

## Chapitre 12

# Modélisation des processus décisionnels : application à la gestion de l'eau

JACQUES-ÉRIC BERGEZ ET ANNE BIARNÈS

Sur les territoires, différents acteurs prennent des décisions qui impactent les ressources en eau : les agriculteurs pour commencer la campagne d'irrigation ou réaliser un traitement phytosanitaire, le gestionnaire de retenues pour lâcher de l'eau en soutien au débit d'étiage, le préfet pour interdire les prélèvements d'eau ou rendre obligatoire un programme de reconquête de la qualité de l'eau sur un captage d'eau potable. Pouvoir modéliser ces décisions et simuler les actions qui en résultent est important afin de bien comprendre et simuler le fonctionnement du système socio-hydro-agronomique. C'est un préalable nécessaire à des applications utiles destinées par exemple :

- d'une part, aux gestionnaires et aux décideurs publics pour évaluer les décisions actuelles au regard de nouveaux contextes climatiques ou réglementaires et pour élaborer une vision prospective de la gestion de l'eau ;
- d'autre part, aux techniciens de chambre d'agriculture et des instituts techniques pour aider à la formulation de conseils renouvelés suite à des changements de contexte.

Comme tout modèle, les modèles de décision sont des représentations partielles et simplifiées (Bouleau, 1999) de la réalité confinée à l'objet d'étude, ici la gestion intégrée de l'eau à différentes échelles d'espace, de temps et d'entités de gestion. Ce chapitre a pour but de montrer comment modéliser les décisions des acteurs et comment la simulation des actions qui en résultent contribue à l'analyse du fonctionnement des socio-hydro-agrosystèmes. Nous nous appuyerons essentiellement sur des exemples concernant des décisions de conduite des productions dans les exploitations agricoles ayant un impact sur la ressource en eau à l'échelle des territoires.

Ce chapitre est structuré en cinq sections. La première section montre, à travers un exemple, l'importance de modéliser les décisions. La deuxième section, plus théorique, s'intéresse aux questions de rationalité des acteurs et aux temporalités d'action. La troisième section présente les principaux formalismes de modélisation des décisions. La quatrième section développe la construction même du modèle de décision. La cinquième section s'intéresse à l'utilisation d'un modèle de décision pour résoudre un problème de décision.

## ► De l'importance de modéliser les décisions : exemple

Prenons un exemple simple : un agriculteur doit débiter une campagne d'irrigation sur une sole de maïs. Dans de nombreux modèles, modèles de culture ou modèles de territoire pour gérer une ressource, la prise de décision correspond au choix d'une date d'arrosage et d'une quantité d'eau à apporter. Ainsi, la décision de l'agriculteur serait représentée par « débiter la campagne d'irrigation le 15 juin avec un apport de 30 mm d'eau correspondant à un tour d'eau moyen avec enrouleur ». En réalité, les choix de la date et de la quantité d'eau dépendent :

- des contraintes externes à l'exploitation agricole liées au contexte de l'année. Ainsi, les conditions climatiques influent sur l'importance et la précocité des besoins en irrigation – liés à la pluie et à l'ETP, au développement foliaire, à la quantité d'eau disponible dans le sol – et sur le développement du maïs résultant de la somme de températures actives. L'eau disponible pour l'agriculteur dépend également des conditions climatiques annuelles, en particulier du niveau de remplissage de sa retenue et des décisions de restriction ou d'interdiction de prélèvement dans les rivières ou les nappes prises par le gestionnaire de la retenue ;

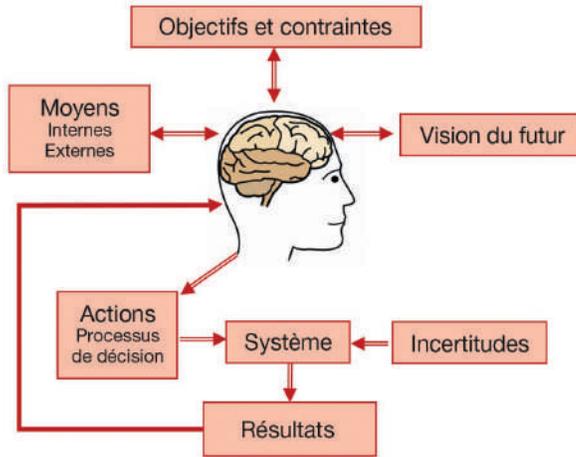
- des contraintes internes à l'exploitation agricole. Elles sont notamment liées aux décisions de l'agriculteur concernant la conduite technique de sa sole de maïs, l'évolution des caractéristiques structurelles de l'exploitation et les compromis à réaliser entre production, impact environnemental et viabilité du système. L'agriculteur peut modifier les besoins d'irrigation de sa culture en jouant sur la précocité du maïs semé car l'atteinte des stades de forte sensibilité au déficit en eau dépend de la précocité des variétés. L'agriculteur peut aussi décider de satisfaire pleinement ou non la demande en eau de sa culture en fonction de son objectif de réduire ou non les coûts des intrants (énergie de fonctionnement, coûts de l'eau) et les investissements : par exemple, il peut investir dans du matériel d'irrigation permettant de réaliser des apports importants et rapidement et ainsi de décaler les calendriers d'irrigation.

En fonction de ces différentes contraintes, la date de la première irrigation peut fortement changer d'une exploitation agricole à une autre, d'une situation géographique à une autre ; de même que la dose d'eau apportée lors de la première irrigation. Au niveau d'un bassin versant, l'hétérogénéité d'apports (en dose ou en temporalité) peut avoir un impact fort sur les demandes en eau et donc, sur la gestion des lâchers des retenues (Maton *et al.*, 2005).

## ► Rationalités et temporalités

### Rationalités

La décision d'un acteur, quel qu'il soit, dépend de différents éléments (figure 12.1). Tout d'abord, l'acteur a des objectifs propres et des contraintes qui peuvent être très divers. Ainsi, un agriculteur peut chercher à maximiser son revenu, tout en essayant de conserver du temps libre pour sa famille et limiter l'impact de ses pratiques sur l'environnement. Un préfet, quant à lui, doit faire respecter la loi tout en maintenant une paix sociale sur le territoire dont il est responsable. Un gestionnaire de l'eau voudra satisfaire les besoins des différents usagers tout en optimisant la quantité d'eau disponible dans sa ressource – ne pas trop en utiliser, mais ne pas trop en laisser – et en veillant à sa qualité.



**Figure 12.1.** Fonctionnement du processus de décision menant à l'action d'un acteur (Attonaty et Cerf, 2001).

Ensuite, l'acteur possède une vision du futur. Cette vision peut être à quelques jours – le climat des prochains jours – ou beaucoup plus lointaine en fonction des décisions à prendre – évolution des surfaces en cultures irriguées dans les dix prochaines années par exemple. En fonction des moyens dont il dispose, – moyens pouvant être internes (cognitifs, financiers) ou externes (réseaux) –, et d'un processus de décision, l'acteur va décider d'une action. La décision est prise dans un environnement incertain : climat, disponibilité en eau, risque de panne d'un équipement, etc. Cette action aura un impact sur le socio-hydro-agrosystème. Les différents résultats de l'action compléteront la base de connaissances de l'acteur.

## Temporalités

Souvent, trois niveaux de décision sont différenciés, ils correspondent à des temporalités différentes (Risbey *et al.*, 1999) avec néanmoins des variations selon les acteurs concernés.

**La décision stratégique.** La décision est prise pour un futur assez éloigné. Pour un gestionnaire de l'eau, il peut s'agir de la construction d'une retenue. Pour un agriculteur, cela peut être l'achat d'un équipement d'irrigation, d'un équipement pour la réalisation des traitements phytosanitaires ou du choix entre production conventionnelle et production biologique. Il s'agit fréquemment d'un choix sur plusieurs années.

**La décision tactique.** Il peut s'agir d'une révision de la stratégie à l'aune de nouvelles informations ou d'une décision à un horizon de temps plus proche. Pour un gestionnaire, la décision peut concerner un planning de lâchers. Pour un agriculteur, la décision peut être en rapport avec le choix d'un assolement irrigué ou non irrigué afin d'économiser des quantités d'eau d'irrigation, de gérer les adventices, ou un choix de techniques d'entretien du sol.

**La décision opérationnelle.** Il s'agit d'une décision pour l'action immédiate : interdire une irrigation ou définir les dates de traitement obligatoire de la vigne contre

le vecteur de la flavescence dorée (préfet), faire un lâcher de barrage (gestionnaire de l'eau), décider d'irriguer ou de réaliser un désherbage chimique (agriculteur), etc.

Ces trois types de décision diffèrent dans l'immédiateté et dans le type d'informations mobilisées. Ainsi, les décisions stratégiques mobilisent des informations sur un futur inconnu. Il s'agit donc plus particulièrement de tendances ou de prévisions à long terme. Les décisions tactiques mobilisent des données à caractère un peu moins tendanciel. Quant aux décisions opérationnelles, elles mobilisent des données en temps réel ou presque. Le modèle NAMASTE présenté dans l'encadré 12.1 (Robert *et al.*, 2018) mobilise ces trois temporalités pour simuler les décisions d'agriculteurs face à la raréfaction de la ressource en eau en Inde.

### ► Du formalisme de la règle de décision à l'élaboration de différentes structures de modèle de décision

Un modèle de décision permet de simuler les actions des acteurs. La base du modèle de décision est la règle de décision. Dans sa forme la plus simple, il s'agit d'une fonction qui relie l'état d'un système à une action (Bergez *et al.*, 2006b) :

**Si** < Indicateur > < Opérateur > < Seuil > **Alors** < Action 1 > **Sinon** < Action 2 >

Pour un agriculteur, le système sera par exemple constitué de son système de production et son environnement externe.

Les indicateurs sont des variables ou des combinaisons de variables du système. Ils représentent l'état du système à un moment donné, le moment de la décision. Ils peuvent être très variés. Le choix des indicateurs au sein des règles de décision est une étape importante de la modélisation. Une première contrainte est qu'ils soient directement issus de l'observation, de bases de données telles que les bulletins d'avertissements agricoles par exemple ou d'une simulation réalisée à partir d'un modèle. Outre son aspect accessible, l'indicateur doit être porteur de sens pour les acteurs lorsque l'on veut valider auprès d'eux la représentation de leurs décisions.

Les opérateurs sont classiquement du type «égal à», «supérieur à», «inférieur à» et «entre».

Les seuils correspondent aux niveaux atteints par l'indicateur pour effectuer ou non l'action et/ou appliquer une modalité particulière de réalisation.

Un exemple de règles est donné dans l'encadré 12.2 présentant le modèle DIVHINE (Martin-Clouaire *et al.*, 2016).

Une modélisation à l'aide de règles de décision permet de créer par simulation une variabilité des modalités et des dates des opérations techniques réalisées par les agriculteurs d'un territoire. Cela revient à augmenter ainsi le réalisme de la simulation obtenue par rapport à la représentation d'une conduite homogène sur le territoire ou pour les différentes années climatiques (modalité et date constantes pour chaque opération technique). En effet, conduire une culture nécessite de s'adapter continuellement. D'une année à l'autre, l'agriculteur ou le gestionnaire ne fait pas les mêmes choix aux mêmes moments. Le climat varie, les pressions parasitaires changent, les ressources évoluent, les contraintes aussi, etc.

### **Encadré 12.1. Exemple d'un modèle de type biodécisionnel : le modèle NAMASTE.**

Le modèle NAMASTE (Robert *et al.*, 2018) est un modèle dynamique de type biodécisionnel, c'est-à-dire un modèle qui couple un modèle du système biophysique et un modèle de décision des acteurs du système. Il a été développé pour simuler les prises de décision d'agriculteurs face à la raréfaction de la ressource en eau au sein d'un bassin versant en Inde en raison du changement climatique et de la surexploitation de la nappe. Pour représenter la décision des agriculteurs, un recueil de données issues d'une enquête auprès de 700 agriculteurs a été nécessaire, ainsi qu'un entretien d'approfondissement avec une trentaine d'entre eux (Robert *et al.*, 2017b).

L'originalité du modèle NAMASTE est de représenter les trois étapes de décisions suivantes pour chaque agriculteur.

#### **La décision stratégique**

La décision stratégique concerne le choix d'investir ou non dans du matériel d'irrigation, par exemple creuser un nouveau puits de forage ou se procurer une nouvelle pompe et le choix du système de culture permettant de valoriser l'investissement ou le non-investissement. Ces choix sont effectués en maximisant une fonction d'utilité basée sur le revenu de l'agriculteur (Robert *et al.*, 2017a). Ils tiennent compte de la vision de l'agriculteur sur l'évolution du climat, de l'état de la nappe et des prix à long terme. Cette étape de décision est révisée tous les ans. Elle a un effet à long terme sur toute l'exploitation agricole en raison de la longue durée des prêts et de la durée de vie des équipements. Le système de culture est décliné sous forme d'un plan d'action décrivant l'assolement et la succession d'opérations culturales prévues pour chaque culture.

#### **La décision tactique**

Décrite sous forme de règles de décision, la décision tactique permet d'adapter en début de saison culturale le plan d'action concernant l'assolement choisi au niveau stratégique aux conditions de l'année en cours (climat, niveau de la nappe, prix observés). Une règle de décision de changement de plan est par exemple : «Si pas de pluie depuis trois mois je diminue la sole de curcuma irriguée» ou «je prévois de ne pas irriguer telle culture».

#### **Les décisions opérationnelles**

Elles correspondent à la mise en œuvre du plan d'action au cours de la saison culturale. À ce niveau, ce plan d'action est précisé sous forme de règles de décision qui permettent d'adapter les opérations culturales à mener en fonction de l'état du système biophysique et des contraintes de ressources. Cette étape de décision couvre toute la saison sur un pas de temps quotidien.

Une autre caractéristique originale est l'interaction dynamique intégrée de différents sous-systèmes qui construisent le système de production de l'exploitation agricole :

- un modèle de culture représentant le fonctionnement biophysique d'une parcelle ;
- un modèle de pompe représentant le prélèvement d'eau dans la nappe ;
- un modèle de nappe représentant l'évolution de la nappe en fonction des prélèvements et des recharges.

Un modèle de décision correspond à l'agrégation de plusieurs règles de décision, de types variés dépendant du problème à résoudre. Ainsi, pour la conduite technique de la sole d'une culture, Aubry *et al.* (1998) ont proposé un modèle conceptuel basé sur l'identification de cinq types de règles de décision :

- 1. des règles d'ordonnancement chronologique des opérations à réaliser ;
- 2. des règles de constitution des modalités d'intrants (natures et quantités d'intrants pour chaque opération) et de chantiers (combinaisons de matériel et main-d'œuvre nécessaires à la réalisation des différentes opérations) ;
- 3. des règles de déclenchement et de fin indiquant quand commencer une opération et quand l'arrêter ;
- 4. des règles d'arbitrage pour ordonner les opérations à mener sur différentes cultures ou différentes parcelles lorsque les positionnements temporels souhaitables se recoupent et que les moyens en matériels et main-d'œuvre ne permettent pas de les réaliser simultanément ;
- 5. des règles d'attribution des différentes modalités à des groupes de parcelles lorsque plusieurs modalités sont possibles pour une même opération. Les itinéraires techniques mis en œuvre une année donnée sur les différentes parcelles de la sole résultent de la mise en œuvre de ces règles.

### **Encadré 12.2. Exemple d'un modèle de décision : le modèle DIVHINE.**

La réduction des risques de contamination des eaux de surface et souterraines par les pesticides est un enjeu important en région viticole méditerranéenne, du fait de risques élevés liés à l'importance des écoulements de surface et aux usages de pesticides. Le modèle DIVHINE (Martin-Clouaire *et al.*, 2016) a été développé pour simuler les itinéraires techniques sur vigne résultant des stratégies de conduite du vignoble dans les exploitations d'un bassin versant viticole. Le but est l'évaluation de leurs impacts sur les flux de ruissellement polluants (Biarnès *et al.*, 2017; voir chapitre 19).

#### **Présentation du modèle DIVHINE**

Dans le modèle DIVHINE, les itinéraires techniques sont simulés conjointement pour chacune des parcelles d'une exploitation viticole ou de plusieurs exploitations viticoles. Pour chaque exploitation, les itinéraires techniques sont le résultat de la mise en œuvre d'une stratégie de conduite du vignoble, dans un contexte climatique et phytosanitaire donné, sous contrainte des ressources en matériel et main-d'œuvre de l'exploitation et des caractéristiques de son vignoble. La stratégie de conduite est basée sur :

- un plan d'action qui définit une liste flexible de chantiers d'opérations culturales à réaliser au cours d'un cycle cultural ;
- des règles de décisions, basées ou non sur des indicateurs, qui précisent la façon dont ces chantiers sont réalisés.

#### **Exemple de règles de décision**

Un exemple de règles de décision est donné dans le tableau 12.1 pour les traitements anti-oïdium « de base » sur vigne dans une exploitation localisée sur la commune l'Alignan-du-Vent (département de l'Hérault). Les traitements anti-oïdium comprennent des traitements systématiquement réalisés (dits « de base ») et des traitements optionnels.

**Tableau 12.1.** Règles de décisions pour les traitements anti-oidium « de base ».

Règle de décision	Indicateur	Opérateur	Seuil	Valeur
R1 - Choix des modalités de chantier	Largeur des interrangs	égale à	2,5 m	1 tracteur + 1 pulvérisateur + 1 rampe verticale + 1 tractoriste
		égale à	1,6 m	1 machine à dos + 1 travailleur manuel
R2 - Déclenchement du premier traitement	Stade du cépage Carignan	égal à	5-6 feuilles	Premier traitement à réaliser dès que possible
R3 - Déclenchement d'un nouveau traitement	Date du dernier chantier	égale à	11 jours, si les avertissements agricoles indiquent un risque élevé de développement de l'oidium. 14 jours, dans le cas contraire.	Nouveau traitement à réaliser dès que possible
R4 - Arrêt des traitements	Stade du cépage Carignan	égal à	Début véraison	Nouveau traitement impossible
R5 - Arbitrage entre chantiers concurrents	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Chantier de traitements de base prioritaire sur tous les autres chantiers (règle nominale)
R6 - Ordre de passage des parcelles	Sans objet	Sans objet	Sans objet	De l'îlot de parcelles le plus proche à l'îlot le plus lointain (règle nominale)

Les règles présentées ci-dessus concernent la définition des modalités possibles du chantier et les dates des différents traitements. Dans l'exemple présenté, le Carignan est utilisé comme cépage guide pour le choix des dates de démarrage et d'arrêt des traitements sur l'ensemble du vignoble de l'exploitation. Les dates de changement des stades phénologiques du cépage guide sont issues d'une base de données régionale. Les avertissements agricoles régionaux (Performance vigne®) sont utilisés pour apprécier le niveau de pression sanitaire (Paré, 2011). Les règles portant sur la constitution des modalités d'intrants – le choix des produits et des quantités appliquées – ne sont pas présentées.

Les dates simulées par le modèle pour les différents traitements anti-oidium de base et les différentes parcelles dépendent des règles présentées dans le tableau 12.1, mais également des conditions de faisabilité du chantier, sous la dépendance de seuils de cumul de pluie, de la vitesse du chantier et de la surface à traiter.

Parmi les chantiers listés dans le plan d'action, certains sont systématiquement réalisés, d'autres sont optionnels. Dans l'exploitation prise ici en exemple, le chantier optionnel de traitement anti-oidium n'est mis en œuvre que lorsque trois conditions sont atteintes : le niveau de pression sanitaire oidium est élevé, l'intervalle entre la date du jour et la date du traitement de base précédent est supérieur à six jours, l'intervalle entre la date du jour et la date prévue pour le traitement de base suivant est supérieure à trois jours. Ce chantier optionnel ne concerne que le cépage Carignan en raison de sa grande sensibilité à l'oidium.

La complexité et la forme d'un modèle de décision dépendent de l'objectif poursuivi et des actions à modéliser. Quand la finalité du modèle est de représenter des actions peu nombreuses et facilement prévisibles, il est possible de décrire l'ensemble des actions à mener par un enchaînement de règles de décision simples. C'est le cas du modèle MODERATO (Bergez *et al.*, 2001) qui simule la décision d'irrigation sur du maïs. Le modèle de décision est constitué par une règle de décision pour commencer l'irrigation, une autre pour prendre en compte le climat, une troisième pour décider quand recommencer un tour d'eau et une dernière pour décider quand arrêter l'irrigation.

Quand les règles deviennent très nombreuses ou très complexes en raison de nombreux ajustements possibles aux conditions du moment, on peut structurer le modèle de décision sous la forme d'un plan d'action. Un plan d'action est alors vu comme une liste flexible d'actions à réaliser selon un jeu de règles de décision. Les actions listées dans le plan s'organisent au cours de la simulation en fonction de règles de décision qui définissent, pour chaque action, l'opportunité de la réaliser et de quelle façon la réaliser (où, quand, comment, ...). L'exemple d'un tel modèle construit pour simuler les itinéraires techniques mis en œuvre dans une exploitation viticole est donné dans l'encadré 12.2.

### ►► Comment définir les règles de décision ?

Comme pour de nombreux modèles, il est nécessaire d'acquérir des données pour construire le modèle de décision des acteurs. En effet, il faut obtenir les indicateurs mobilisés, les logiques d'actions, les priorisations, etc. On distingue trois approches.

La première approche est basée sur l'élicitation, c'est-à-dire la révélation ou la mise à jour des décisions des acteurs par des scénarisations adéquates (Eisenhardt et Graebner, 2007). Beaucoup de modèles de décision sont construits ainsi. Par exemple, on peut proposer à un gestionnaire différents cas d'état d'une ressource et lui demander, pour chacune des situations, quelles actions il mènerait. Pour aider à la construction des modèles de décision en vue d'une implémentation informatique, Robert *et al.* (2016) ont spécifiquement élaboré un cadre méthodologique basé sur quatre grandes étapes :

- définition du problème de décision ;
- sélection des cas d'étude ;
- collecte des données et étude précise des situations particulières ;
- développement du modèle conceptuel.

La deuxième approche consiste à mobiliser des méthodes basées sur les préférences révélées (Koundouri, 2004). À partir d'une base de données d'actions réalisées, les conditions ayant déclenché les actions enregistrées sont recherchées. Ainsi, la mise en relation de la chronique des lâchers d'eau d'une retenue par le gestionnaire avec les débits des cours d'eau permet de définir les critères de lâchers en mobilisant l'indicateur débit.

La troisième approche provient de l'intelligence artificielle (*Reinforcement learning* et *QR learning*). Elle cherche directement le jeu de règles optimisant une fonction « objectif ». Dans cette approche, on ne part pas d'un *a priori* sur la structuration des règles. Seul l'espace des indicateurs d'intérêt est défini. Chaque décision est liée

à un gain que l'on cherche à optimiser sur l'ensemble de la simulation. Une telle approche a été testée sur la décision d'irrigation du maïs en utilisant une méthode de *QR learning* (Bergez *et al.*, 2006a). Dans cette étude, la décision de déclencher la campagne d'irrigation était associée à une maximisation du revenu de l'agriculteur. L'espace des indicateurs choisis pour cette étude était l'humidité du sol et le développement de la culture. La règle trouvée alors correspondait à «Si développement de la culture supérieur à 650°C.jour et le déficit en eau du sol supérieur à 80mm, alors on déclenche l'irrigation». Cette approche est souvent très coûteuse en temps de simulation. Par ailleurs, elle fait abstraction d'une partie de la connaissance experte. Son intérêt est de permettre de tester de nouveaux indicateurs potentiels et de définir des règles associées à leur usage.

## ► Résolution d'un problème de gestion

Si le modèle de décision est construit et couplé ou chaîné avec des modèles biophysiques, c'est-à-dire qu'il est implémenté sous forme d'un modèle ou de plusieurs modèles informatiques permettant de relier les états du système d'intérêt et les actions des agents, il peut alors être utilisé pour aider à résoudre un problème de gestion. Plusieurs approches existent.

## Approches participatives et jeux sérieux

Les démarches participatives mobilisant des modèles qui relient l'état du système et les actions des agents sont assez classiquement utilisées pour résoudre des problèmes de gestion de l'eau. Dans ces approches, la recherche de décisions adaptées au problème de gestion et la recherche de compromis entre différents acteurs se font par essai-erreur, en analysant les conséquences des décisions prises sur le fonctionnement du système. Une telle approche peut passer par des jeux de simulation (*serious game*) dans lesquels chaque participant joue le rôle d'un acteur et doit prendre des décisions ayant un impact sur le système étudié.

De nombreux jeux sur la gestion de l'eau existent. Un recensement sur l'Internet permet d'en trouver plusieurs dizaines<sup>1</sup>. Certains jeux ne comprennent pas de règles de décision; les décisions des joueurs et leur impact sur le système sont tracés et permettent d'en extraire *a posteriori* un ensemble de règles<sup>2</sup>. Dans d'autres jeux, certaines règles de décision et plans d'action sont codés et les actions qui en découlent sont activées en fonction de l'état du système; ce type de jeu permet par exemple de jouer le rôle d'un acteur particulier, alors que le modèle joue pour les autres acteurs impactant le système<sup>3</sup>.

Sans aller jusqu'à la construction d'un jeu de simulation, d'autres démarches utilisent la chaîne de modélisation pour produire des connaissances, pouvant être des résultats quantifiés, sur l'effet des décisions sur le système. Par exemple, le modèle de décision DHIVINE (encadré 12.2) simule les itinéraires techniques sur un ensemble de parcelles de vigne. Il a été chaîné avec un modèle d'évolution de l'infiltrabilité du sol et un modèle de transfert des polluants pour simuler l'impact

1. [www.genevawaterhub.org/resource/serious-games](http://www.genevawaterhub.org/resource/serious-games)).

2. Des jeux de règles comme WAT-A-GAME sont accessibles à [www.sites.google.com/site/waghistory/](http://www.sites.google.com/site/waghistory/)).

3. C'est le cas du jeu AQUAREPUBLICA accessible à [www.aquarepublica.com](http://www.aquarepublica.com)).

de différentes stratégies de réduction de l'usage d'herbicides sur la contamination des eaux de surfaces dans un bassin viticole (Biarnès *et al.*, 2017; voir chapitre 19). En prenant en compte une gamme de décisions et de contextes (climatiques, réglementaires, etc.), les connaissances produites peuvent servir de base de discussion avec les acteurs d'un territoire et s'insérer dans une dynamique de coconstruction de nouveaux modes de gestion.

## Approche par optimisation numérique

L'approche numérique vise à sélectionner des seuils d'indicateurs de décisions permettant de résoudre le problème de gestion. Ces seuils d'indicateurs de décisions peuvent ensuite être discutés avec les acteurs concernés. Dans cette approche, on cherche à optimiser les seuils des indicateurs utilisés dans certaines décisions pour optimiser une fonction objectif. De nombreuses méthodes d'optimisation sont disponibles, leurs qualités dépendent notamment de la dimension du problème à résoudre (nombre de seuils d'indicateurs de décision). Il peut s'agir :

- de méthodes systématiques de recherche sur grille (Bergez *et al.*, 2002);
- de méthodes de décomposition hiérarchique du domaine des paramètres avec des heuristiques de choix de régions prometteuses décomposées en  $k$  plus petits domaines (Crespo *et al.*, 2011);
- de méthodes d'optimisation plus récentes telles que les algorithmes génétiques pour les domaines discrets (Lehmann *et al.*, 2013).

### ►► Conclusion

La modélisation des décisions permet de reproduire les situations de décision des agents et de simuler les actions qui en résultent. L'approche par règles de décision est une approche déterministe qui permet de reproduire la variabilité des actions des agents et leurs adaptations en lien avec les états du système. Elle est mobilisable dans une large gamme de modèles allant de représentations schématiques des actions des agents basées sur l'enchaînement de quelques règles de décision à des représentations complexes mobilisant des jeux de règles de décision en interaction.

Même lorsqu'il est complexe, un modèle de décision ne prétend pas reproduire fidèlement la réalité. Il semble impossible de prévoir toutes les situations de décision possibles, notamment parce que ces décisions sont prises dans un contexte incertain, avec des sources d'incertitude qui ne sont ni toutes connues et ni toutes évaluables ou probabilisables par avance. Par ailleurs, les indicateurs utilisés dans les règles de décision peuvent eux-mêmes être une approximation de ceux utilisés par les agents. De ce fait, ils génèrent des différences entre les actions réelles et les actions simulées.

Comme pour tout modèle, un modèle de décision vise plus raisonnablement la reproduction des grandes tendances dans les actions des agents, par exemple, les motifs de distribution spatio-temporelle des opérations culturales sur un territoire donné. Un tel modèle peut alors être couplé ou chaîné à des modèles biophysiques pour évaluer l'impact des décisions des agents sur les ressources en eau. De ce fait, il peut aider à la résolution d'un problème de gestion des ressources, sous réserve néanmoins qu'il soit compris, validé et accepté par les acteurs du terrain qui le mobilisent.

## ► Références bibliographiques

- Attonaty J.M., Cerf M., 2001. *Dispositifs de recherche et conduite de projets pour la production de méthodes et d'outils d'aide à la décision*. École chercheur «Aide à la décision», La Londe les Maures, mai 2001.
- Aubry C., Papy F., Capillon A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural systems*, 56(1): 45-65.
- Bergez J.E., Debaeke P., Deumier J.M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. Moderato: an object-oriented decision model to help on irrigation scheduling for corn crop. *Ecological modelling*, 137: 43-60.
- Bergez J.E., Deumier J.M., Lacroix B., Leroy P., Wallach D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *European journal of agronomy*, 16: 123-135. Doi: 10.1016/S1161-0301(01)00124-1.
- Bergez J.E., Garcia F., Leenhardt D., Maton L., 2006a. Optimising irrigation management at the plot scale to participate at the regional scale water resource management. In: Castelletti A., Soncini Sessa R., (eds). *Topics on systems analysis and integrated water resources management (IWRM)*. Amsterdam: Elsevier, 141-160.
- Bergez J.E., Garcia F., Wallach D., 2006b. Representing and optimizing management decisions with crop models. In: Wallach D., Makowski D., Jones J.W., (eds.). *Working with dynamic crop models: evaluating, analyzing, parameterizing and using them*. Amsterdam: Elsevier, 175-210.
- Biarnès A., Andrieux P., Barbier J.-M., Bonnefoy A., Compagnone C., Delpuech X., Gary C., Metay A., Rellier J.P., Voltz M., 2017. Evaluer par modélisation des stratégies de réduction des usages d'herbicides dans les bassins versants viticoles. *Innovations agronomiques*, 57 : 141-152.
- Bouleau N., 1999. *Philosophies des mathématiques et de la modélisation : du chercheur à l'ingénieur*. Paris : l'Harmattan.
- Crespo O., Bergez J.E., Garcia F., 2011. P2 hierarchical decomposition procedure: Application to irrigation strategies design. *Operational research*, 11: 19-39. Doi: 10.1007/s12351-009-0040-z.
- Eisenhardt K., Graebner M., 2007. Theory building from cases: opportunities and challenges. *Academy of management journal*, 50: 25-32.
- Koundouri P., 2004. *Econometrics informing natural resources management: selected empirical analyses. New horizons in environmental economics*. Cheltenham: Edward Elgar editors.
- Lehmann N., Finger R., Klein T., Calanca P., Walter A., 2013. Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. *Agricultural systems*, 117: 55-65. Doi: 10.1016/j.agsy.2012.12.011.
- Martin-Clouaire R., Rellier J.P., Paré N., Voltz M., Biarnès A., 2016. Modelling management practices in viticulture while considering resource limitations: the DHIVINE model. *Plos one*, 11(3): e0151952. Doi: 10.1371/journal.pone.0151952.
- Maton L., Leenhardt D., Goulard M., Bergez J.E., 2005. Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural systems*, 86: 293-311. Doi : 10.1016/j.agsy.2004.09.010.
- Paré N., 2011. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants. Thèse de doctorat. Montpellier-SupAgro.
- Risbey J., Kandlikar M., Dowlatabadi H., 1999. Scale, context, and decision making in agricultural adaptation to climate variability and change. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 4: 137-165.
- Robert M., Bergez J.E., Thomas A., 2017a. A stochastic dynamic programming approach to analyze adaptation to climate change: application to groundwater irrigation in India. *European journal of operational research*, 265(3): 1033-1045. Doi: 10.1016/j.ejor.2017.08.029.
- Robert M., Thomas A., Sekhar M., Badiger S., Ruiz L., Raynal H., Bergez J.E., 2017b. Adaptive and dynamic decision-making processes: a conceptual model of production systems on Indian farms. *Agricultural systems*, 157: 279-291. Doi: 10.1016/j.agsy.2016.08.001.

Robert M., Thomas A., Sekhar M., Raynal H., Casellas E., Casel P., Chabrier P., Joannon A., Bergez J.E., 2018. A dynamic model for water management at the farm level integrating strategic, tactical and operational decisions. *Environmental modelling and software*, 100: 123-135. Doi: 10.1016/j.envsoft.2017.11.013.

Robert M., Dury J., Thomas A., Therond O., Sekhar M., Badiger S., Ruiz L., Bergez J.E., 2016. CMFDM: a methodology to guide the design of a conceptual model of farmers' decision-making processes. *Agricultural systems*, 148: 86-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.010>.

# L'EAU EN MILIEU AGRICOLE

Outils et méthodes pour une gestion  
intégrée et territoriale

D. Leenhardt, M. Voltz et O. Barreteau, coord.



# L'eau en milieu agricole

## Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale

Delphine Leenhardt, Marc Voltz et Olivier Barreteau,  
coordinateurs

Éditions Quæ  
RD 10, 78026 Versailles Cedex

## Collection Synthèses

Biomasse. Une histoire de richesse  
et de puissance.

B. Daviron.  
2020, 392 p.

Agriculture et qualité de l'air  
Comprendre, évaluer, agir  
C. Bedos, S. Générumont,  
J.-F. Castell, P. Cellier, coord.  
2019, 325 p.

Consommation et digestion des végétaux  
Rôles des microbiotes et fonctions  
essentielles à la biodiversité  
G. Fonty, A. Bernalier-Donadille,  
É. Forano, P. Mosoni  
2019, 176p.

Gestion durable de la flore  
adventice des cultures  
B. Chauvel, H. Darmency,  
N. Munier-Jolain, A. Rodriguez, coord.  
2018, 354 p.

Histoire de la génétique  
et de l'amélioration des plantes  
A. Gallais  
2018, 288 p.

Né d'une volonté de conjuguer production agricole et protection de l'environnement, le département Environnement et Agronomie de l'Inra a fêté ses vingt ans. Pour l'occasion, une série d'ouvrages dédiés à des thématiques emblématiques du département sont publiés.



Le présent ouvrage est consacré à la gestion de l'eau en milieu agricole.

Cet ouvrage a reçu le soutien du département Environnement et Agronomie et du département Sciences pour l'Action et le Développement de l'Inra et du département Eaux d'Irstea pour en permettre une diffusion large et ouverte.

Les versions numériques sont diffusées en accès libre sous licence CC-by-NC-ND et disponibles sur [www.quae-open.com](http://www.quae-open.com).

### Pour citer l'ouvrage

Leenhardt D., Voltz M., Barreteau O. (coord.), 2020. *L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. Versailles, Éditions Quæ, 288 p. (coll. Synthèses)

Éditions Quæ, RD 10, 78026 Versailles Cedex  
[www.quae.com](http://www.quae.com)

© Éditions Quæ, 2020

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-3123-2  
ISBN (ePub) : 978-2-7592-3125-6

ISBN (Pdf) : 978-2-7592-3124-9  
ISSN : 1777-4624

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6<sup>e</sup>.