



HAL
open science

Management flexibility and the sustainability of bee farming systems

Coline Kouchner, Rodolphe Sabatier, Benjamin Basso, Axel Decourtye, Cécile Ferrus, Yves Le Conte, Marc Tchamitchian

► **To cite this version:**

Coline Kouchner, Rodolphe Sabatier, Benjamin Basso, Axel Decourtye, Cécile Ferrus, et al.. Management flexibility and the sustainability of bee farming systems. *Innovations Agronomiques*, 2019, 77, pp.31-43. 10.15454/k4kv-k303 . hal-02900352

HAL Id: hal-02900352

<https://hal.inrae.fr/hal-02900352>

Submitted on 23 Jul 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Intégrer l'adaptabilité dans l'analyse de la durabilité des exploitations apicoles

Kouchner C.^{1,2,3,4}, Sabatier R.⁴, Basso B.^{1,2}, Decourtye A.^{1,2,5}, Ferrus C.^{1,2}, Le Conte Y.^{2,3}, Tchamitchian M.⁴

¹ ITSAP-Institut de l'abeille, F-84000 Avignon

² UMT PrADE, F-84000, Avignon

³ INRA, Abeilles et Environnement, F-84000 Avignon

⁴ INRA, Ecodéveloppement, F-84000 Avignon

⁵ ACTA, F-84000 Avignon

Correspondance : coline.kouchner@inra.fr

Résumé

À l'échelle d'une exploitation apicole, la capacité d'adaptation est liée à différents aspects du fonctionnement : aux pratiques de gestion du cheptel, à des choix de commercialisation ou d'organisation. Cette capacité d'adaptation contribue à la durabilité de l'exploitation en lui permettant de composer avec un contexte variable, mais constitue également un élément de plus à considérer dans les compromis à trouver entre plusieurs enjeux de durabilité qui peuvent être antagonistes : viabilité économique, temps de travail... Pour révéler les difficultés possibles à concilier ces différents objectifs avec celui d'adaptabilité dans la gestion du renouvellement du cheptel, nous avons appliqué la théorie de la viabilité à une modélisation des principales options de gestion du renouvellement (gestion des reines, création de nouvelles colonies) et des dynamiques d'évolution du cheptel. Le modèle développé a permis d'étudier les conséquences de différentes pratiques sur la possibilité pour l'exploitation d'atteindre ses objectifs économiques et de temps de travail tout en maintenant un certain niveau d'adaptabilité. Certains choix techniques comme le nombre de reines disponibles (relativement au nombre de colonies de l'exploitation) apparaissent ainsi limiter en amont les options possibles de gestion du cheptel, voire la viabilité de l'exploitation dans certaines situations. L'adaptabilité de la gestion du cheptel apparaît donc comme une contrainte supplémentaire qu'il est parfois difficile de concilier avec d'autres objectifs économiques et sociaux.

Mots-clefs: Capacité d'adaptation, Gestion du renouvellement, Théorie de la viabilité, Apiculture

Abstract: Management flexibility and the sustainability of bee farming systems

As in most farming systems, the adaptive capacity is a key factor for bee farming operations to cope with an uncertain environment. This adaptive capacity is based on several components of the farm: the commercial choices, the work organisation or the colony management practices. This study focuses on the flexibility of the management practices: can this flexibility be easily reconciled with other sustainability goals of the beekeeper, as work organisation issues or economic expectations? To address this question, we developed a model of the main management practices and dynamics of a colony stock under the mathematical framework of viability theory. An economic goal and a work time constraint are considered along with an increasing flexibility goal. Different technical choices in the management practices are simulated. The economic goal and work time constraint were not always compatible with the flexibility goal, partly depending on the technical choices. Flexibility thus appears as an additional constraint that can be difficult for the beekeeper to comply with.

Keywords: Adaptive capacity, Colony management, Viability theory, Beekeeping

Introduction

Comme d'autres systèmes agraires, les exploitations apicoles font face à une forte variabilité annuelle de leurs contextes de production, notamment en termes de conditions météorologiques et de disponibilité des ressources alimentaires, en l'occurrence les fleurs produisant du nectar et du pollen collecté par les abeilles. La gestion du cheptel apicole étant fortement dépendante de ces conditions environnementales, l'apiculteur doit pouvoir y adapter son organisation et ses pratiques. Comme pour d'autres systèmes d'élevage et en particulier pastoraux (Scoones et al., 2007 ; Tessema et al., 2014), la capacité d'adaptation apparaît ainsi comme un enjeu majeur pour les exploitations apicoles face aux incertitudes et à la variabilité du contexte de production (Kouchner et al., 2019). Cette capacité d'adaptation est constituée de plusieurs éléments : (i) la diversité des productions et des ressources qui permet de compenser une production par une autre, (ii) la possibilité d'intégrer de nouvelles connaissances dans la gestion de l'exploitation qui permet l'innovation face au changement, et (iii) l'adaptabilité des pratiques, c'est-à-dire la possibilité de modifier la gestion et les pratiques apicoles pour faire face à des changements de contexte (Darnhofer et al., 2010).

Dans un contexte de pertes annuelles de colonies potentiellement élevées, un facteur clef de cette adaptabilité concerne notamment la gestion du renouvellement du cheptel qui permet le maintien d'un cheptel productif garant de la viabilité économique de l'exploitation. Sur le plan de la gestion du renouvellement, l'adaptabilité correspond alors à l'existence de plusieurs alternatives dans les pratiques de renouvellement, en particulier pour l'allocation des nouvelles reines (élevées ou achetées) aux différents types de colonies ou pour la création de nouvelles colonies. L'ensemble des pratiques possibles est cependant contraint par différents enjeux de durabilité de l'exploitation, et plus particulièrement par les objectifs de viabilité économique (liée à la production) et les limites de temps de travail disponible.

Quantifier l'adaptabilité d'une exploitation apicole demande de s'intéresser à l'ensemble des options de gestion alternatives. Une telle propriété est donc particulièrement difficile à mesurer *in situ* puisqu'au-delà de la situation observée, elle requiert de s'intéresser à l'ensemble des situations potentielles. Les approches de modélisation se révèlent en revanche particulièrement adaptées pour évaluer de telles propriétés. Le cadre mathématique dit de la théorie de la viabilité (Aubin, 1991) permet de quantifier de telles propriétés d'adaptabilité en recherchant les ensembles de modalités de gestion permettant à un système dynamique de rester dans un ensemble de contraintes au cours du temps (Sabatier et al., 2015b). Pour la première fois, les principales options de gestion du renouvellement d'un cheptel apicole ont ici été modélisées dans un formalisme états-contrôles, pour étudier les conséquences de certains choix techniques en termes d'adaptabilité du système et la compatibilité de cette contrainte d'adaptabilité avec d'autres objectifs sociaux (temps de travail) et économiques (revenus).

1. Méthodologie

Le modèle développé simule l'impact des stratégies de renouvellement du cheptel sur les dynamiques du cheptel ainsi que sur le revenu issu de la production de miel et le temps de travail.

Les algorithmes utilisés identifient les configurations du cheptel (nombre et état des colonies) et les options de gestion (ou contrôles) permettant de respecter les contraintes fixées (revenus, temps de travail, adaptabilité). Cet ensemble de configurations du cheptel ainsi obtenu est appelé « noyau de viabilité ». Parmi les situations permettant de respecter les contraintes économiques et de temps de travail fixé, certaines laissent plus de marge de manœuvre que d'autres : pour certaines situations initiales, il existe en effet un nombre plus ou moins important de stratégies de gestion permettant de respecter les contraintes économiques et de temps de travail. Nous appelons ici « adaptabilité » l'amplitude de la gamme d'options de gestion permettant de respecter des contraintes. Autrement dit, la part des options de gestion qui permettent d'atteindre les objectifs fixés dans une situation donnée,

parmi l'ensemble des options existantes. L'adaptabilité est donc considérée comme la possibilité de choisir entre plusieurs pratiques de renouvellement du cheptel selon le contexte rencontré. Sur le plan méthodologique une innovation est ici de considérer explicitement l'adaptabilité comme une contrainte supplémentaire du système et non comme une simple dimension de la performance de ce système. En cela notre approche permet de rechercher l'ensemble des stratégies de gestion permettant de respecter des contraintes économiques et de temps de travail, mais aussi de maintenir un certain niveau d'adaptabilité au cours du temps.

Les différents éléments du modèle (états possibles du cheptel, options de gestion du cheptel à intégrer, dynamiques d'évolution du cheptel) ont été identifiés à dire d'expert, et le paramétrage a été réalisé à partir de données issues de la littérature, d'enquêtes et d'expérimentations.

1.1 Modèle : états, options de gestion et dynamiques considérées

Le modèle développé se situe à l'échelle du cheptel d'une exploitation apicole. Il relie les principales options de gestion du renouvellement aux dynamiques d'évolution du cheptel, considérées sur un pas de temps annuel et une période de 10 ans (Figure 1).

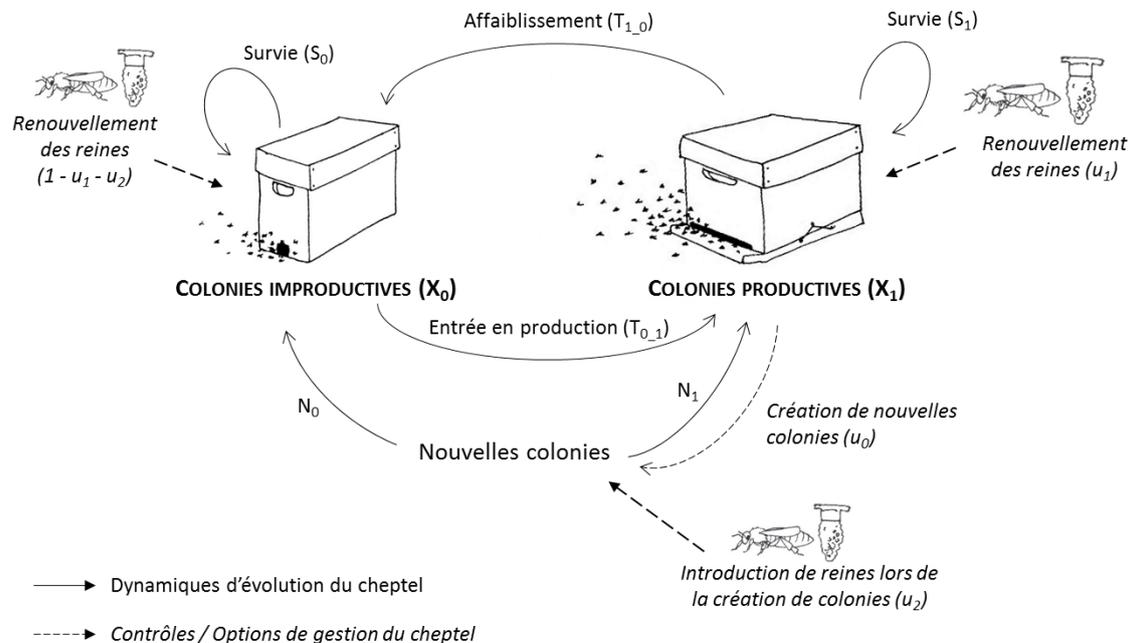


Figure 1 : Modélisation des dynamiques du renouvellement du cheptel apicole considérées.

Deux états $X(t)=(x_0(t), x_1(t))$ sont considérés pour les colonies : les colonies productives x_1 qui assurent la production de miel de l'exploitation, et les colonies improductives x_0 qui ne produisent pas de miel mais contribuent au renouvellement du cheptel.

Trois options de gestion $U(t)=(u_0(t), u_1(t), u_2(t))$ de ce système sont possibles, qui représentent les principales pratiques de renouvellement du cheptel en apiculture. La première correspond à la création de nouvelles colonies à partir des colonies productives (u_0). Les autres options correspondent à l'allocation d'un nombre donné de reines aux trois types de colonies : introduction de reines dans les nouvelles colonies pour accélérer leur entrée en production (u_2), remplacement de reines dans les colonies en production (u_1) ou dans les colonies improductives pour limiter les pertes et affaiblissements ($1-u_1-u_2$). Nous considérons donc (en cohérence avec l'observation des pratiques de terrain) que la

mise en place ou non d'un élevage de reines et la quantité de reines élevées sont fixées en amont de la saison apicole, et que les options de gestion correspondent à l'allocation d'un pool de reines à différents usages. La quantité de reines disponibles pour introduction est définie ici comme une proportion fixe du nombre total de colonies chaque année, dépendant du type de système apicole considéré.

Le système d'équations central de ce modèle est le suivant :

$$\begin{cases} x_0(t+1) = S_0(X(t), U(t))x_0(t) + T_{1,0}(X(t), U(t))x_1(t) - T_{0,1}(X(t), U(t))x_0(t) + N_0(X(t), U(t))u_0(t) \\ x_1(t+1) = S_1(X(t), U(t))x_1(t) + T_{0,1}(X(t), U(t))x_0(t) - T_{1,0}(X(t), U(t))x_1(t) + N_1(X(t), U(t))u_0(t) \end{cases}$$

Les dynamiques annuelles d'évolution des deux états $X(t)=(x_0(t), x_1(t))$ du cheptel sont liées à la survie des colonies au sein de chaque état (fonctions de survie S_0 et S_1 respectivement pour les colonies improductives et productives), aux transitions d'un état à l'autre (affaiblissement des colonies productives qui deviennent improductives $T_{1,0}$, entrée en production des colonies improductives $T_{0,1}$), et à la création de nouvelles colonies pouvant être improductives (N_0) ou entrer directement en production (N_1). Ces dynamiques sont notamment liées aux valeurs prises par les options de gestion $U(t)$: la création de nouvelles colonies, mais également l'introduction de reines dans les différents types de colonies qui améliore les taux de survie, d'entrée en production et la part des nouvelles colonies entrant directement en production, et réduit le taux d'affaiblissement des colonies productives.

Les différentes équations et paramètres de ces dynamiques sont disponibles en Annexe.

1.2 Viabilité du système : contraintes considérées

La viabilité du système, basée sur le cadre théorique de la viabilité développé par Aubin (1991), est considérée comme la possibilité pour le système de respecter des contraintes fixées, étant donné les états, options de gestion possibles et dynamiques de ce système. Plusieurs contraintes sont considérées ici, et fixent le temps de travail disponible en saison apicole, le revenu minimum pour les associés (revenu minimum annuel et revenu moyen minimum sur l'ensemble de la période) et le nombre minimal de colonies productives du système en fin de période (pour assurer le maintien d'un cheptel suffisant y compris en fin de période). La dernière contrainte est celle de l'adaptabilité du système, définie comme l'existence d'une certaine proportion d'options de gestion viables pour un état donné, parmi l'ensemble des options existantes. Afin d'identifier l'impact de la prise en compte ou non de différents niveaux d'adaptabilité du système sur sa viabilité, cette contrainte est variable avec plusieurs seuils successifs étudiés : 0, 5, 10, 15 et 20 % (de trajectoires viables parmi les trajectoires possibles pour chaque situation).

Les différentes équations liées à ces contraintes sont disponibles en Annexe.

1.3 Cas d'étude et paramétrage

Le modèle a été paramétré sur plusieurs ensembles de données, issues d'enquêtes auprès d'apiculteurs professionnels, d'expérimentations et d'un réseau d'exploitation de références technico-économiques en apiculture (ITSAP-Institut de l'abeille, 2018). Deux exploitations avec un parcours de transhumances classique sur des zones de grandes cultures et dont les pratiques de gestion du renouvellement du cheptel correspondent à des stratégies relativement fréquentes et contrastées ont été comparées. Ces deux exploitations diffèrent principalement par la taille du cheptel, le mode de commercialisation (vrac ou vente directe) et la quantité de reines disponibles par rapport à la taille du cheptel. Le nombre de personnes travaillant sur l'exploitation et les miellées sur lesquelles les colonies sont mises en production sont similaires pour les deux exploitations.

Les données économiques et de temps de travail utilisées sont issues d'enquêtes réalisées auprès des associés de chacune des deux exploitations, de résultats d'enquêtes réalisés auprès d'un panel plus large d'apiculteurs professionnels, et de données technico-économiques issues d'un réseau d'exploitations de références (données principalement issues des projets Durapi et du Réseau d'exploitations de référence de l'ITSAP-Institut de l'abeille – voir Annexe). Les données techniques (taux de survie,...) sont issues en partie des enquêtes au sein des deux exploitations considérées, et d'autres enquêtes et données de suivis de cheptel réalisés dans le cadre d'expérimentations apicoles lorsque les données n'étaient pas disponibles pour ces deux exploitations.

La contrainte de temps de travail maximal en saison apicole a été fixée en lien avec le nombre de personnes présentes sur l'exploitation, et en considérant un nombre maximal de jours travaillés de six jours par semaine en saison pour les salariés de l'exploitation et de sept jours pour les associés, ce qui correspond à une situation relativement courante durant les pics de travail en exploitation apicole. La contrainte de revenu minimal annuel a été fixée sur la base des réponses à une enquête réalisée auprès d'apiculteurs professionnels, portant notamment sur le revenu minimal annuel moyen qu'ils estimaient correct dans leur profession (ADA Occitanie, 2018).

La liste des valeurs de paramètres utilisés ainsi que leur origine est disponible en Annexe.

1.4 Simulations réalisées

Deux exploitations ont été comparées. Pour chacune de ces exploitations, trois niveaux de disponibilité de reines sur l'exploitation (élément majeur des stratégies de renouvellement considérées) ont été simulés, avec l'hypothèse que la viabilité du système peut notamment être liée à ce choix technique : un niveau relativement faible (30 % par rapport au nombre total de colonies de l'exploitation, correspondant à la situation réelle de l'exploitation 1), un niveau moyen (50 %, correspondant à la situation réelle de l'exploitation 2) et un niveau élevé (75 %). Pour chacune des deux exploitations et des trois niveaux de disponibilité de reines, différents niveaux de contraintes d'adaptabilité ont été simulés : 0, 5, 10, 15 et 20 % (de trajectoires viables parmi les trajectoires possibles pour chaque situation).

2. Résultats

2.1 Viabilité des exploitations et disponibilité en reines

L'ensemble des situations viables du cheptel résulte de plusieurs limites, pouvant être liées à des aspects techniques (ex. le nombre maximal de nouvelles colonies possibles chaque année, notamment lié au nombre de colonies du cheptel), économiques (le nombre de colonies productives doit être suffisant pour assurer la production) ou organisationnelles (le temps de travail maximal disponible pour la gestion des colonies). Les noyaux de viabilité dans les différents cas testés (différents niveaux de reines disponibles et d'adaptabilité visée pour les deux exploitations) sont représentés sur la

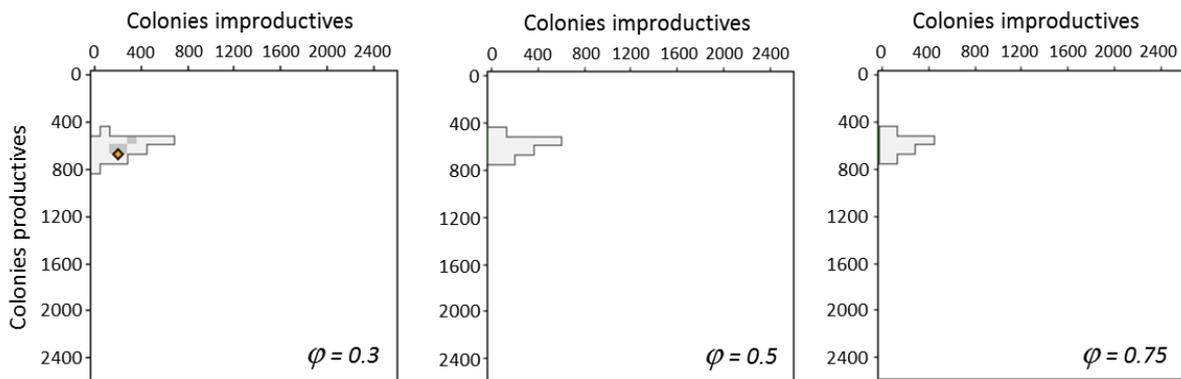
Figure 2.

L'étendue du noyau de viabilité, et donc le nombre de situations viables, varie fortement entre les deux exploitations. Dans le cas de l'exploitation 1, où une part importante du temps de travail disponible est consacrée à la commercialisation des produits et non à la gestion du cheptel, il y a peu de situations viables, y compris pour le niveau de disponibilité de reines le plus faible qui correspond à celui observé sur l'exploitation. Par ailleurs, plus le niveau de reines disponibles est important, plus le noyau de viabilité diminue. Cela semble lié au temps supplémentaire à consacrer à l'élevage de reines et à l'introduction de ces reines dans les colonies, qui ne compense pas totalement les bénéfices associés (moindres mortalités et affaiblissements) en termes de dynamiques du cheptel. Le nombre de colonies

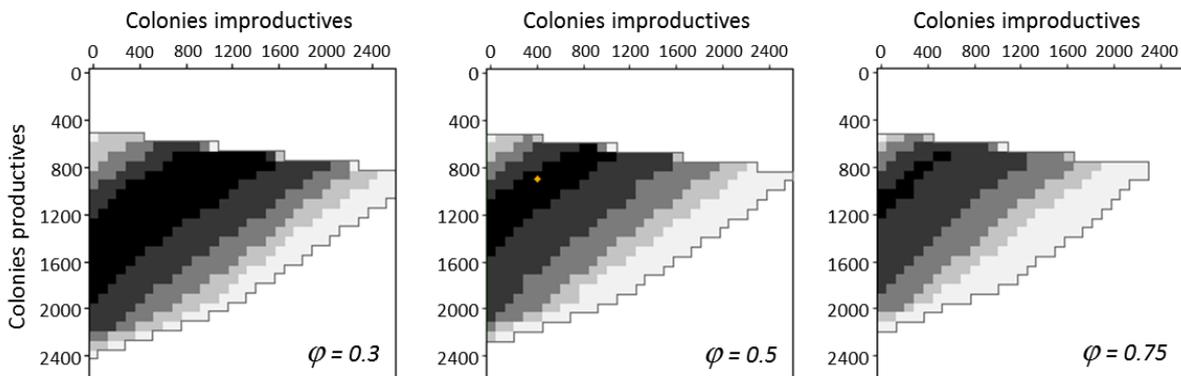
maximal pouvant être géré est alors moins grand, tout en devant rester suffisant pour assurer la production visée.

Pour l'exploitation 2, où le temps de travail disponible pour la gestion du cheptel est beaucoup plus important mais avec un prix de vente du miel en vrac plus faible, le noyau de viabilité est plus étendu. Comme dans le cas de l'exploitation 1, ce noyau diminue aussi avec l'augmentation de la proportion de reines disponibles par rapport à la taille du cheptel.

a. Exploitation 1



b. Exploitation 2



Contrainte d'adaptabilité

0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
-----	-----	------	------	------

Figure 2 : Noyaux de viabilité pour deux exploitations et trois niveaux de disponibilité en reines ($\varphi = 0.3, 0.5$ ou 0.75 , soit 30, 50 ou 75 % du nombre total de colonies). Les niveaux de gris correspondent aux noyaux de viabilité pour différents niveaux de contraintes d'adaptabilité, de 0 (gris clair) à 20 % (noir). Le losange jaune représente la situation de l'exploitation considérée, pour son niveau de disponibilité de reines (exploitation 1 : 30 % ; exploitation 2 : 50 %).

2.2 Contrainte d'adaptabilité

Pour les deux exploitations, la surface du noyau de viabilité, et donc le nombre de situations viables, diminue de façon importante avec l'augmentation de la contrainte d'adaptabilité. Pour l'exploitation 1, il n'y a aucune situation viable lorsque la contrainte d'adaptabilité est de plus de 5 % et que la part de

reines disponibles par rapport à l'ensemble du cheptel est de 30 %. Un résultat similaire est obtenu avec une contrainte d'adaptabilité de 5 % et des niveaux de reines disponibles de 50 et de 75 %. Pour l'exploitation 2, cette réduction du noyau de viabilité s'observe également avec l'augmentation de la contrainte d'adaptabilité. Cependant le noyau de viabilité est plus étendu et il existe donc des situations viables jusqu'au plus haut niveau d'adaptabilité testé (20 %), quel que soit le niveau de reines disponibles. Le maintien d'une marge de manœuvre dans la gestion du système (considérée ici via l'existence d'une part plus ou moins importante de trajectoires de gestion viables) réduit donc le nombre de situations viables pour l'exploitation.

3. Discussion

3.1 Impacts de choix techniques et adaptabilité des exploitations

Ces travaux mettent en évidence l'influence majeure de la disponibilité en reines sur l'exploitation (considérée en proportion de reines disponibles par rapport à la taille du cheptel) sur la viabilité des exploitations et l'adaptabilité de la gestion du renouvellement du cheptel. Si une disponibilité en reines plus élevée permet de réaliser des introductions de reines dans une part plus grande de colonies, réduisant les risques d'affaiblissements et de mortalités, le temps supplémentaire à passer à l'élevage de ces reines et à leur introduction dans les colonies apparaît comme un facteur limitant possible. C'est notamment le cas lorsque le temps disponible est une contrainte forte pour l'exploitation, par exemple si une part importante du temps de travail n'est pas consacrée à la gestion du cheptel mais au conditionnement et à la commercialisation du miel (exploitation 1). En apiculture comme dans d'autres systèmes d'élevage, le choix des pratiques mises en œuvre peut ainsi être limité par la marge de manœuvre existante en termes de temps disponible, laquelle contribue à l'adaptabilité des systèmes d'élevage en assurant notamment la possibilité de réaliser des tâches imprévues pour s'adapter aux conditions rencontrées (Cournut et al., 2018).

La contribution de pratiques de gestion du cheptel, et notamment de la gestion de la reproduction, à la capacité d'adaptation des exploitations a aussi été identifiée dans d'autres systèmes d'élevage (Nozières et al., 2011 ; Tichit et al., 2008). Dans le cas des exploitations apicoles, la mise en place ou non d'un élevage de reines apparaît ainsi comme un choix technique important dans le fonctionnement de l'exploitation, avec des conséquences en termes de viabilité et plus particulièrement d'adaptabilité.

Si le maintien d'une marge de manœuvre en termes d'options de gestion permet à l'apiculteur d'adapter ses pratiques au contexte rencontré, il apparaît aussi comme une contrainte supplémentaire qui ne peut pas toujours être conciliée avec les autres objectifs de l'exploitation. Dans certains des cas étudiés, il n'y a en effet aucune situation qui permette de respecter à la fois les contraintes de revenus et de temps de travail, et celle d'adaptabilité du système. Cette difficile conciliation entre les performances (de production ou économique) et la capacité d'adaptation des systèmes apparaît avec des approches similaires dans d'autres systèmes d'élevage, notamment dans le cas de systèmes herbagers d'élevage bovins (Sabatier et al., 2015a).

Si l'adaptabilité des pratiques de gestion du renouvellement peut ainsi être difficile à concilier avec les autres objectifs de l'exploitation, d'autres aspects de la gestion du cheptel peuvent être source d'adaptabilité pour les systèmes apicoles, et notamment les choix de transhumance. L'adaptation des emplacements des ruchers aux conditions environnementales et à la disponibilité des ressources florales est en effet un levier important d'adaptabilité en apiculture (Durant, 2019), comme l'est le recours à une diversité de ressources fourragères pour d'autres systèmes pastoraux (Adriansen, 2005.; Scoones et al., 2007). Cette adaptation des emplacements peut cependant rester dépendante de la disponibilité d'emplacements et de la marge de manœuvre dans le temps et l'organisation de l'exploitation. Au-delà des pratiques de gestion du cheptel, la capacité d'adaptation des systèmes apicoles, comme d'autres systèmes d'élevage, repose sur un ensemble de leviers qui peuvent être liés

à la gestion des ressources de l'exploitation, à son organisation ou aux réseaux dans lesquels elle s'inscrit (Kouchner et al., 2019). La diversité des productions et des ressources, les sources d'informations du producteur et l'intégration de ces informations dans son système, les choix de commercialisation contribuent ainsi à la capacité d'adaptation des exploitations (Darnhofer et al., 2010 ; Ingrand et al., 2017). La place laissée à ces différents leviers et leur contribution à la capacité d'adaptation de chaque exploitation peut ainsi varier selon les contraintes et opportunités de l'exploitation, et surtout selon les objectifs de chaque producteur (Rigolot et al., 2019). Si la gestion du cheptel de certaines exploitations est peu adaptable, d'autres leviers peuvent ainsi contribuer à sa capacité d'adaptation.

3.2 Limites et perspectives

Parmi les paramètres du modèle, plusieurs peuvent varier plus ou moins fortement d'une année à l'autre dans le contexte actuel de la filière apicole française. C'est le cas principalement du prix du miel, des rendements des colonies, et des taux de pertes et affaiblissements de colonies. Les pertes considérées ici correspondent aux pertes moyennes sur plusieurs années, mais en 2017-18, les pertes hivernales moyennes de colonies pouvaient aller de 2 à 33 %, avec une variabilité importante d'une année à l'autre et entre régions d'Europe (Gray et al., 2019). L'utilisation d'un modèle stochastique pour prendre en compte cette variabilité apparaît donc comme une suite intéressante à ce travail. Au-delà des stratégies mises en place sur l'exploitation (élevage de reines ou non, niveau de disponibilité en reines), l'analyse plus fine de la distribution des options de gestion permettant de maintenir le système dans le noyau de viabilité permettrait par ailleurs de mieux cerner les rôles respectifs des différentes pratiques dans la viabilité du système.

Conclusion

La modélisation des principales pratiques de gestion du renouvellement du cheptel fait apparaître la difficulté pouvant exister à concilier différents objectifs d'une exploitation apicole (ici des objectifs de revenus, de temps de travail et d'adaptabilité des pratiques) et les impacts possibles de certains choix techniques sur la viabilité de l'exploitation. Les conséquences possibles en termes d'adaptabilité apparaissent donc comme un élément à considérer dans les choix de pratiques de gestion du cheptel. Si les pratiques de gestion du cheptel sont peu adaptables dans certaines situations, d'autres leviers peuvent cependant être mobilisés et contribuer à la capacité d'adaptation de l'exploitation, propriété nécessaire pour assurer sa durabilité dans un contexte de production variable et difficilement prévisible.

Remerciements

Nous remercions sincèrement les apiculteurs ayant accepté de participer aux différentes enquêtes citées, et dont les données ont été mobilisées ici et ont permis de réaliser ce travail. Nous tenons également à remercier Félicie Aulanier pour son aide précieuse sur tous les aspects économiques, ainsi que l'ensemble des partenaires du projet Durapi qui ont contribué à ce travail. Ces travaux ont été notamment réalisés dans le cadre du projet Durapi (Casdar Innovation et Partenariat n°5567) et avec un soutien financier de l'ANRT (CIFRE n°2016/0304).

Références bibliographiques

ADA France, 2017. Le statut social des apiculteurs. ADA France infos 20.

ADA Occitanie, 2018. Facteurs de réussite en apiculture professionnelle. Premiers résultats d'une enquête nationale 2017.

- Adriansen H.K., 2005. Pastoral Mobility: A Review. *Nomad. People.* 9, 207–214. <https://doi.org/10.3167/082279405781826182>
- Aubin J.-P., 1991. *Viability theory. Systems and control: foundations and applications.*, Birkhauser Ed. Boston, USA.
- Cournut S., Chauvat S., Correa P., Santos Filho J.C. Dos, Diéguez F., Hostiou N., Pham D.K., Servière G., Sraïri M.T., Turlot A., Dedieu B., 2018. Analyzing work organization on livestock farm by the Work Assessment Method. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0534-2>
- Darnhofer I., Bellon S., Dedieu B., Milestad R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 545–555. <https://doi.org/10.1051/agro/2009053>
- Durant J.L., 2019. Where have all the flowers gone? Honey bee declines and exclusions from floral resources. *J. Rural Stud.* 65, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.10.007>
- Gray A., Brodschneider R., Adjlane N., Ballis A., Brusbardis V., Charrière J.-D., Chlebo R., Coffey M.F., Cornelissen B., Amaro da Costa C., Csaki T., Dahle B., Danihlík J., Drazic M.M., Evans G., Fedoriak M., Forsythe I., de Graaf D., Gregorc A., Johannesen J., Kauko L., Kristiansen P., Martikkala M., Martin-Hernandez R., Medina-Flores C.A., Mutinelli F., Patalano S., Petrov P., Raudmets A., Ryzhikov V.A., Simon-Delso N., Stevanovic J., Topolska G., Uzunov A., Vejsnaes F., Williams A., Zammit-Mangion M., Soroker V., 2019. Loss rates of honey bee colonies during winter 2017/18 in 36 countries participating in the COLOSS survey, including effects of forage sources. *J. Apic. Res.* <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1615661>
- Ingrand S., Astigarraga L., Chia E., Coquil X., David C., Fiorelli J.-L., 2017. Securing Sustainable Livestock Production Systems in an Uncertain Economic Climate: Nurturing Flexibility and Resilience, in: Sekkin, S. (Ed.), *Livestock Science.* pp. 1–17. <https://doi.org/10.5772/65087>
- ITSAP-Institut de l'Abeille, GPGR, ADAPIC, ADA NA, ADA AURA, Syndicat AOP Miel de Corse - Mele di Corsica, APPNP, ADA BFC, ADAPI, ADA Occitanie, GIE Elevage Bretagne / ADA Bretagne, 2018. Réseau d'exploitations apicoles de références, années 2011-2016.
- Kouchner C., Ferrus C., Blanchard S., Decourtye A., Basso B., Le Conte Y., Tchamitchian M., 2019. Bee farming system sustainability: An assessment framework in metropolitan France. *Agric. Syst.* 176, 102653.
- Nozières M.O., Moulin C.H., Dedieu B., 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal* 5, 1442–1457. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000486>
- Rigolot C., Martin G., Dedieu B., 2019. Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement. *INRA Prod. Anim.* 32, 1–12.
- Sabatier R., Oates L.G., Brink G.E., Bleier J., Jackson R.D., 2015a. Grazing in an uncertain environment: Modeling the trade-off between production and robustness. *Agron. J.* 107, 257–264. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0357>
- Sabatier R., Oates L.G., Jackson R.D., 2015b. Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory. *Agric. Syst.* 139, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.008>
- Scoones I., Leach M., Smith A., Stagl S., Stirling A., Thompson J., 2007. *Dynamic Systems and the challenge of Sustainability, STEPS Working Paper 1.*
- Tessema W.K., Ingenbleek P.T.M., Van Trijp H.C.M., 2014. Pastoralism, sustainability, and marketing. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 75–92. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0167-4>
- Tichit M., Ingrand S., Moulin C.-H., Cournut S., Lasseur J., Dedieu B., 2008. Capacités d'adaptation du troupeau : la diversité des trajectoires productives est-elle un atout ?, in: Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.-H., Tichit M. (Eds.), *L'élevage En Mouvement. Flexibilité et Adaptation Des Exploitations d'herbivores.* Versailles, France, p. 294.

Annexe : équations et paramètres

Dynamiques du système

Les dynamiques d'évolution des deux états (colonies productives et improductives) sont données par l'équation suivante (eq. 1) :

$$\begin{cases} x_0(t+1) = S_0(X(t), U(t))x_0(t) + T_{1,0}(X(t), U(t))x_1(t) - T_{0,1}(X(t), U(t))x_0(t) + N_0(X(t), U(t))u_0(t) \\ x_1(t+1) = S_1(X(t), U(t))x_1(t) + T_{0,1}(X(t), U(t))x_0(t) - T_{1,0}(X(t), U(t))x_1(t) + N_1(X(t), U(t))u_0(t) \end{cases}$$

avec $X(t)$ l'état du cheptel au temps t et $U(t)$ la valeur des options de gestion (contrôles) au temps t :

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_0(t) \\ x_1(t) \end{pmatrix} \quad (\text{eq. 2})$$

avec $x_0(t)$ le nombre de colonies improductives au temps t et $x_1(t)$ le nombre de colonies productives au temps t .

$$U(t) = \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \quad (\text{eq. 3})$$

avec $u_0(t)$ le nombre de colonies créées à partir des colonies productives, $u_1(t)$ la proportion des reines disponibles introduites dans des colonies productives, $u_2(t)$ la proportion des reines disponibles introduites dans les nouvelles colonies lors de leur création, $(1-u_1-u_2)$ étant alors la proportion des reines disponibles introduites dans les colonies improductives au temps t .

S_0 et S_1 représentent les fonctions de survie respectives des colonies improductives (x_0) et productives (x_1), $T_{1,0}$ l'affaiblissement des colonies ou la transition de l'état productif vers l'état improductif, $T_{0,1}$ l'entrée en production ou la transition de l'état improductif vers l'état productif, N_0 la création de colonies improductives pour l'année en cours et N_1 la création de colonies qui entrent en production dès leur année de production. Ces différentes fonctions sont données par les équations 4 à 9.

Fonctions de survie

$$S_0(X(t), U(t)) = \min \left[1, s_0 + s_0^+ \frac{\phi(1-u_1(t)-u_2(t))}{x_0(t)} - 0,5, \alpha \right] \quad (\text{eq. 4})$$

$$S_1(X(t), U(t)) = \min \left[1, s_1 + s_1^+ \frac{\phi u_1(t)}{x_1(t)} \right] \quad (\text{eq. 5})$$

avec ϕ le nombre total de reines disponibles pour introduction dans les colonies, s_0 le taux de survie des colonies improductives et s_0^+ l'amélioration de ce taux en cas d'introduction d'une reine dans ces colonies, α la part de colonies improductives étant regroupées deux à deux pour former des colonies productives, s_1 le taux de survie des colonies productives et s_1^+ l'amélioration de ce taux en cas d'introduction de reines dans ces colonies.

Fonctions de transition entre les états

$$T_{0,1}(X(t), U(t)) = \min \left[1, t_{0,1} + t_{0,1}^+ \frac{\phi(1-u_1(t)-u_2(t))}{x_0(t)} + 0,5, \alpha \right] \quad (\text{eq. 6})$$

$$T_{1,0}(X(t), U(t)) = \max \left[0, \min \left[1, t_{1,0} - t_{1,0}^+ \frac{\phi u_1(t)}{x_1(t)} + \mathbb{1}_{\{u_0 \geq \beta x_1(t)\}} \left(\frac{u_0(t)}{x_1(t)} - \beta \right) \right] \right] \quad (\text{eq. 7})$$

avec t_{0_1} le taux de transition de l'état improductif à l'état productif (taux d'entrée en production) et $t_{0_1}^+$ l'amélioration de ce taux en cas d'introduction de reines dans les colonies improductives, t_{1_0} le taux de transition de l'état productif à l'état improductif (taux d'affaiblissement) et $t_{1_0}^+$ la réduction de ce taux en cas d'introduction de reines dans les colonies productives et $\mathbb{1}_{\{u_0 \geq \beta x_1(t)\}}$ la fonction caractéristique prenant la valeur 1 ou 0 selon le rapport du nombre de nouvelles colonies créées (u_0) sur le nombre de colonies productives, comparé au seuil β de la proportion d'essaims pouvant être réalisés à partir des colonies productives sans pénaliser celles-ci et les rendre improductives.

Fonctions de création de colonies

$$N_0(X(t), U(t)) = (1 - \varepsilon_1) \left(1 - \min \left[1, \frac{\varphi u_2(t)}{u_0(t)} \right] \right) \quad (\text{eq. 8})$$

$$N_1(X(t), U(t)) = (1 - \varepsilon_1) \min \left[1, \frac{\varphi u_2(t)}{u_0(t)} \right] \quad (\text{eq. 9})$$

avec ε_1 le taux d'échec lors de la création d'une nouvelle colonie à partir d'une colonie productive.

Contraintes

Les contraintes du système sont un nombre de colonies productives minimal à l'horizon temporel (eq. 10), un revenu annuel minimal (eq. 11), un temps de travail disponible en saison apicole (eq. 12), un nombre maximal de colonies pouvant être créées à partir des colonies productives sans les affaiblir (eq. 14) et un nombre de reines à allouer : la somme des proportions de reines attribuées aux différents lots de cheptels (colonies productives, improductives, et lors de la création de nouvelles colonies) ne peut dépasser 1 (eq. 13).

$$x_1(T) \geq x_1^b \quad (\text{eq. 10})$$

$$I(X(t), U(t)) \geq I^b \quad (\text{eq. 11})$$

$$\tau(X(t), U(t)) \leq \theta \quad (\text{eq. 12})$$

$$u_1(t) + u_2(t) \leq 1 \quad (\text{eq. 13})$$

$$u_0(t) \leq 2\beta x_1(t) \quad (\text{eq. 14})$$

avec T le pas de temps maximal considéré (l'étendue de la simulation), x_1^b le nombre minimal de colonies productives à la fin de la période considérée, I la fonction de revenu, I^b le revenu minimal par an, τ la fonction de temps passé à la gestion de l'exploitation et θ le temps disponible par saison apicole pour l'ensemble des personnes travaillant sur l'exploitation.

Fonction de revenu

Le revenu généré à chaque pas de temps est calculé via l'équation suivante :

$$I(X(t), U(t)) = \xi_h \cdot Q_h \cdot x_1(t) - \xi_{u_0} u_0(t) - \xi_x (\varepsilon_x \cdot x_0(t) + x_1(t)) - \xi_n (N_1(t) + T_{0_1} \cdot x_0(t)) - \xi_q \varphi(x_1(t), x_0(t)) - \xi_s - \xi_{qb} - \xi_w \quad (\text{eq. 15})$$

avec ξ_h le prix de vente d'une unité de miel, Q_h la quantité de miel produite par colonie productive et par an, ξ_{u_0} le coût de création d'une nouvelle colonie (nourrissement lors de la création de la colonie), ξ_x le coût annuel d'entretien d'une colonie productive (remplacement de cadres, gestion sanitaire, entretien des ruches, nourrissement) et ε_x le ratio du coût d'entretien d'une colonie improductive sur celui d'une colonie productive, ξ_n le coût de transition d'une colonie improductive à une colonie productive (nouveaux cadres), ξ_s les coûts structurels de fonctionnement de l'exploitation dont les coûts de déplacements, ξ_w les charges salariales annuelles, ξ_q le coût d'achat d'une reine s'il n'y a pas d'élevage sur l'exploitation et ξ_{qb} les charges structurelles liées à la mise en place d'un atelier d'élevage de reines.

Fonction de temps passé en saison apicole

Le temps passé par saison apicole à l'ensemble des activités de l'exploitation (gestion du cheptel, récoltes, extraction du miel, commercialisation...) est calculé via l'équation suivante (eq. 16) :

$$\tau(X(t), U(t)) = \tau_0 \cdot u_0(t) + \tau_d \left\lceil \frac{u_0(t)}{n_n} \right\rceil + \tau_r \cdot \varphi(t) \cdot (1 - u_2(t)) + \tau_d \left\lceil \frac{\varphi(x_1(t), x_0(t))(1 - u_2)}{n_r} \right\rceil + \tau_q \varphi(x_1(t), x_0(t)) + \tau_x \cdot (x_1(t) + x_0(t)) + \tau_1 \cdot x_1(t) + \tau_e \cdot Q_h(x_1(t) + \varepsilon_h x_0(t)) + \tau_s$$

avec τ_0 le temps passé à la production d'une nouvelle colonie, dont le temps d'introduction d'une reine le cas échéant, τ_d le temps de déplacement pour se rendre sur les ruchers donc le temps minimal passé lors d'une activité sur un rucher, n_n le nombre maximal de nouvelles colonies pouvant être réalisées par jour, τ_r le temps par remérage (remplacement d'une reine) de colonie (dans une colonie productive comme improductive), n_r le nombre maximal de colonies pouvant être remérées par jour, τ_q le temps d'élevage par reine, τ_x le temps d'entretien par colonie productive ou improductive, τ_1 le temps de transhumances et récoltes de miel par colonie productive, τ_e le temps d'extraction par unité de miel produite, et τ_s le temps passé aux autres activités de gestion de l'exploitation pendant la saison apicole (dont la commercialisation). $\lceil \cdot \rceil$ correspond à l'arrondi à l'entier supérieur.

Paramètres utilisés

Tableau 1 : Valeurs et sources des paramètres utilisés. Sources : 1 : enquêtes auprès de 50 apiculteurs professionnels réalisées dans le cadre du projet Durapi¹, 2018 (enquête renouvellement du cheptel apicole et temps de travail en exploitation) ; 2 : expérimentations sur le renouvellement du cheptel apicole, projet Durapi, 2018 ; 3 : Réseau d'Exploitations apicoles de Référence (ITSAP-Institut de l'abeille, 2018) ; 4 : Informations sur le statut social des apiculteurs, ADA France, 2017 ; 5 : enquête auprès d'apiculteurs professionnels, ADA Occitanie, 2018.

Paramètre	Description	Exploitation 1	Exploitation 2	Sources de la donnée
φ	Proportion de reines disponibles pour introduction par rapport à la taille du cheptel	0.3	0.5	1
s_0	Taux de survie des colonies improductives	0.74	0.74	2
s_0^+	Amélioration du taux de survie des colonies improductives en cas d'introduction de reines	0.19	0.19	2
s_1	Taux de survie des colonies productives	0.7	0.825	2
s_1^+	Amélioration du taux de survie des colonies productives en cas d'introduction de reines	0.08	0.08	2
B	Taux maximal de colonies improductives pouvant être créées sans affaiblir les colonies productives	0.5	0.5	1
t_{0_1}	Taux de transition de l'état improductif à productif (taux d'entrée en production)	0.5	0.5	2
$t_{0_1}^+$	Amélioration du taux d'entrée en production en cas d'introduction de reines	0.3	0.3	2
t_{1_0}	Taux de transition de l'état productif à improductif (taux d'affaiblissement)	0.1	0.22	1
$t_{1_0}^+$	Réduction du taux d'affaiblissement en cas d'introduction de reines	1	1	1
ε_1	Taux d'échec lors de la création d'une nouvelle colonie (taux de mortalité des nouvelles colonies)	0.1	0.1	2
α	Proportion des colonies improductives étant regroupées deux à deux pour former des colonies productives	0.1	0.1	1

¹ <http://blog-itsap.fr/projet-itsap-demarrage-projet-durapi-1er-janvier-2016/>

	(2 x0 = 1 x1)			
T	Fin de la période de simulation	10 ans	10 ans	
x_1^b	Nombre minimal de colonies productives à la fin de la période	200 colonies	200 colonies	4
l^b	Revenu minimal annuel issu de la vente du miel (hors revenus des autres produits ou services de l'exploitation)	10 900 €/an	12 200 €/an	1, 5
ξ_h	Prix de vente du miel	8.9 €/Kg en vente directe	6.2 €/Kg en vrac	3
Q_h	Production moyenne annuelle par colonie productive	24.2 Kg/colonie productive	31.1 Kg/colonie productive	3
ξ_{u0}	Coût de création d'une nouvelle colonie	2.7 €/colonie créée	5.4 €/colonie créée	3
ξ_x	Coût annuel d'entretien d'une colonie productive	28.9 €/colonie productive	26.1 €/colonie productive	3
ϵ_x	Ratio du coût d'entretien d'une colonie improductif par rapport à celui d'une colonie productive	0.40	0.87	3
ξ_n	Coût de transition d'une colonie improductive à productive	6.2	6.2	3
ξ_q	Coût d'achat d'une reine	0	0	Pas d'achat
ξ_s	Coûts structurels de l'exploitation (dont déplacements - hors salaires)	54000 €/an	55000 €/an	3
ξ_{qb}	Coûts structurels d'un atelier d'élevage de reines	80 €/an	80 €/an	3
ξ_w	Charges salariales	23 164 €/an	16 280 €/an	3
τ_0	Temps de création d'une nouvelle colonie, dont temps d'introduction de reine s'il y a lieu	0.09 jour/colonie	0.10 jour/colonie	1
τ_d	Temps de trajet pour les ruchers (temps minimal à passer lors d'un travail sur un rucher)	0.125 jour	0.125 jour	1
n_n	Nombre maximal de colonies créées par jour	11	10	1
τ_r	Temps de remérage d'une colonie (remplacement de reine)	0.02 jour/reine	0.012 jour/reine	1
n_r	Nombre de reines pouvant être remplacées par jour	36 reines	63 reines	1
τ_q	Temps d'élevage par reine	0.10 jour/reine	0.06 jour/reine	1
τ_x	Temps d'entretien par colonie	0.17 jour/colonie	0.08 jour/colonie	1
τ_1	Temps de récolte et transhumance par colonie productive	0.27 jour/colonie productive	0.16 jour/colonie productive	1
τ_e	Temps d'extraction du miel	0.0017 jour/Kg	0.0017 jour/Kg	1
τ_s	Temps passé aux autres activités de l'exploitation en saison apicole	373 jours	62.25 jours	1
θ	Temps disponible par saison apicole pour l'ensemble des personnes travaillant sur l'exploitation	790 jours	812 jours	1

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).