent  $x_{b,i}^t$  et  $x_{b,j}^t$  ( $i \neq j$ ). La portée  $S = \{x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}, x_{b,j}^{h+1}, \dots, x_{b,j}^{\mathcal{H}}\}$ . Soient  $A[x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}]$  et  $A[x_{b,j}^{h+1}, \dots, x_{b,j}^{\mathcal{H}}]$  les deux sous affectations des variables de  $S$ . La contrainte  $W_S^{SCA}$  impose que  $A[x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}]$  soit une permutation de  $A[x_{b,j}^{h+1}, \dots, x_{b,j}^{\mathcal{H}}]$ .

$$W_S^{SCA} = \text{same}(\underbrace{x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}}_i, \underbrace{x_{b,j}^{h+1}, \dots, x_{b,j}^{\mathcal{H}}}_j) \quad (6)$$

#### 4.5 Séquence de culture via la contrainte « regular »

Les contraintes h-TSC et h-CCS portent sur la succession temporelle des cultures. Nous proposons de les modéliser en utilisant des contraintes globales **regular** [15]. Ainsi,  $\forall t \in [1, \mathcal{H}]$ ,  $\forall b \in \mathcal{B}$ ,  $\forall i \in \mathcal{N}_b$ ,  $\forall a \in D_{b,i}$ , soient  $M_{b,i}^a$  un automate non déterministe à états finis (NFA),  $\mathcal{L}(M_{b,i}^a)$ ,  $\mathcal{L}(M_{b,i}^a)$  le langage défini par l'automate et  $S_{b,i}$  la séquence de  $\mathcal{H}$  variables décrivant une parcelle élémentaire  $i$  du bloc  $b$ . Une solution de la contrainte **regular**( $S_{b,i}, M_{b,i}^a$ ) est une affectation  $A[S_{b,i}]$  telle que  $A[S_{b,i}] \in \mathcal{L}(M_{b,i}^a)$ .

**h-TSC** : pour chaque parcelle élémentaire  $x_{b,i}$ , nous définissons pour chacune des cultures  $a \in D_{b,i}$  un langage  $\mathcal{L}(M_{b,i}^a)$  qui décrit le délai de retour de  $a$ . Autrement dit,  $(x_{b,i}^t = x_{b,i}^{t'})$  ssi  $x_{b,i}^{t'} \forall t' \neq t, t' \geq t + rt(a)$ . Nous définissons un **regular**( $S_{b,i}, M_{b,i}^a$ ). Par exemple, pour le cas où  $a = CH$ , le délai de retour  $rt(CH) = 3$  ans. L'automate  $M_{b,i}^a$  est décrit comme sur la Figure 5. Dans cet exemple, l'état initial est 0 et les états terminaux sont 5, 6, 7. Les arcs sont étiquetés avec les valeurs des cultures.

Comme l'indique le NFA de la Figure 5, les variables d'historique sont exploitées afin d'imposer le délai de retour sur les variables du futur. Pour ce faire, nous définissons pour chaque parcelle élémentaire, une fonction de coût  $W_{S_{b,i}}^{TSC^a}$  d'arité  $\mathcal{H}$  telle que :

$$\forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b, \forall a \in D_{b,i}$$

$$W_{S_{b,i}}^{TSC^a} = \text{regular}(x_{b,i}^1, \dots, x_{b,i}^t, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}, M_{b,i}^a) \quad (7)$$

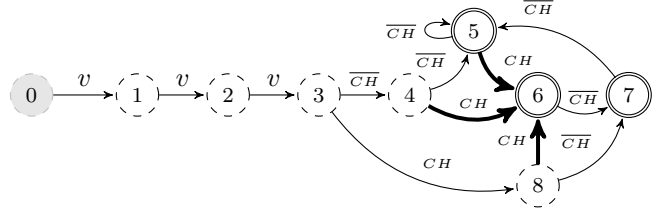


FIG. 5 – Automate pour la culture  $a = CH$  avec  $(rt(CH) = 3$  et  $h = 5)$ .  $v$  désigne toutes les valeurs de  $D_{b,i}$ . La notation  $\overline{CH}$  correspond à  $D_{b,i} \setminus \{CH\}$ . Le langage associé accepte toutes les séquences sur  $\mathcal{H}$  pour lesquelles le délai de retour est respecté pour l'ensemble des variables du futur (ex : CH-OP-CH-OP-CH-BH-OP-CH-BH).

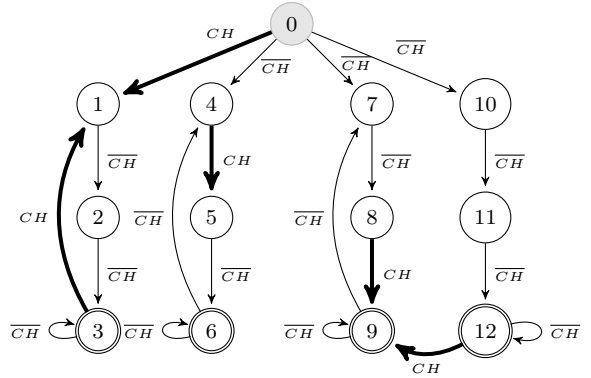


FIG. 6 – Automate cyclique pour les cultures  $a = CH$  avec  $rt(CH) = 3$  et  $\mathcal{H} - h = 4$ .

**h-CCS** : pour chaque parcelle élémentaire  $x_{b,i}$ , nous combinons h-TSC avec la contrainte de rotation culturelle définie également par une contrainte globale **regular**. Cette contrainte h-CCS assure que la séquence de culture après l'historique est indéfiniment répétable sans violation de la contrainte de délai de retour. La Figure 6 décrit un NFA cyclique pour la culture  $CH$ . L'état initial est 0. Les états terminaux sont 3, 6, 9, 12. La portée de la fonction de coût se réduit aux variables du futur.

$$\forall b \in \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b, \forall a \in D_{b,i}$$

$$W_{S_{b,i}}^{CCS^a} = \text{regular}(x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}, M_{b,i}^a) \quad (8)$$

#### 4.6 Capacité de ressources via la contrainte globale de cardinalité

Dans un PAC, chaque parcelle élémentaire consomme une quantité fixe de ressources en fonction de ses exigences qualitatives (type de culture) ou numériques (superficie de la parcelle élémentaire, dose d'irrigation). Par exemple, contrairement au blé d'hiver, le maïs est une culture irriguée. La gestion

des ressources est un problème de séquençement et de comptage des quantités allouées. L'approche de résolution classique est basée sur la recherche du plus court chemin sous contrainte de ressource [9]. Considérant les hypothèses 1 et 2, nous suggérons de réduire le problème d'allocation de ressources à un problème de comptage.

**Hypothèse 1** : *Les ressources sont supposées consommables et systématiquement renouvelables chaque année sans aucune fonction de production (ex : un quota annuel d'eau pour l'irrigation).*

Cette hypothèse est très proche de la réalité car les agriculteurs disposent généralement d'un quota annuel d'eau. Il en est de même pour le nombre d'heures de travail annuel disponible en fonction de la législation.

**Hypothèse 2** :  $\forall t \in [1, \mathcal{H}], \forall (b, b') \in \mathcal{B} \times \mathcal{B}$  un couple de blocs,  $\forall (i, j) \in \mathcal{N}_b \times \mathcal{N}_{b'}$  un couple de parcelles élémentaires. *Les superficies des parcelles élémentaires  $i$  et  $j$  sont considérées comme étant équivalentes en fonction de la taille du problème.*

Sous ces hypothèses, l'allocation annuelle des ressources est vue comme un problème de comptage à chaque instant  $t \in [h + 1, \mathcal{H}]$ . Ainsi, connaissant la capacité annuelle des ressources, nous définissons pour chaque instant  $t \in [h + 1, \mathcal{H}]$  une borne supérieure et une borne inférieure du nombre de variables  $x_{i,b}^t$  qui peuvent être affectées à une culture donnée et ceci en fonction des exigences qualitatives et numériques de l'exploitation.

**h-RSC** : la contrainte de capacité de ressource h-RSC est modélisée par une contrainte globale de cardinalité gcc [16] portant sur les affectations de cultures aux parcelles élémentaires.

$\forall t \in [h + 1, \mathcal{H}]$ , soit  $W_{S_b^t}^{RSC}$  une contrainte globale d'arité  $|\mathcal{N}_b|$  associée aux capacités de ressources.

Sachant  $S_b^t = (x_{b,1}^t, \dots, x_{b,|\mathcal{N}_b|}^t)$ , la contrainte globale de cardinalité (gcc) spécifique, pour chaque valeur  $a \in \bigcup D_{b,i}$ , une borne inférieure  $lb(a)$  et une borne supérieure  $ub(a)$  correspondant au nombre d'occurrence de la valeur  $a$  dans l'affectation  $A[S_b^t]$ .

$$W_{S_b^t}^{RSC} = \text{gcc}(S_b^t, lb, ub) \quad (9)$$

admet une solution s'il existe une affectation de  $S_b^t$  telle que :

$$\forall a \in \bigcup D_{b,i}, lb(a) \leq |\{x_{b,i}^t \in S_b^t | x_{b,i}^t = a\}| \leq ub(a) \quad (10)$$

Par exemple, considérons le bloc  $b = 1$  de l'exploitation virtuelle (Figure 2) et supposons un échantillonnage de l'espace en parcelles élémentaires de 1.5 ha

(section 4.2.1). Sachant qu'il faut  $165m^3$  d'eau par hectare de maïs, les superficies minimum et maximum de maïs sur ce bloc sont 0 et 36.36 ha. Ainsi, sur le bloc  $b = 1$ , la borne inférieure du nombre d'occurrence de maïs est  $lb(MA) = 8 \times \lfloor \frac{0}{12} \frac{ha}{ha} \rfloor = 0$ . La borne supérieure  $ub(MA) = 8 \times \lfloor \frac{36.36}{12} \frac{ha}{ha} \rfloor = 24$ .

#### 4.7 Équilibre spatial et temporel des cultures via la contrainte globale « soft-gcc »

Les préférences relatives aux proportions annuelles (s-SBC) et pluriannuelles des cultures (s-TBC) sont définies par des contraintes globales (soft-gcc). Elles autorisent la relaxation du gcc associé dans le cas où le problème est sur-contraint.

Considérons un  $\text{soft-gcc}(S, lb, ub, \delta)$ . Nous définissons pour tout  $a \in \bigcup D_{b,i}$ .

$$ovf(S, a) = \max(|\{x_{b,i}^t | x_{b,i}^t = a\}| - ub(a), 0)$$

$$unf(S, a) = \max(lb(a) - |\{x_{b,i}^t | x_{b,i}^t = a\}|, 0)$$

où  $lb$  et  $ub$  sont respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de chacune des cultures,  $\delta$  une variable de coût appartenant à un domaine fini. Nous utilisons la mesure de violation orientée variables  $\mu$  [8] qui se base sur le nombre minimum de variables dont les valeurs doivent être changées afin de satisfaire la contrainte gcc associée. Si  $\sum_{a \in \bigcup D_{b,i}} lb(a) \leq |S| \leq \sum_{a \in \bigcup D_{b,i}} ub(a)$ , la mesure de violation  $\mu$  est exprimé par :

$$\mu(S) = \max \left( \sum_{a \in \bigcup D_{b,i}} ovf(S, a), \sum_{a \in \bigcup D_{b,i}} unf(S, a) \right) \quad (11)$$

La fonction de coût associée à chaque contrainte  $\text{soft-gcc}(S, lb, ub, \delta)$  est  $W = \mu(S) \times \delta$ . Sur la base de cette définition les contraintes s-SBC et s-TBC sont formalisées comme ci-dessous.

**s-SBC** :  $\forall t \in [h + 1, \mathcal{H}], \forall b \in \mathcal{B}' \subseteq \mathcal{B}$ . Soit  $W_{S_b^t}^{SBC}$  une contrainte  $\text{soft-gcc}$  d'arité  $|\mathcal{B}'|$  associée au bloc  $b$  à la date  $t$ . La portée  $S_b^t = \{x_{b,i}^t | i \in \mathcal{N}_b\}$ .

$$W_{S_b^t}^{SBC} = \text{soft-gcc}(S_b^t, lb, ub, \delta = \delta_2) \quad (12)$$

**s-TBC** :  $\forall b \in \mathcal{B}' \subseteq \mathcal{B}, \forall i \in \mathcal{N}_b$ . Soit  $W_{S_{b,i}^t}^{TBC}$  une contrainte  $\text{soft-gcc}$  d'arité  $(\mathcal{H} - h)$  associée à chaque parcelle élémentaire  $i$ . La portée  $S_{b,i}^t = \{x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}\}$ . À l'exception de la portée et de la variable de coût,  $\delta = \delta_3$ ,  $W_{S_{b,i}^t}^{TBC}$  est définie exactement comme  $W_{S_b^t}^{SBC}$ .

Par exemple, considérons la préférence s-TBC décrite dans la section 2.2.2. La proportion de colza



d'hiver (CH) produite sur chaque parcelle doit être comprise entre  $[12, 24]$  ha. Pour chaque séquence de variables  $\{x_{b,i}^{h+1}, \dots, x_{b,i}^{\mathcal{H}}\}$  qui définit une parcelle élémentaire, la borne inférieure du nombre d'occurrence de colza d'hiver est  $lb(CH) = 8 \times \lfloor \frac{12}{12} \frac{ha}{ha} \rfloor = 8$ . La borne supérieure est  $ub(CH) = 8 \times \lfloor \frac{24}{12} \frac{ha}{ha} \rfloor = 16$ .

## 5 Implémentation

### 5.1 Description des instances de PAC

Nous avons conduit nos expérimentations en utilisant quatre instances de l'exploitation virtuelle décrite à la Figure 2. Chaque instance correspondant à un échantillonnage spécifique de l'exploitation en parcelles élémentaires. Nous avons progressivement augmenté le nombre total de parcelles élémentaires de 15 à 120 (15, 30, 60, 120).

Pour l'instance comportant 15 parcelles élémentaires,  $|\mathcal{N}_1| = |\mathcal{N}_3| = 4$ ,  $|\mathcal{N}_2| = 2$  et  $|\mathcal{N}_4| = 5$  avec  $|\mathcal{N}_i|$  le nombre de parcelles élémentaires dans le bloc  $i$ . Dans cette instance du problème, les parcelles de 12 ha (Figure 2) sont supposées élémentaires. Partant de cette instance nous découpons successivement chaque parcelle élémentaire de 12ha en 2, 4 puis 8 plus petites parcelles élémentaires. Ces échantillonnages sont représentatifs de différentes tailles d'exploitations. L'horizon de planification  $\mathcal{H}$  est égal à 9 années. Les cinq premières années sont associées à l'historique présenté dans le tableau de la Figure 2. Les quatre dernières années sont associées au futur.

Notons que dans l'exploitation virtuelle, aucune des contraintes dures et préférences décrites dans la section 2.2 ne porte sur plusieurs blocs. Ainsi, dans un premier temps nous résolvons chaque bloc indépendamment. Les instances associés au bloc 1 sont B1-LU4, B1-LU8, B1-LU16, B1-LU32 respectivement pour 4, 8, 16 et 32 parcelles élémentaires. Pour toutes les instances du problème, les coûts associés à s-TOP, s-SBC et s-TBC sont respectivement  $\delta_1 = 2$ ,  $\delta_2 = 100$  et  $\delta_3 = 10$ . Ce faisant, nous prenons en compte la hiérarchisation des contraintes décrites dans la section 2.2.2. Afin de privilégier les séquences de culture qui minimisent les effets précédents nous introduisons un facteur  $\delta_4 = 10$ . Pour tous les effets précédents,  $k_p$  (Figure 3), on calcule une nouvelle valeur de  $k_p = \delta_4 * k_p$ .

Dans un second temps, nous rajoutons une nouvelle préférence qui porte sur l'ensemble de l'exploitation. On définit une nouvelle fonction de coût  $W_{S_i}^{SBC}$  qui étend la précédente (section 2.2). Les proportions annuelles de MA et de BH doivent être respectivement comprises entre  $[40, 72]$  ha et  $[70, 100]$  ha. Les instances résultantes seront nommées B1[1-4]-LU15(\*), B1[1-4]-LU30(\*), B1[1-4]-LU60(\*) et B1[1-4]-LU120(\*)

Les blocs sont dans ce cas tous interdépendants. Toutes les instances ci-dessus décrites sont disponibles dans le benchmark *cost function*<sup>1</sup>. Pour chacune des instances, le nombre de contraintes est approximativement égal à  $\frac{5}{2} \times \mathcal{N} \times \mathcal{H} \pm 30$ , où  $\mathcal{N}$  est le nombre de parcelles élémentaires, et  $\mathcal{H}$  l'horizon de planification.

### 5.2 Analyse des résultats

Pour la résolution des PAC, nous utilisons l'algorithme *Depth-First Branch and Bound* (DFBB) implémenté dans le solveur **Toulbar2**<sup>2</sup> (version 0.9.1). Le paramétrage utilisé est celui par défaut. Les colonnes  $|\mathcal{X}|$  et  $|\mathcal{W}|$  du tableau 1 montrent le nombre de variables ( $\mathcal{N} \times \mathcal{H}$ ) et de contraintes pour chaque instance.

Les résultats présentés dans le tableau 1 sont obtenus avec un processeur Intel(R) Xeon(R) de 2.27GHz. Le temps de calcul mentionné est en seconde. Il indique la durée totale pour trouver et prouver l'optimalité (colonne « Temps » de « Une sol. optimale ») en commençant avec un majorant initial relativement bon (colonne UB). Ce majorant influence considérablement la performance. Dans notre cas le choix du majorant initial est empirique. Sur la base de l'optimum trouvé pour la recherche d'une solution, nous recherchons toutes les solutions (colonne « Toutes les sol. optimales ») avec un majorant initial fixé à l'optimum (colonne Opt.) plus un. Pour les instances avec les blocs indépendants, les meilleures solutions sont obtenues en moins d'une minute à l'exception de B1-LU32. Dans ce cas, les solutions optimales sont obtenues et prouvées pour toutes les instances. La différence entre le temps de calcul pour la recherche d'une ou toutes les solutions est principalement liée au majorant initial. Les résultats obtenus en introduisant les interdépendances entre les blocs sont dans l'ensemble acceptables comparativement à la taille des problèmes. En effet, l'arité maximum de certaines contraintes gcc et soft-gcc est égale au nombre total de parcelles élémentaires soit 120 dans le pire des cas. Cela peut expliquer la raison pour laquelle l'instance B[1-4]-LU120(\*) n'a pas été résolue au bout de 48 heures.

### 5.3 Analyse des solutions trouvées pour l'instance B1[1-4]-LU15(\*)

De manière générale, les solutions obtenues sont en pratique de très bonnes qualités. Considérons l'ensemble des solutions optimales trouvées pour l'instance B1[1-4]-LU15(\*). La Figure 7 montre que pour toutes les années et pour chacune des cultures, les solutions ont le même nombre de parcelles affectées à une culture

<sup>1</sup><http://www.costfunction.org/benchmark?task=browseAnonymous&idb=33>

<sup>2</sup><http://mulcyber.toulouse.inra.fr/projects/toulbar2>

TAB. 1 – Performance pour la recherche d’une solution optimale et toutes les solutions optimales avec DFBB.

Instance de PAC	$\mathcal{X}$	UB	$\mathcal{W}$	Opt.	Une sol. optimale		Toutes les sol. optimales		
					Time(s)	Nodes	Time(s)	Nodes	Nb.Sol
B1-LU4	36	1000	91	92	0.39	17	0.08	8	5
B1-LU8	72	2000	175	184	2.96	94	0.21	32	17
B1-LU16	144	4000	343	368	21.47	413	2.64	256	257
B1-LU32	288	6000	679	640	228	285	6.19	38	17
B2-LU2	18	1000	47	38	0.08	2	0.06	2	1
B2-LU4	36	2000	95	116	0.22	8	0.22	8	1
B2-LU8	72	4000	191	392	4.19	6	0.36	2	1
B2-LU16	144	6000	383	752	7.9	10	0.78	2	1
B3-LU4	36	1000	99	328	0.3	14	0.29	16	2
B3-LU8	72	2000	199	656	0.64	14	0.6	16	2
B3-LU16	144	4000	367	1312	1.51	18	1.37	16	2
B3-LU32	288	6000	703	2592	4.1	20	3.79	18	2
B4-LU5	45	1000	119	46	0.53	4	0.08	0	1
B4-LU10	90	2000	239	192	11.64	5	0.57	0	1
B4-LU20	180	4000	479	752	12.32	12	0.73	0	1
B4-LU40	360	6000	959	1504	39.33	23	1.97	2	1
B[1-4]-LU15(*)	135	2000	360	704	21.02	257	7.87	96	2
B[1-4]-LU30(*)	270	4000	712	1560	323.02	1029	155.9	498	12
B[1-4]-LU60(*)	540	4000	1384	3852	2412.97	1297	3697.23	2228	136
B[1-4]-LU120(*)	1080	8000	2728	-	-	-	-	-	-

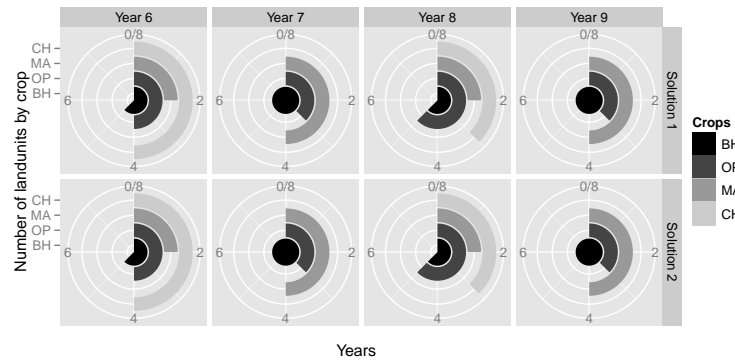


FIG. 7 – Proportion annuelle des cultures pour les différentes années.

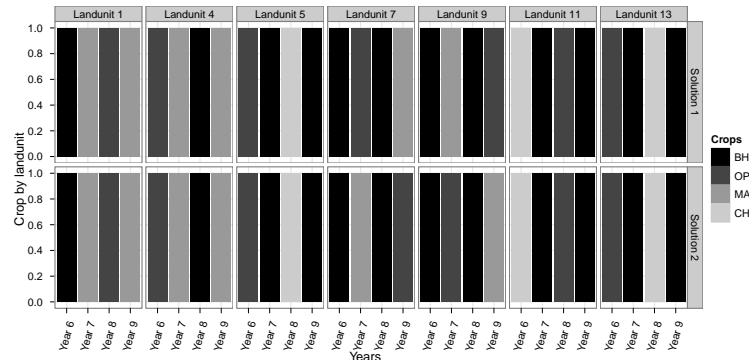


FIG. 8 – Allocation des cultures.

donnée. L'équilibre spatiale du maïs n'est pas respecté pour les années  $t \in \{6, 8\}$ . Cela est dû aux valeurs d'historique sur le bloc 3.

Par ailleurs, la Figure 8 montre les allocations spatiale et temporelle sur les blocs. Le graphique montre pour chaque solution les séquences de culture sur certaines parcelles élémentaires représentatives : 1, 4 (bloc 1), 5 (bloc 2), 7, 9 (bloc 3) et 11, 13 (bloc 4). On observe que les délais de retour sont respectés. La différence entre les solutions dépend des allocations du bloc 3 (parcelles élémentaires 7 et 9). Pour les années  $t \in \{7, 9\}$ , l'orge de printemps (OP) peut être substitué par du maïs (MA). Il n'existe aucune symétrie entre les solutions en raison de l'historique et du type de sol.

## 6 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé une modélisation du problème d'allocation de culture (PAC) basée sur les CSP pondérés. Contrairement aux approches existantes, notre proposition est spatialement explicite et intègre les deux dimensions (spatiale et temporelle) du PAC. Nous avons décrit la manière dont les contraintes dures et les préférences d'un agriculteur peuvent être abordées sous la forme d'une optimisation de fonction objective globale. Les résultats obtenus montrent qu'avec le solveur *Toulbar2*, des solutions peuvent être trouvées en temps raisonnable pour des PAC de petites et moyennes tailles. Par la suite, nous étudierons (i) l'intérêt des contraintes globales CUMULATIVE pour une prise en compte plus complexe des ressources puis (ii) la fusion des délais de retour et des effets précédents via des contraintes globales de types COSTREGULAR.

## Références

- [1] J.E. Annetts and E. Audsley. Multiple objective linear programming for environmental farm planning. *Journal of the Operational Research Society*, 53(9) :933–943, 2002.
- [2] J Bachinger and P Zander. ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy*, 26 :130–143, 2007.
- [3] Nicolas Beldiceanu, Irit Katriel, and Sven Thiel. Filtering algorithms for the same constraint. In *CPAIOR*, pages 65–79, 2004.
- [4] S. Dogliotti, W. A. H. Rossing, and M. K. van Ittersum. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, pages 239–250, 2003.
- [5] Jérôme Dury, Noémie Schaller, Frédéric Garcia, Arnaud Reynaud, and Jacques Eric Bergez. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, July 2011.
- [6] Talaat El-Nazer and Bruce A. McCarl. The Choice of Crop Rotation : A Modelling Approach and Case Study. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(1) :127–136, 1986.
- [7] E. O Heady. The Economics of Rotations with Farm and Production Policy Applications. *Journal of Farm Economics*, pages 645–664, 1948.
- [8] Willem Jan van Hoeve, Gilles Pesant, and Louis-Martin Rousseau. On global warming : Flow-based soft global constraints. *J. Heuristics*, pages 347–373, 2006.
- [9] S. Irnich and G. Desaulniers. *Shortest Path Problems with Resource Constraints*, chapter 2, pages 33–65. Springer, 2005.
- [10] Takeshi Itoh, Hiroaki Ishii, and Teruaki Nanseki. A model of crop planning under uncertainty in agricultural management. *International Journal of Production Economics*, pages 555–558, 2003.
- [11] W. K. Kein Haneveld and A. W. Stegeman. Crop succession requirements in agricultural production planning. *European Journal of Operational Research*, 166 :406–429, 2005.
- [12] B. Leteinturier, J.L. Herman, F. De Longueville, L. Quintin, and R. Oger. Adaptation of a crop sequence indicator based on a land parcel management system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4) :324–334, 2006.
- [13] P. Meseguer, F. Rossi, and T. Schiex. Soft Constraints Processing. In F. Rossi, P. van Beek, and T. Walsh, editors, *Handbook of Constraint Programming*, chapter 9. Elsevier, 2006.
- [14] Thomas Nesme, Françoise Lescouret, Stéphane Bellon, and Robert Habib. Is the plot concept an obstacle in agricultural sciences? a review focussing on fruit production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, pages 133 – 138, 2010.
- [15] Gilles Pesant. A regular language membership constraint for finite sequences of variables. In *CP*, pages 482–495, 2004.
- [16] Jean-Charles Régim. Generalized arc consistency for global cardinality constraint. In *Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence*, pages 209–215. AAAI Press, 1996.
- [17] Ruhul Sarker and Tapabrata Ray. An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2) :191–199, 2009.