

# *Irrigation Seeland - Broye (ISB)*

## Prévision online des besoins et ressources en eau pour l'irrigation

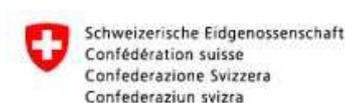


**Rapport final**

**Juin 2016**



e-dric.ch  
eau énergie environnement  
Ch. du Rionzi 54  
CH-1052 Le Mont-sur-Lausanne  
[info@e-dric.ch](mailto:info@e-dric.ch)  
Tél : 021 784 33 13



Agroscope  
Groupe de recherche Climat/Hygiène de l'air  
Reckenholzstrasse 191  
CH - 8046 Zürich

Projet mis en œuvre dans le cadre du programme pilote Adaptation aux changements climatiques, soutenu par l'Office fédéral de l'agriculture OFAG. Seuls les auteurs du rapport portent la responsabilité de son contenu.

Version	1.003
Document	M13_023_001_Rapport_ISB.docxs
Date	12.04.2017
Auteurs	M. Thomet, F. Jordan, J. Fuhrer
Distribution	Partenaires du projet

# Contenu

<b>1</b>	<b>PRÉAMBULE</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
2.1	OBJECTIF DU PROJET .....	3
2.2	MÉTHODOLOGIE.....	4
<b>3</b>	<b>PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>MODÉLISATION</b> .....	<b>7</b>
4.1	CONCEPT DE MODÉLISATION .....	7
4.2	MODÈLE DE LA DEMANDE .....	8
4.3	MODÈLE DE LA RESSOURCE.....	10
4.3.1	<i>Description du modèle de simulation Routing System</i> .....	10
4.3.2	<i>Le bassin versant modélisé pour ISB</i> .....	11
4.3.3	<i>La modélisation des lacs</i> .....	12
4.4	MODÈLE COUPLÉ.....	12
<b>5</b>	<b>RÉSULTATS</b> .....	<b>13</b>
5.1	DONNÉES AGRICOLES DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE .....	13
5.1.1	<i>Les types de cultures</i> .....	13
5.1.2	<i>Les types de sols</i> .....	14
5.2	MODÈLE DU BESOIN EN IRRIGATION.....	14
5.2.1	<i>Pommes de terre : comparaison avec des mesures locales</i> .....	14
5.2.2	<i>Analyse interannuelle des besoins de la pomme de terre</i> .....	18
5.2.3	<i>Légumes : évaluation avec des mesures locales</i> .....	21
5.3	MODÈLE DES RESSOURCE EN EAU.....	23
5.3.1	<i>Calage du modèle de ressource</i> .....	23
5.3.2	<i>Découpage en zone d'irrigation</i> .....	26
5.4	ISB.SWISSRIVERS.CH.....	28
5.4.1	<i>Contenu du site</i> .....	28
5.4.2	<i>Utilisation des prévisions en temps réel</i> .....	31
<b>6</b>	<b>SYNTHÈSE</b> .....	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>PERSPECTIVES</b> .....	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>PROJEKTBIANZ</b> .....	<b>36</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>41</b>

# 1 Préambule

Appel à  
projets

Dans le cadre de l'appel à projets du programme « Adaptation aux changements climatiques » lancé par l'OFEV, le groupement composé de e-dric.ch (bureau d'ingénieurs privé), le groupe de recherche Climat/Hygiène de l'air de la station de recherche Agroscope (DFE) et l'association Pro Agricultura Seeland a déposé sa candidature. Le projet est porté par les cantons de la région du Seeland et de la Broye, à savoir Vaud, Fribourg et Berne.

L'objectif du projet est de développer un outil opérationnel de prévision des réserves et besoins en irrigation et des ressources en eau sur la base d'une modélisation à base physique du territoire et des cours d'eau du Seeland et de la Broye, ainsi que des lacs. Ce modèle calcule les besoins en irrigation avec le modèle développé par Agroscope. Il tient compte en particulier du type de culture et de la nature du sol.

## 2 Introduction

### 2.1 Objectif du projet

Le projet poursuit trois objectifs principaux :

Optimisation  
des  
restrictions

**L'optimisation des restrictions** d'utilisation de l'eau sur la base d'une anticipation des conditions météorologiques. La demande en eau pour l'irrigation tout comme la disponibilité de la ressource en eau dans les cours d'eau et lacs est déterminée par simulation. Le modèle, basé sur des prévisions météorologiques et l'état phénologique des cultures, permet de déterminer l'évolution future de la demande en eau à court terme (10 jours, Fig. 1). Ces informations quantitatives sont ainsi disponibles pour les décisions de restrictions l'irrigation par les autorités compétentes.

Optimisation  
de l'utilisation

**L'optimisation de l'utilisation** de l'eau. La connaissance de l'état actuel tout comme de l'évolution de l'humidité du sol, ainsi que des besoins des plantes permet d'ajuster la quantité et le moment d'arrosage. Il s'agit de compter sur l'individu qui, disposant d'une information quantitative supplémentaire, optimise sa consommation d'eau.

Formation

**Formation des acteurs de l'agriculture** pour promouvoir une utilisation efficiente de l'eau.

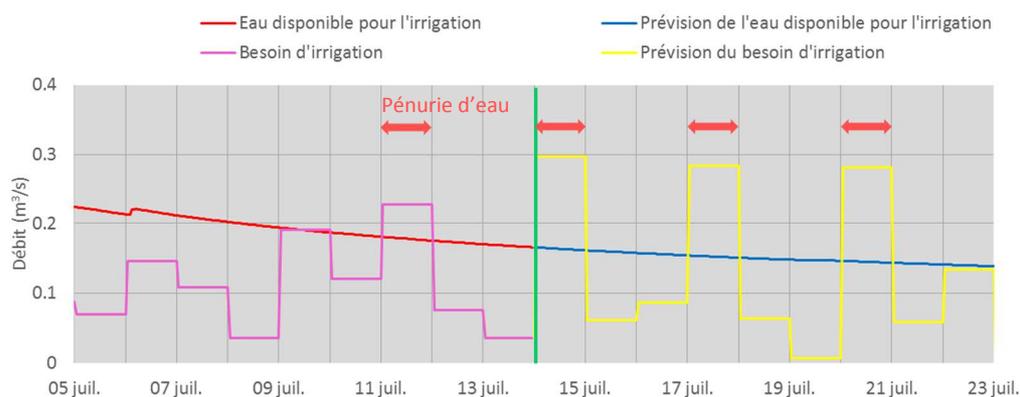


Fig. 1 : Comparaison entre disponibilité en eau (cours d'eau) et demande en eau (irrigation). La pénurie se produit lorsque le besoin excède la ressource disponible.

## 2.2 Méthodologie

Combinaison  
de modèles  
existants

Pour le développement de l'outil opérationnel de prévision et d'optimisation de la ressource en eau, il s'agit de combiner le savoir-faire technologique et les connaissances scientifiques issus de plusieurs spécialités :

- Représentation de l'état du sol (humidité, contenu en eau). Ceci est possible grâce au modèle de simulation mis au point dans le cadre du PNR61 AGWAM (Führer et al., 2011 ; Führer et al., 2013), EU FP7 Projet ACQWA (Smith et al. 2012) et d'autres projets concernant les besoins d'irrigation (Führer & Jasper, 2009 ; Führer, 2010 ; Führer, 2012).

- Estimation des besoins potentiels actuels et futurs en eau des cultures principales. Ceci est également basé sur la méthodologie développée par Agroscope.

- Connaissance de la disponibilité future (jusqu'à 10 jours) de la ressource en eau (nappes, cours d'eau). Le projet se base sur la simulation pluie-débit Routing System, étendue et adaptée à la méthodologie Agroscope. Le modèle de prévision développé par e-dric.ch ([www.swissrivers.ch](http://www.swissrivers.ch) et applications dédiées) sert de base au calcul de prévision des débits des cours d'eau.

- Gestion des données et des modèles de calcul, hébergement d'un système automatique. L'infrastructure e-dric.ch est mise à disposition. Un système déjà opérationnel depuis plusieurs années, intégrant l'acquisition des données et prévisions météo, la simulation, la diffusion des informations sur l'interface carto-web est exploité dans le cadre de ce projet.

Plateforme  
Internet pour  
diffuser  
l'information

- Diffusion des informations par une plateforme Internet. L'interface propose une carte sur laquelle le territoire est coloré en fonction d'un indicateur relatif aux besoins en irrigation. Lors de la sélection d'une zone (champ ou zone représentative, haute résolution), un graphique dynamique apparaît présentant les besoins futurs (jusqu'à 10 jours) en irrigation potentiel (fonction des prévisions météo et de la modélisation du sol). Ce dernier permet de visualiser les besoins en irrigation de manière quantitative. Par extension, le graphique peut montrer l'état de la réserve en eau et mettre en évidence le risque de pénurie des prochains 10 jours. Même s'il ne s'agit pas de l'objectif principal du projet, chaque agriculteur peut organiser son arrosage en tenant compte de cette nouvelle information. De plus, la gestion des autorisations de soutirage peut également être

optimisée par les autorités compétentes. Ce système, développé pour les régions de la Broye et du Seeland, pourrait ultérieurement être étendu à d'autres régions suisses.

Formation des  
acteurs

- Formation des acteurs et communication des nouvelles méthodes de travail, afin d'encourager l'utilisation de ces informations et de parvenir à une utilisation optimale de la ressource en eau. Par son lien fort avec le monde agricole du Seeland, l'association ProAgricultura a les moyens d'atteindre les acteurs de l'agriculture régionale et de leur transmettre ces nouveaux modes d'exploitation. Cela permet de valoriser et partager la connaissance contenue dans ce nouvel outil d'information.

Ces différentes compétences existent déjà chez les partenaires du projet. Dès lors, ces derniers, sont en mesure de fournir des technologies de modélisation et de communication adéquates sans développements fondamentaux. Il s'agit ainsi de se concentrer sur la mise en commun des développements existants, sur leur adaptation, pour aboutir à un produit fonctionnel et utile au monde de l'agriculture et aux autorités pour les régions de la Broye et du Seeland.

### 3 Périmètre d'étude

Le périmètre d'étude est présenté à la Fig. 2. Il se situe entre les trois lacs de Neuchâtel, Bienné et Morat. Pour la Broye, seule la région de la plaine est considérée. Cette région a une agriculture développée où le recours à l'irrigation est important. Cette dernière est issue du pompage dans les lacs, du pompage depuis la nappe phréatique mais aussi des eaux superficielles (cours d'eau). Le périmètre du projet couvre ainsi une surface d'environ 480 km<sup>2</sup> répartie sur 66 communes. De nombreux petits cours d'eau se situent à l'intérieur du périmètre dont la Broye, la Petit-Glâne, la Lembe, l'Arbogne et le Chandon pour la plaine de la Broye ainsi que la Bibera et tout le système des canaux de drainage et d'irrigation pour le Seeland.

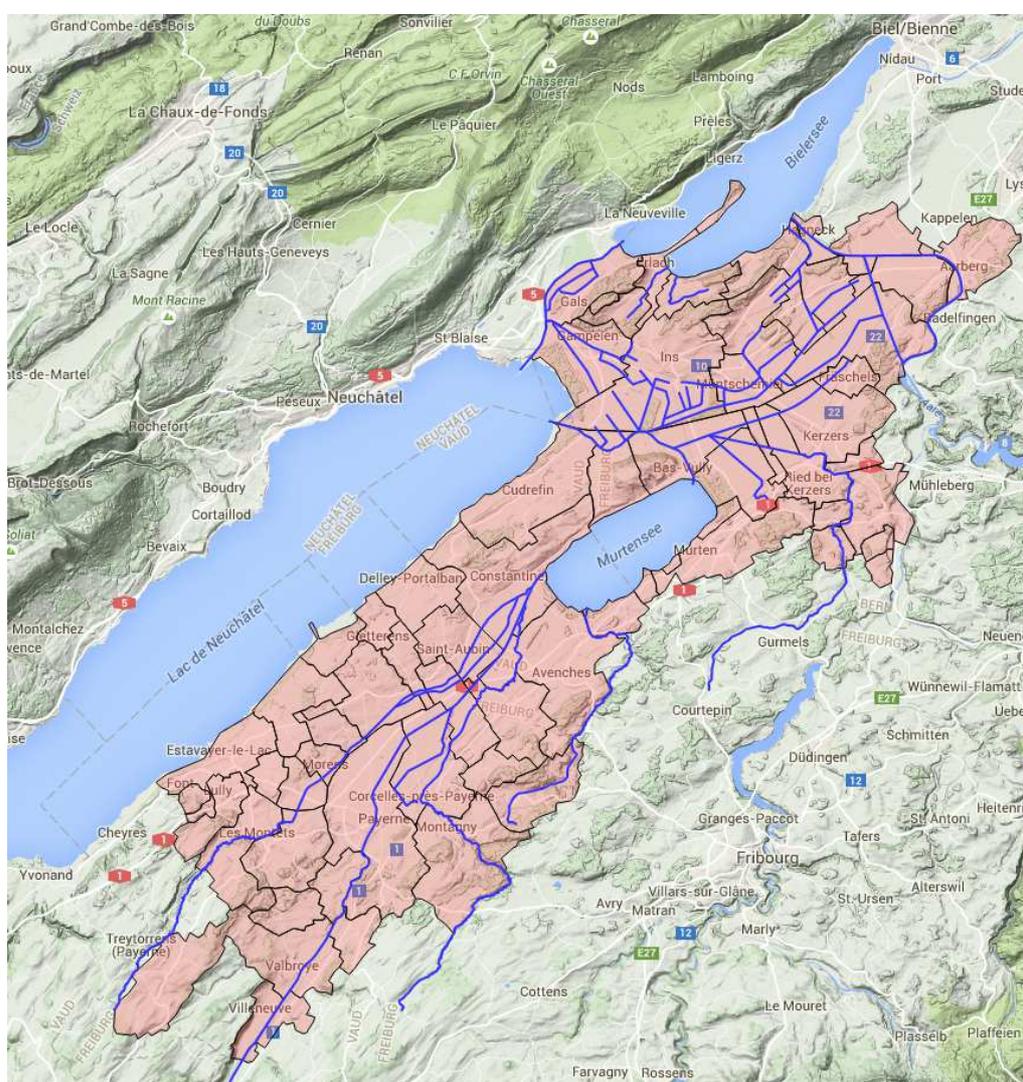


Fig. 2 : Périmètre d'étude pour l'irrigation Broye - Seeland

## 4 Modélisation

### 4.1 Concept de modélisation

Concept : 1 modèle de simulation unique, modèle semi- distribué	<p>Le concept global de modélisation repose sur la simulation « pluie-débit » avec la suite Routing System (RS). RS fonctionne selon une approche orientée objets, où différents objets (ou fonctions) peuvent être combinés. La discrétisation est variable selon l'approche semi-distribuée, permettant une grande flexibilité dans les combinaisons de processus et d'échelles de modélisation. Par exemple, un bassin versant de 100 km<sup>2</sup> peut être simulé à côté d'un champ de tabac de 0.1 km<sup>2</sup>. Cela permet de calculer, dans le même unique modèle, les fonctions de demande en irrigation (état du sol et besoin des cultures à l'échelle de la parcelle), de ressource (cours d'eau à l'échelle du bassin versant), et de régulation (gestion des niveaux des lacs concentrant les eaux de plusieurs cours d'eau). Les multiples parcelles de cultures modélisées peuvent ainsi être agrégées librement pour une comparaison immédiate avec le débit d'une section de cours d'eau.</p>
Agrégation en échelles comparables (besoin, ressource)	<p>L'application de ces possibilités au projet ISB nécessite des choix de modélisation, dont certains sont illustrés à la Fig. 3. Les parcelles de cultures sont regroupées en zones de consommation, typiquement un champ agricole qui a besoin d'eau pour l'irrigation (demande). Ce regroupement consiste en la sommation des contributions particulières simulées (surfaces cultivées par types de culture et de sol). Les ressources disponibles (offre), telles que les rivières, les lacs ou la nappe, sont simulées à une résolution élevée. Ainsi, il est possible de mettre en relation directement une zone de demande avec une ressource particulière. Si, pour la région considérée, la demande excède la ressource disponible, la pénurie d'eau est atteinte et une alarme est déclenchée à l'échelle de cette région.</p>
Hypothèses	<p>Le calcul de l'évolution des besoins en irrigation et des pénuries se base sur les hypothèses suivantes :</p> <p>La demande d'une zone de consommation est admise toujours satisfaite. Sans cette hypothèse, un calcul itératif, basé sur des hypothèses supplémentaires et non vérifiables (irrigation effective) serait nécessaire. Cette hypothèse se justifie, car l'outil vise dans un premier temps à détecter les zones de pénurie d'eau et leur échéance d'apparition. L'arbitrage de quelle culture et quelle région reçoit de l'eau en cas de manque partiel doit ainsi être déterminé par les utilisateurs compétents, c'est-à-dire ceux qui contrôlent les informations supplémentaires nécessaires.</p> <p>Une ressource particulière (p.ex. section de cours d'eau) se compare uniquement à la somme des demandes qui lui sont connectées.</p> <p>Chaque zone ne peut être connectée qu'à une ressource particulière. De ce fait, il est nécessaire de déterminer chaque zone, lors de la construction du modèle de simulation, en fonction de la ressource.</p>

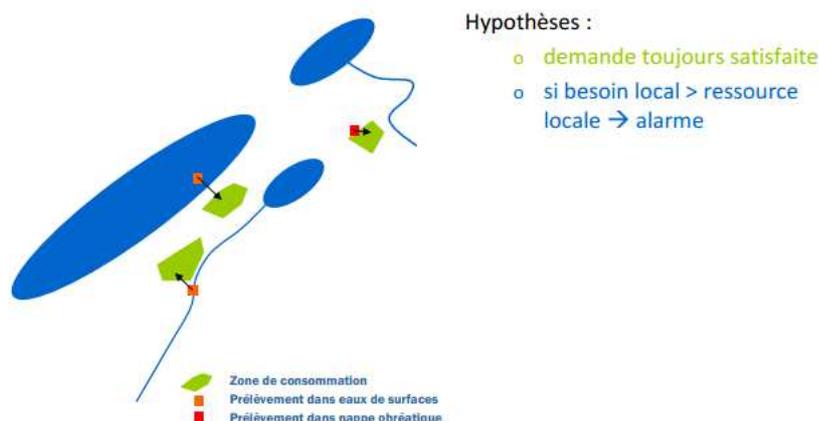


Fig. 3 : Principe général de la modélisation, avec comparaison de zones de demande connectées à des ressources en eau particulières.

## 4.2 Modèle de la demande

Calcul journalier du besoin d'irrigation	Le calcul journalier du besoin en irrigation en un « point », c'est-à-dire sous un climat donné, pour une culture donnée, sur un sol donné (avec une gestion et des restrictions données) s'inspire de la méthode « FAO, rapport 56 sur l'irrigation » (Allen et al. 1998, Calanca et al. 2011, Smith et al. 2012 Section 3.3, Smith et al. 2014 Section 2.4). La représentation des flux d'eau du système sol-plante-atmosphère influencés par le type de climat, de culture et du sol est basée sur les concepts de l'évapotranspiration de référence $ET_0$ et du bilan d'eau vertical « bucket » à une couche de sol homogène.
$ET_a$ (évapotranspiration ajustée)	L'évapotranspiration ajustée $ET_a$ est calculée à partir d' $ET_0$ Penman-Monteith ou Turc (selon les données météo disponibles) en fonction des besoins de la culture (via le coefficient cultural $K_c = ET_p / ET_0$ ) et de la disponibilité en eau du sol (via le coefficient de satisfaction hydrique $K_s = ET_a / ET_p$ ).
	$ET_a = K_s \cdot K_c \cdot ET_0$
$K_c$ (coefficient cultural)	Le $K_c$ représente l'effet du cycle saisonnier spécifique à une culture, dont il est important de connaître la durée et l'amplitude, autrement dit les dates de démarrage et de récolte ainsi que la différence de croissance par rapport à la culture de référence (prairie pérenne sans limitation hydrique ni azotée). Le $K_s$ représente l'effet de l'évolution du déficit hydrique de la zone racinaire en fonction des (ou l'absence de) précipitations et du bilan des autres flux d'eau ainsi que de la sensibilité spécifique de la culture au déficit hydrique. Il est important de connaître la capacité de rétention de l'eau typique du sol et la profondeur d'enracinement spécifique à la culture ( $Z$ ).
$K_s$ (satisfaction hydrique)	
Effet du sol (texture)	La capacité de rétention d'eau par volume de sol (quantité maximale d'eau qui peut être stockée et restituée dans des conditions bien drainées où le sol n'est pas saturé en eau) dépend de sa granulométrie ou texture. Cette capacité est la différence entre les valeurs typiques de contenu en eau du sol à la capacité au champ ( $CC$ ) et au point de flétrissement permanent ( $PPF$ ). Elle est exprimée en fraction volumique, ou $m^3$ d'eau par $m^3$ de sol. La capacité de rétention d'eau absolue (autrement appelée réserve utile $RU$ ) dépend en outre de la profondeur du sol (en mm dans le calcul). La $RU$ est finalement ajusté par la profondeur effective $Z$ d'enracinement.

Réserve utile	$RU = Z \cdot (CC - PFP)$ [mm]
Déficit hydrique	Le déficit hydrique journalier, susceptible, s'il dépasse un certain seuil et n'est pas comblé par l'irrigation, de limiter l'évapotranspiration et d'affecter le rendement des cultures en quantité et qualité, correspond à la différence entre la RU et le contenu en eau du sol du jour. Ce dernier est simulé en fonction du contenu en eau du sol du jour précédent à l'aide du bilan d'eau de la zone racinaire. Le volume de sol considéré pour le bilan d'eau est constant dans le modèle au cours du temps, ce qui peut conduire à une sous-estimation des besoins en irrigation en tout début de cycle saisonnier, où les racines n'ont en réalité pas encore atteint leur profondeur maximale. Les flux d'eau participant au bilan d'eau journalier sont l'infiltration des précipitations (pluie, ou neige une fois fondue), les pertes par ruissellement de surface, les pertes gravitaires vers la nappe phréatique, l'ETa du jour et l'irrigation du jour précédent.
Bilan journalier	Le besoin en eau d'irrigation théorique « optimal » représente la gestion d'une ressource non illimitée par un agriculteur « économe » tolérant une possible légère perte de rendement. Le critère de déclenchement de l'irrigation est défini comme le franchissement au cours d'une période sèche du seuil de 80% de satisfaction hydrique. La quantité d'eau considérée nécessaire à apporter en supplément des précipitations est celle qui annule juste la limitation hydrique et ramène l'ETa au niveau potentiel ETp de la culture sans saturer le sol en eau inutilement.
Modèle vertical simple	En présence de pluies inefficaces (par exemple interception par le feuillage) ou de nappe phréatique peu profonde permettant des remontées capillaires, non prises en compte, les besoins en irrigation peuvent être respectivement sous-estimés ou surestimés. Le modèle de bilan d'eau « vertical » simple à une couche homogène suppose qu'il n'y a ni d'accumulation d'eau sous forme de flaques en cas de sol plat, ni de flux latéraux, ni de cailloux dans le sol. La distribution des précipitations au cours de la journée n'est pas prise en compte et le ruissellement par conséquent potentiellement sous-estimé en cas de précipitation courte mais intense. L'eau infiltrée se répartit à l'échelle d'une journée de façon homogène dans toute la couche enracinée.
Prise en compte de l'efficacité d'irrigation	Le calcul de la demande effective en eau pour l'irrigation d'une surface agricole peut être ajusté dans le contexte réel d'un bassin versant avec son relief particulier et autres contraintes de dates, durée ou intensité d'irrigation (exclusion totale ou partielle de certaines cultures ou/et sols). Dans tous les cas les quantités d'eau effectivement prélevées dans les cours d'eau partagés par plusieurs usagers et secteurs d'activité doivent être converties en tenant compte d'une efficacité de l'irrigation selon la technique employée. Les quantités d'eau nécessaires sont estimées pour une efficacité de 100% de la technique d'irrigation et du réseau d'acheminement de l'eau. Dans la pratique, au-delà d'une efficacité inférieure à prendre en compte selon le système en place, plusieurs contraintes peuvent influencer la conduite des irrigations. Le vent accentue les hétérogénéités de répartition de l'eau d'irrigation par aspersion, pouvant se superposer aux hétérogénéités du sol d'une parcelle. Ceci peut pousser l'irrigant à renouveler l'arrosage avant la date prévue et entraîner un excès d'irrigation sur d'autres secteurs de la parcelle. A l'inverse, si la ressource en eau, le matériel ou la main d'œuvre est peu disponible ou l'accès à la ressource régulé (par exemple via un tour d'eau), les quantités d'eau apportées peuvent être inférieures aux besoins en irrigation. Dans le modèle on a défini une valeur d'efficacité de 70%.
Efficacité de 70%	

### 4.3 Modèle de la ressource

#### 4.3.1 Description du modèle de simulation Routing System

Modèle de simulation RS FLOOD Le modèle de simulation hydrologique et hydraulique est basé sur la suite logicielle Routing System (RS), initialement développée à l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) dans les années 2000. Cette suite a donnée naissance à de nombreux modules complémentaires appliqués à des problématiques spécifiques (prévision des débits, analyse de crue, hydrologie urbaine) qui sont propriété de différents partenaires. Le bureau e-dric.ch est propriétaire des modules suivants (Fig. 4) :

- Modélisation du bassin versant
- RS FLOOD : prévision et analyse des crues
  - RS HYDROPOWER : prévision de la production d’hydroélectricité
  - RS URBAN : hydrologie urbaine
  - RS THERMO : prévision des températures des eaux superficielles et des eaux usées
  - RS CLIMATE : prévisions à long terme et impacts changements climatiques

Routing System permet un calcul hydrologique selon un concept pluie-débit : les données d’entrée du modèle sont les précipitations et températures, tandis que les résultats principaux sont multiples : débits aux exutoires des sous-bassins versants, aux sections de cours d’eau, niveaux des lacs ou de la nappe. Le modèle tient compte en particulier de l’ensemble des processus hydrologiques spécifiques aux bassins versants alpins et préalpins.

Suite Routing System et modules spécifiques

<p><b>Flood forecast</b> <b>RS FLOOD</b> Online only As a service (e-dric.ch)</p>	<p><b>Hydropower forecast</b> <b>RS HYDROPOWER</b> Online only As a service (e-dric.ch)</p>	<p><b>Solar Energy</b> <b>RS SOLAR</b> Online only As a service (e-dric.ch)</p>	<p><b>Environnement</b> <b>RS THERMO</b> Version laptop Version online (e-dric.ch)</p>
<p><b>Climate change</b> <b>RS CLIMATE</b> Version laptop Non distributable (e-dric.ch)</p>		<p><b>Waste water</b> <b>RS URBAN</b> Version laptop Version online (e-dric.ch)</p>	



**Routing System Suite**  
Modélisation fonctionnelle  
Combinaisons d’objets  
Lien entre hydrologie et hydraulique

<p><u>Version distributable</u></p> <p><b>Analyses</b> <b>Etudes hydrologiques</b> <b>RS MINERVE</b> Version laptop <a href="#">Free download</a> (Crealp)</p>	<p><b>Extreme</b> <b>Floods</b> <b>RS CRUEX</b> Version laptop <a href="#">Free download</a> (EPFL / Crealp / e-dric.ch) 2017</p>
--	---

Fig. 4 : Présentation de la suite logicielle Routing System et des différents modules.

Discretisation Le territoire est tout d’abord discrétisé en bassins versants, tenant compte des points d’intérêt : lacs ou réservoirs, jonctions de cours d’eau, géomorphologie, orographie, ouvrages hydraulique. En général, un bassin versant a une surface de 1-10 km<sup>2</sup>.

Chaque bassin versant est décomposé en bandes d’altitude de 300 m, afin de tenir compte de la température variant avec l’altitude (Jordan & al., 2008). Dans chaque bande

d'altitude, les principaux processus hydrologiques sont modélisés grâce au concept GSM-SOCONT (Schäfli & al., 2005, Jordan, 2007), tels qu'illustrés à la Fig. 5.

Flux des  
données et  
variables

Les précipitations (P) et températures (T) sont déterminées en chaque bande d'altitude par un objet appelé station virtuelle. Cet objet détermine les variables météo en fonction des coordonnées du centre de gravité de la bande d'altitude et des stations de mesure ou points de calcul des prévisions météo les plus proches. Une pondération tenant compte des effets altimétriques est en outre appliquée. L'objet Neige calcule alors l'évolution du stock de neige (constitution et fonte) sur la bande d'altitude en fonction des données météorologiques de la station virtuelle. L'intensité nette de fonte de neige  $i_{net}$  (ou la précipitation P lorsqu'il n'y a pas de neige) est ensuite introduite dans le modèle d'infiltration GR3. Ce dernier calcule, également en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETp), le débit de base à l'exutoire de la bande d'altitude ( $Q_b$ ) ainsi que l'intensité nette ruisselée à la surface de la bande. Cette dernière est finalement modulée par le modèle SWMM qui fournit le débit de ruissellement à l'exutoire de la bande d'altitude ( $Q_r$ ).

Dans le cas d'une bande glaciaire, les modèles GR3 et SWMM ne sont pas considérés, mais un modèle de fonte glaciaire à deux réservoirs permet le calcul des écoulements ( $Q_{glacier}$ ). Il est basé sur le principe du modèle linéaire degré-jour.

Enfin, les bassins versants sont liés entre eux par des objets cours d'eau effectuant le calcul d'acheminement, qui se rejoignent en affluents grâce aux objets jonctions.

Pour le détail du paramétrage, le lecteur se référera au manuel d'utilisation Routing System (e-dric.ch, 2010b).

Partie glaciaire  
et non-  
glaciaire

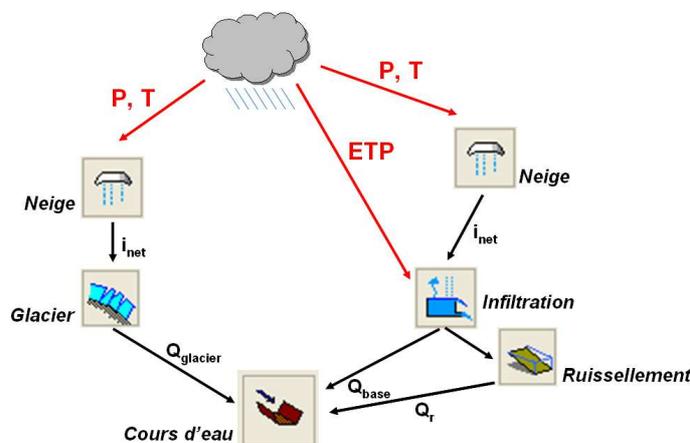


Fig. 5: Processus modélisés dans un sous-bassin versant composé d'une bande d'altitude glaciaire (gauche) et une bande d'altitude non-glaciaire (droite).

#### 4.3.2 Le bassin versant modélisé pour ISB

Bassin versant  
hydrologique

Le bassin versant modélisé doit être adapté en fonction de la problématique. Alors que pour le modèle de la demande en eau d'irrigation nous considérons uniquement le périmètre d'étude, il est indispensable de tenir compte l'ensemble du bassin versant hydrologique pour connaître les ressources d'eau disponibles. La Fig. 6 montre le bassin versant hydrologique pour la région des trois lacs. Ce bassin est très étendu, car les apports de l'Aar, de la Broye, de l'Orbe et de la Suze doivent être considérés pour calculer les ressources d'eau.

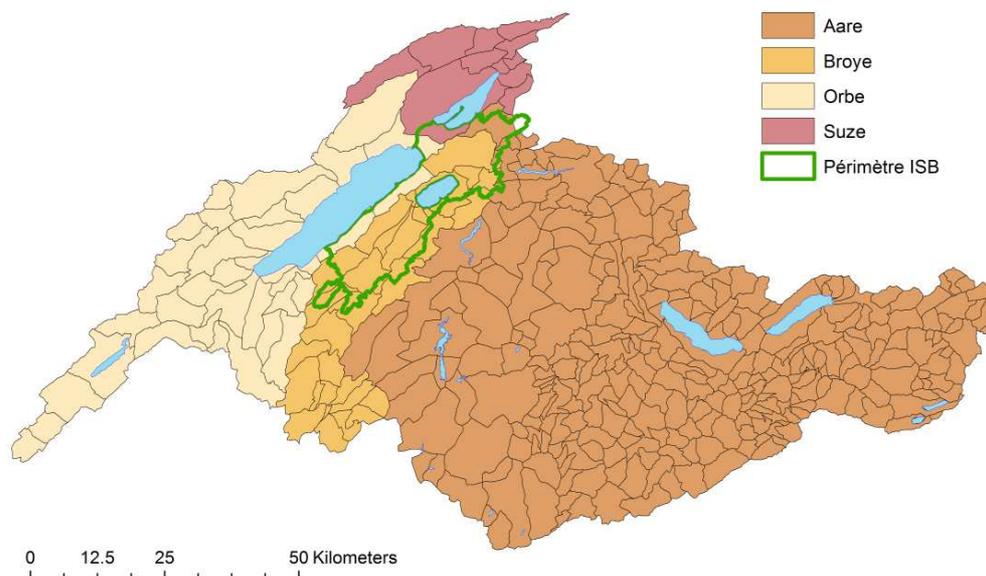


Fig. 6 : Bassin versant considéré pour la modèle de la ressource d'eau disponible

### 4.3.3 La modélisation des lacs

Régulation des lacs

En plus de l'hydrologique des cours d'eau, c'est-à-dire la génération de débit par des bassins versants, il est nécessaire de tenir compte des lacs et ouvrages spéciaux dans la simulation. Dans ce projet, les lacs de Biemme, de Neuchâtel et de Morat doivent être considérés. De même, la régulation du Lac de Thun est déterminante pour l'Aar à Hagneck. Des règlements d'exploitation existent et sont intégrés dans le modèle. Par exemple, le débit sortant peut être calculé en fonction de la période de l'année et du niveau d'eau dans le lac. Pour les trois lacs du Seeland, le rapport entre les niveaux d'eau permet également de déterminer le sens d'écoulement du canal de la Broye et de la Thielle.

## 4.4 Modèle couplé

Détermination du risque de pénurie

Le couplage des modèles de demande en irrigation et de ressource en eau doit permettre leur mise en relation en temps-réel et en prévision pour évaluer le risque de pénurie. Un module de régulation est dès lors introduit dans le modèle. Il reçoit en entrée le débit total disponible pour une région particulière, et la demande en irrigation totale correspondante. Une efficacité d'irrigation de 70% est considérée pour calculer la demande totale en irrigation à partir du besoin d'irrigation journalier. De plus, un débit minimal peut être défini pour chaque module de régulation pour tenir compte des contraintes de débit résiduel sur les cours d'eau. Le déficit d'eau et l'indicateur d'utilisation déterminant le risque de pénurie sont calculés pour chaque région.

## 5 Résultats

### 5.1 Données agricoles du périmètre d'étude

#### 5.1.1 Les types de cultures

Surface selon statistique OFAG Pour déterminer les surfaces agricoles ainsi que les surfaces potentiellement irriguées le recensement des données communales du système d'information sur la politique agricole (SIPA) de l'office fédéral de l'agriculture (OFAG) est exploité. Les données pour l'année 2013 sont analysées et considérée comme représentatives pour les autres années.

Culture irrigable selon étude MandaTerre Selon une enquête de terrain menée par MandaTerre (2011) auprès des agriculteurs, les cultures pour lesquelles ils font recours à l'irrigation sont les pommes de terre, le maïs, le tabac, les betteraves sucrières et les légumes. Selon cette même enquête le taux des surfaces irriguées est de 60 à 70% pour les légumes, les pommes de terre et le tabac, alors qu'il tombe à 7 à 8 % pour la betterave et le maïs. Pour toutes les autres cultures il est admis qu'elles sont uniquement alimentées par la pluie (agriculture pluviale).

Il n'existe par ailleurs pas de recensement généralisé des surfaces irriguées. Dans le but de déterminer la demande en irrigation pour une région, indépendamment des infrastructures existantes, toutes les surfaces qui abritent une culture potentiellement irrigable sont considérées. Le Tab. 1 synthétisent les données du SIPA par région d'irrigation (voir chapitre 5.3.2). Sur une surface totale de 482 km<sup>2</sup>, il y a 173 km<sup>2</sup> de surface non agricole, 220 km<sup>2</sup> d'agriculture pluviale et 89 km<sup>2</sup> de surface potentiellement irriguée.

Culture irriguée : pommes de terre, légumes, tabac, (betterave) Sur l'ensemble du périmètre du modèle, la répartition des surfaces potentiellement irrigables est la suivante : 3'090 ha de betterave sucrière, 1'950 ha de maïs, 1'930 ha de légumes, 1'620 ha pommes de terre et 330 ha de tabac. En termes de surface potentiellement irrigable, la betterave sucrière et le maïs sont en tête de classement. Toutefois, ces cultures décrites comme potentiellement irrigables dans le questionnaire de MandaTerre (2011) mais ne le sont que très partiellement. Lors de visites de terrain en été 2015, les agriculteurs ont expliqué que les surfaces de maïs étaient non irriguées, et que les surfaces de betterave sucrière ne l'étaient que très rarement, en raison de la mauvaise rentabilité financière de l'irrigation. Dans ce projet, le taux d'irrigation est admis à 100% pour les cultures de pommes de terre, de légumes et de tabac. Pour la betterave, un taux de 10% est considéré pour considérer le besoin potentiel maximum. Le modèle peut également considérer l'irrigation des cultures de maïs, mais cette dernière est pour le moment désactivée.

Surface agricole

Tab. 1 : Surfaces agricoles par région (Données agrégées sur la base du SIPA, OFAG 2013)

	Surface irriguée projet ISB	Agriculture pluviale	Pommes de terre	Légumes	Tabac	Maïs	Betterave sucrières
Taux de surface irriguée		0%	100%	100%	100%	0%	10%
	[ha]	[ha]	[ha]				
Lembe	119	1'510	69	1	35	74	139
Broye	459	3'839	241	15	130	421	735
Petite-Glâne	364	3'260	196	25	89	230	547
Arbogne	100	2'652	29	3	44	121	239
Chandon	9	363	8	0	0	5	8
Bibera	502	1'053	144	342	2	113	132
GrandCanal	380	469	111	262	0	58	69
Hauptkanal	689	1'161	175	491	0	175	227
Hagneckkanal	394	1'342	180	188	0	174	259
Broyekanal	591	2'471	174	392	0	286	251
Zihlkanal	207	558	101	96	2	48	84
Rives Neuchâtel	166	2'098	107	15	15	149	286
Rives Bienne	44	488	28	8	2	26	62
Rives Morât	158	716	51	92	10	69	48
Total	4'182	21'980	1'615	1'929	330	1'947	3'086

### 5.1.2 Les types de sols

Types de sol

Les différents types de sols sont déterminés selon la carte des aptitudes des sols de Suisse (<http://www.blw.admin.ch/>) disponible sur l'ensemble du territoire. La répartition entre les différents types de sol est alors déterminée pour chaque commune. La probabilité d'occurrence de chaque type de sol, admise uniforme pour chaque culture, permet d'évaluer toutes les combinaisons sol-culture par commune. Ainsi, aucune répartition de sol particulière en fonction de la culture n'est admise.

Le Tab. 2 montre la répartition entre les types de sol présents sur l'ensemble du périmètre. Les sols les plus courants sont du limon sableux et de la tourbe.

Répartition des sols

Tab. 2 : Répartition des types de sol sur l'ensemble du périmètre du projet

Type de sol	Surface (km <sup>2</sup> )	Part (%)
Limon sableux	31.8	36%
Tourbe	19.7	22%
Sablo-limoneux	19.5	22%
Limon	14.5	16%
Argile-limoneuse	2.0	2%
limon fin	1.3	1%
Sable	0.2	0%
Total	89	100%

## 5.2 Modèle du besoin en irrigation

### 5.2.1 Pommes de terre : comparaison avec des mesures locales

Mesures de la tension hydrique

La coopérative d'irrigation Delley-Portalban dispose d'un réseau de cinq sondes Watermark disponibles via l'outil internet climaps (<http://www.climaps.com>). Toutes les sondes sont installées sur des champs de pommes de terre avec deux capteurs installés à des profondeurs de 20, respectivement 40 cm. Elles captent la tension hydrique du sol, permettant le calcul approximatif de l'humidité relative du sol. La comparaison de ces valeurs avec les résultats de simulation apporte une forme de vérification qualitative du modèle. En raison des incertitudes liées à la technique de mesure, il ne s'agit pas ici d'une

validation au sens scientifique du terme, mais plutôt d'une vérification de l'aptitude du modèle à fournir des résultats réalistes (plausibilité des résultats).

Le réseau de mesures est présenté à la Fig. 7. La sonde 1570 est sélectionnée pour la suite des analyses car elle présente la meilleure qualité de mesure. La sonde 1571 semble avoir un problème de mesure ou de transmission. Les sondes 1569 et 1572 semblent être posées trop proches du bord du champ et ne doivent pas recevoir toute l'eau d'irrigation.

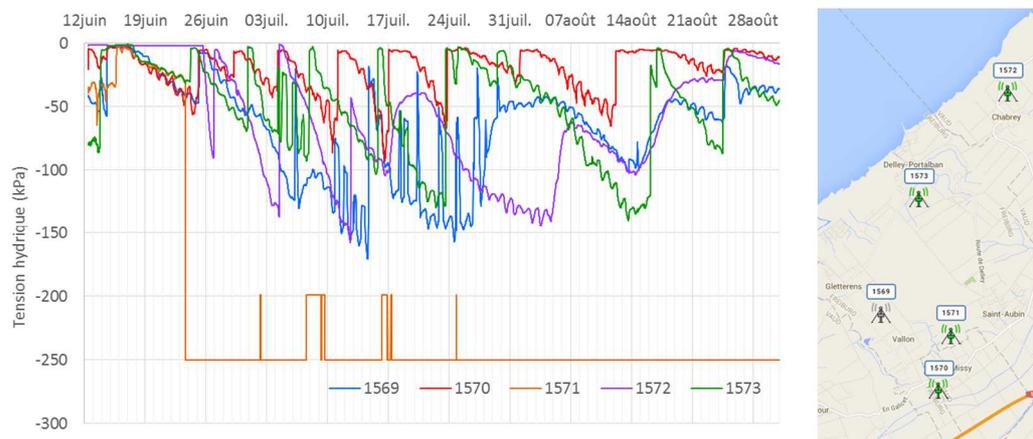


Fig. 7 : Réseau de mesure de la coopérative d'irrigation Delley-Portalban (Source : <http://www.climaps.com>)

Calcul de  
l'humidité du  
sol

Le calcul de l'humidité relative en fonction de la tension hydrique se base sur l'équation de Brooks et Corey (Rawls et al., 1982) et se présente sous la forme suivante :

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (\Psi_b / \Psi)^\lambda$$

Avec :

- $\Theta$  : Humidité relative [-]
- $\Theta_r$  : Humidité résiduelle du sol [-]
- $\Theta_s$  : Humidité du sol saturé [-]
- $\Psi_b$  : Paramètre qui représente le potentiel matriciel à l'entrée d'air [cm]
- $\Psi$  : Pression capillaire (équivalent à la tension hydrique) [cm]
- $\lambda$  : Indice de distribution de la taille des pores

L'analyse proposée se base sur l'hypothèse d'un sol limono-sableux, typique de la région. Ses caractéristiques sont fixées dans le modèle, dont l'humidité du sol à saturation ( $\Theta_s = 0.41$ ) et le point de flétrissement permanent qui est considéré ici égal à l'humidité résiduelle ( $\Theta_r = 0.09$ ). Il reste deux paramètres modifiables, dont les valeurs sont choisies selon la littérature. (Rawls et al., 1982).

Analyse de  
l'année 2014

La Fig. 8 présente la comparaison entre l'humidité du sol observée à la station 1570 et celle simulée pour l'année 2014. Une comparaison visuelle des données de tension hydrique combinées aux données de précipitation permet de définir les irrigations observées. Lorsqu'il y a une augmentation de la tension hydrique alors qu'il n'y a pas eu de précipitations, une irrigation a eu lieu. Selon les informations des agriculteurs, les irrigations sont comprises entre 25 et 30 mm. Grâce à ces informations, les irrigations observées sont alors définies.

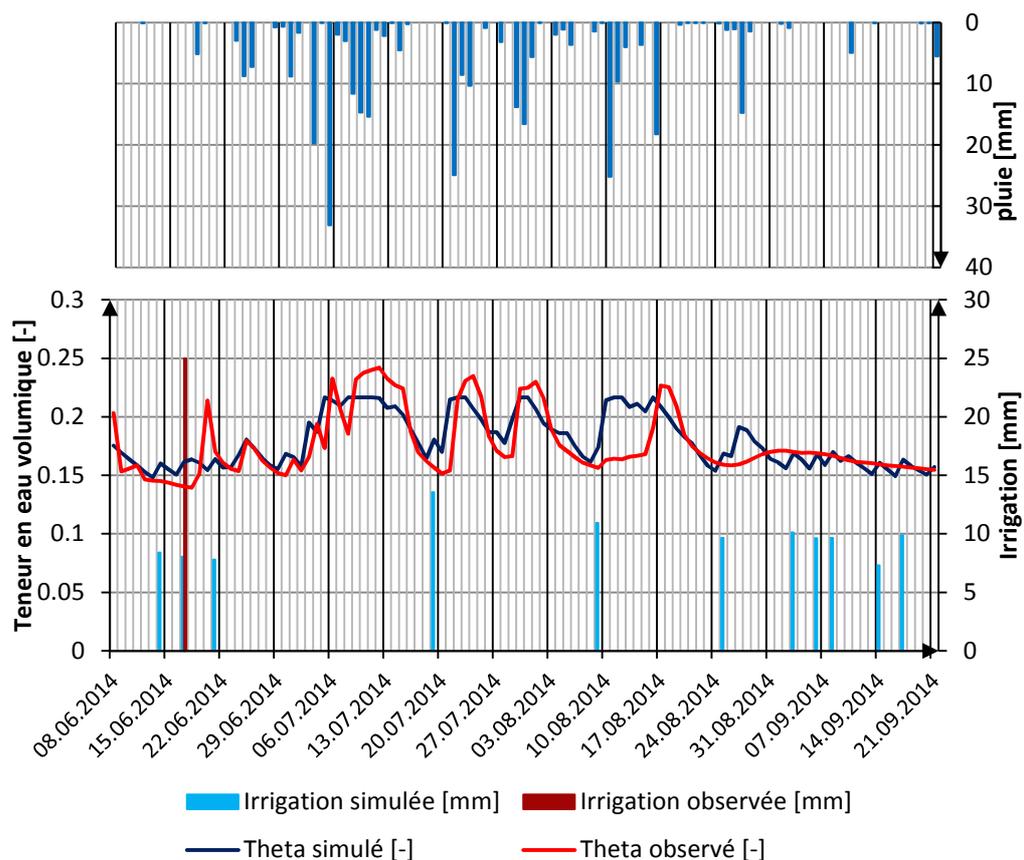


Fig. 8 : Comparaison de l'humidité du sol simulée (pomme de terre à Vallon, sol limoneux sableux) et observée (station 1570, Median 1) pour l'été 2014

L'année 2014 est une année humide et il n'y a par conséquent que très peu d'irrigation. Dans ce cas, l'humidité du sol est principalement influencée par les précipitations. La Fig. 8 montre que l'humidité du sol observée et simulée suivent la même tendance. Ainsi, le modèle du sol semble représenter correctement la variation de la teneur en eau observée du sol et une bonne confiance peut lui être attribuée.

Plusieurs irrigations simulées sont cependant produites par le modèle alors qu'elles ne sont pas observées. Ceci s'explique par le fait que le modèle calcule le besoin en irrigation sur une base journalière sans anticipation des pluies des jours suivants. Chaque jour, le besoin en eau est calculé pour éviter tous stress de la plante. En pratique, la décision d'irriguer ou pas est prise par l'agriculteur, mais cette optimisation n'est pas représentée dans le modèle. Ainsi, un jour de besoin en eau suivi par des précipitations (prévision) n'amène en pratique pas à une irrigation, contrairement au modèle. Les irrigations simulées du 19.07, 09.08 et du 25.08 se trouvent chacune avant une précipitation conséquente et n'ont donc pas eu lieu en pratique. Il peut être déduit de cette analyse que les résultats des simulations, appliqués à une période passée, correspondent plutôt à une borne supérieure des besoins en eau.

Analyse de  
l'année 2015

La même comparaison peut être réalisée pour l'année 2015, beaucoup plus sèche et où l'irrigation devient déterminante. Le résultat est présenté à la Fig. 9.

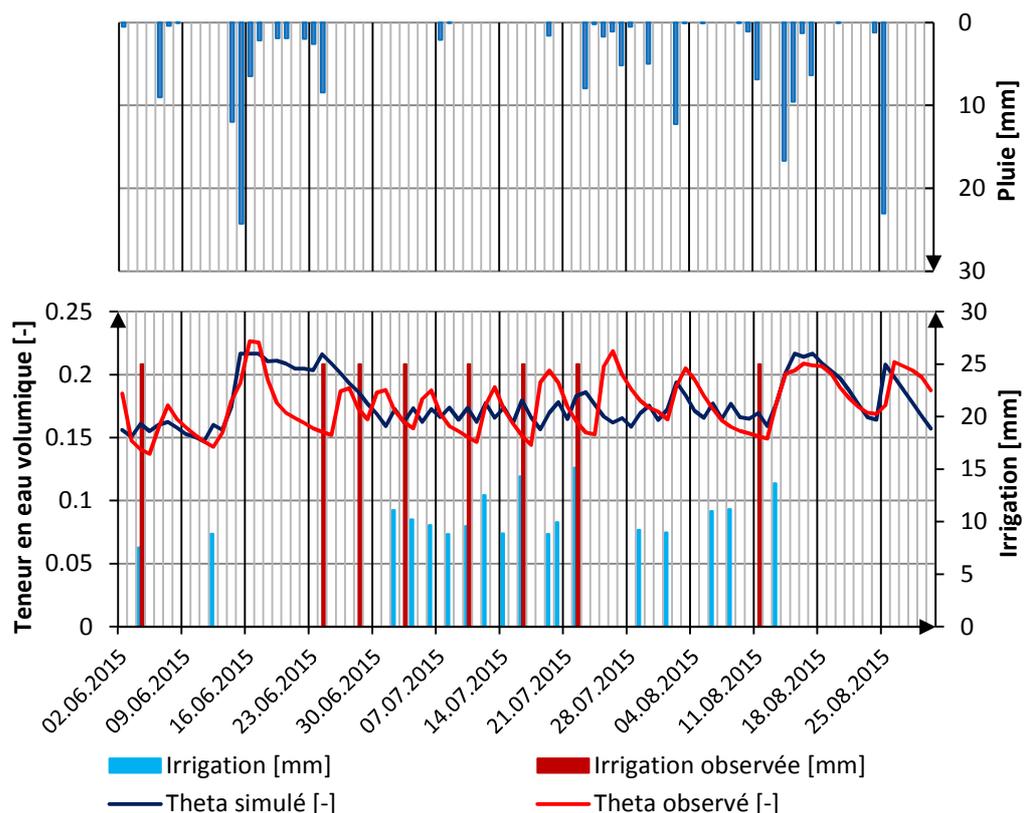


Fig. 9 : Comparaison de l'humidité du sol simulée (pomme de terre à Vallon, sol limoneux sableux) et observée (station 1570, Median 1) pour l'été 2015

Avec la canicule, l'été 2015 nécessite beaucoup d'irrigations. Le graphique montre une différence des cycles d'irrigations sur le terrain et dans le modèle. Alors que dans le modèle le moment et la quantité d'irrigation sont choisis uniquement en fonction de l'humidité du sol, d'autres contraintes telles que des raisons logistiques ou le tournus des installations s'ajoutent dans la pratique. Selon l'information des agriculteurs, un passage d'irrigation comprend environ 25 mm. Au contraire, d'après le modèle, une irrigation optimale se réalise plus fréquemment mais avec des volumes plus faibles. Ainsi, les cycles d'humidité du sol observés sur le terrain sont plus grands. Néanmoins, il est important de noter que le volume total de l'irrigation simulée est proche de celui observé. Pour l'année 2015, les résultats sont :

- Irrigation totale observée : 200 [mm]
- Irrigation totale simulée : 190 [mm]

Dans ce cas particulier, le modèle parvient à produire une bonne estimation globale de l'irrigation nécessaire aux cultures durant la saison.

Vérification  
qualitative du  
modèle

En comparant les simulations et les mesures réelles de l'humidité du sol, il est montré que le modèle parvient à une bonne estimation des différents paramètres importants pour l'irrigation, malgré des simplifications inhérentes aux informations disponibles. Afin de compléter cette analyse, des expériences plus complètes devraient être étendues sur d'autres stations de pompage, permettant des tests plus complets et donc plus représentatifs.

### 5.2.2 Analyse interannuelle des besoins de la pomme de terre

L'analyse multiannuelle des besoins en eau est présentée dans ce chapitre. L'attention est portée sur les plantations de pommes de terre, une culture sensible à la sécheresse. Les années 2000 à 2015 sont analysées. Il faut noter que l'année 2015 n'est pas complète dans l'analyse. Par conséquent, la fin de la période de développement n'est pas comprise dans le bilan.

**Besoin moyen en irrigation** Le besoin en irrigation multiannuel moyen pour une culture de pommes de terre dans la Broye vaut 195 mm/an, équivalant à environ 14 m<sup>3</sup>/ha/jour de végétation. L'année 2003 a les besoins les plus élevés (280 mm).

**Besoins selon les types de sol** Les cultures de pommes de terre dans la Broye s'exploitent sur différents types de sol. Selon leurs caractéristiques, les besoins en irrigation peuvent considérablement varier. (Fig. 10). Les sols lourds comme le limon, le silt ou l'argile ont besoin de plus d'eau que les sols sableux (Fuhrer, 2010).

Analyse multiannuelle

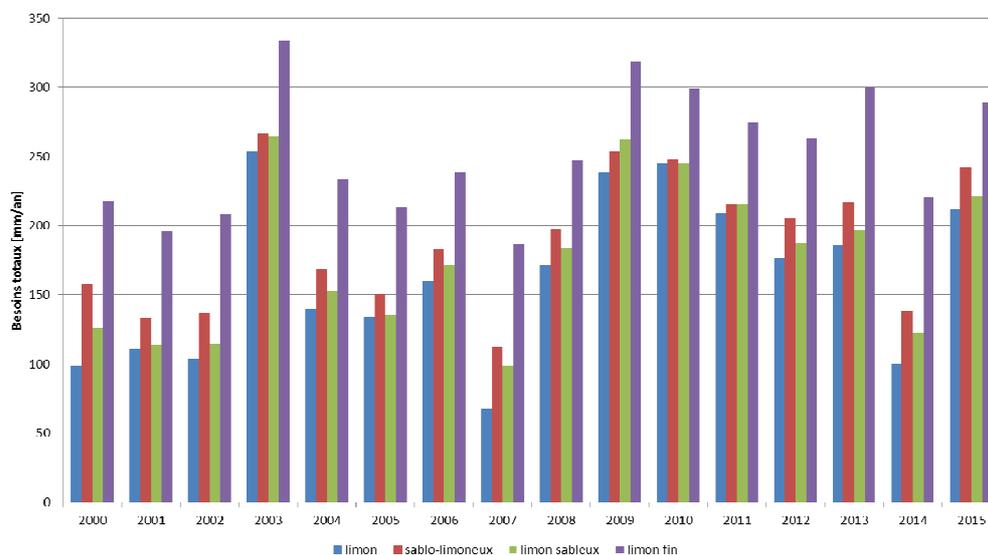


Fig. 10 : Besoins totaux en irrigation selon les différents types de sol. Valeurs issues des simulations.

Les besoins en eau sont toujours plus élevés pour le sol limoneux fin. Il se différencie aussi des autres sols dans le nombre de passages d'irrigation durant la période de végétation et la quantité d'eau fournie par passage (Tab. 3). Les trois autres types de sol sont proches dans les besoins en eau. Le type de sol limoneux fin n'est pas fréquent sur le périmètre d'étude et n'est pas représentatif de la région.

Tab. 3 : Nombre d'irrigation et quantité d'eau par irrigation selon différents types de sol

Nombre d'irrigation et quantité d'eau	Type de sol	limon	limon sableux	Sablo-limoneux	limon fin
	<b>Nombre de passages d'irrigation moyen</b>		14	23	17
<b>Quantité d'eau moyenne par irrigation [mm]</b>		12.1	10.7	8.2	4.4

Comme déjà décrit au chapitre 5.2.1 le modèle a tendance à surestimer le nombre de passages d'irrigation par rapport à la pratique. Toutefois, le volume total annuel proposé par le modèle est une bonne estimation. Le Tab. 3 montre ainsi que plus la capacité de stockage d'eau dans le sol est faible, plus le nombre d'irrigation est élevé.

Besoins en irrigations selon la phase de végétation

La durée de végétation est divisée en plusieurs phases : initialisation, développement, mi-saison et fin de saison. La Fig. 11 présente les besoins en eau des différentes phases pour une culture de pommes de terre sur un sol limoneux sableux. Ce sol est représentatif des autres types de sol, car il est très fréquent dans la région et présente des caractéristiques correspondant à la moyenne. Le sol limoneux fin n'est statistiquement pas représentatif pour la région et ne représente qu'une petite surface.

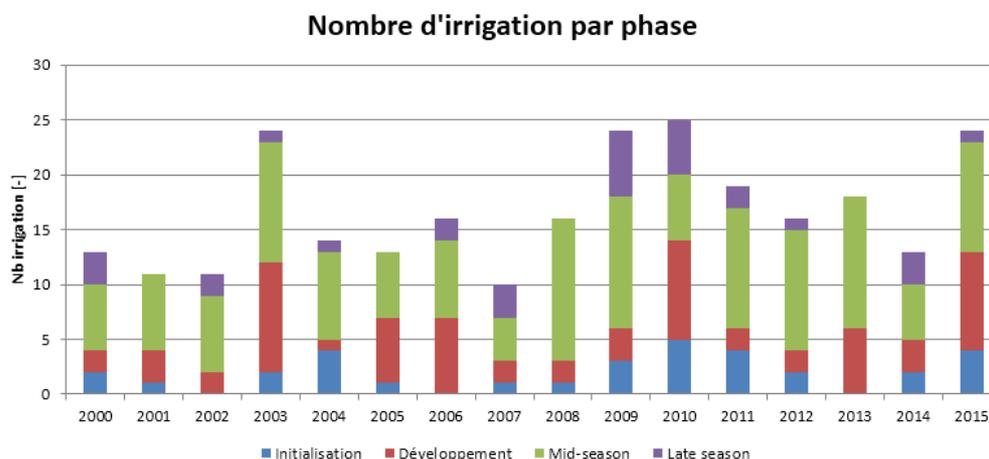


Fig. 11 : Besoins totaux des différentes phases de végétation pour une culture de pommes de terre sur un sol de type limon sableux. Valeurs issues des simulations.

La phase de la mi-saison est la plus longue et celle qui a les plus grands besoins. Elle s'étend environ de mi-juillet jusqu'à début septembre. C'est statistiquement dans cette période qu'il y a les températures les plus élevées et les précipitations les plus faibles. Lors des années caniculaires (2003 et 2015), la phase de développement a aussi des besoins en eau conséquents. La comparaison entre les années caniculaires pour une culture de pommes de terre sur un sol de type limon sableux est montrée à la Fig. 12.

Comparaison  
des besoins lors  
d'événement de  
sécheresse

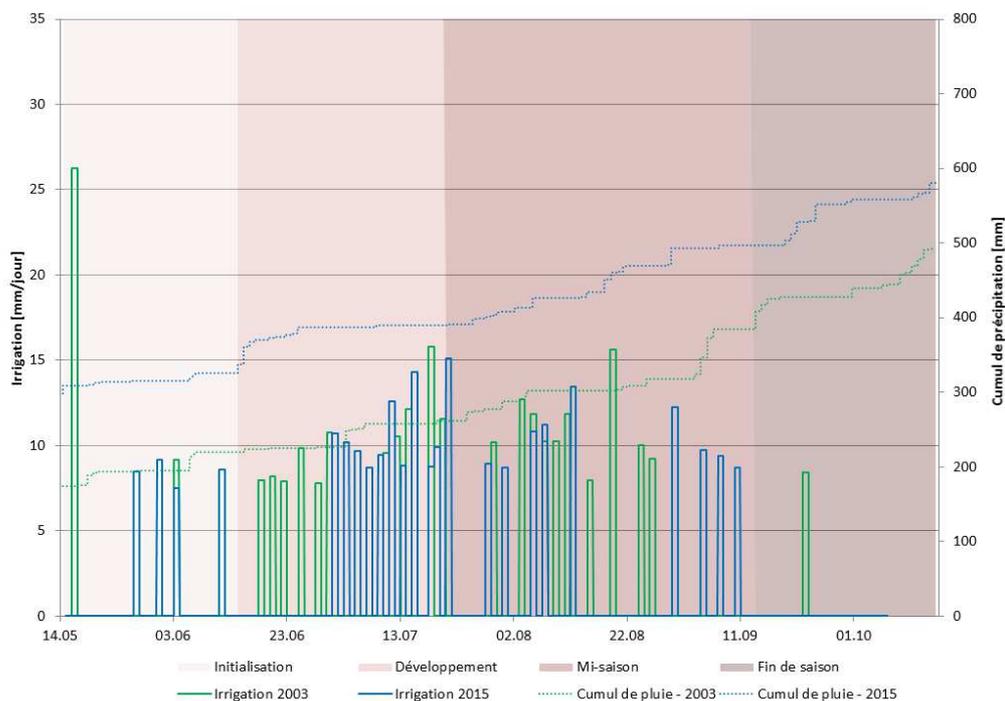


Fig. 12 : Comparaison entre les années caniculaires (2003 et 2015) d'une culture de pommes de terre sur un sol de type limon sableux. Le besoin d'irrigation est issu des simulations.

L'année 2015 a eu moins de conséquence sur l'irrigation que l'été 2003, malgré une canicule de plus longue durée. Les précipitations élevées de mai 2015 ont permis de saturer toutes les cultures. Ainsi, au début de la canicule, le sol avait encore des réserves d'eau. Pour ces deux années, la phase de développement et la mi-saison demandent beaucoup d'eau. Le premier pic le 15 mai est un effet de bord et dépend de la saturation du sol choisie pour l'initialisation du modèle. En effet, à partir du jour de semis, le régime hydrique est maintenu à l'aide de l'irrigation. Si le sol est très sec à cet instant, alors une quantité supérieure aux apports habituels doit lui être apportée. Les données pour l'année 2015 étant disponibles jusqu'au 31.08, le graphique ne présente pas la fin de saison de l'année 2015.

La moyenne annuelle des besoins en irrigation sur 15 ans est proche de la moyenne annuelle des besoins pour l'année 2006. Elle est donc considérée comme une année standard. La comparaison entre une année caniculaire (2003) et l'année 2006 est présentée dans la Fig. 13.

Comparaison  
des besoins lors  
d'une  
sécheresse et  
d'une année  
typique

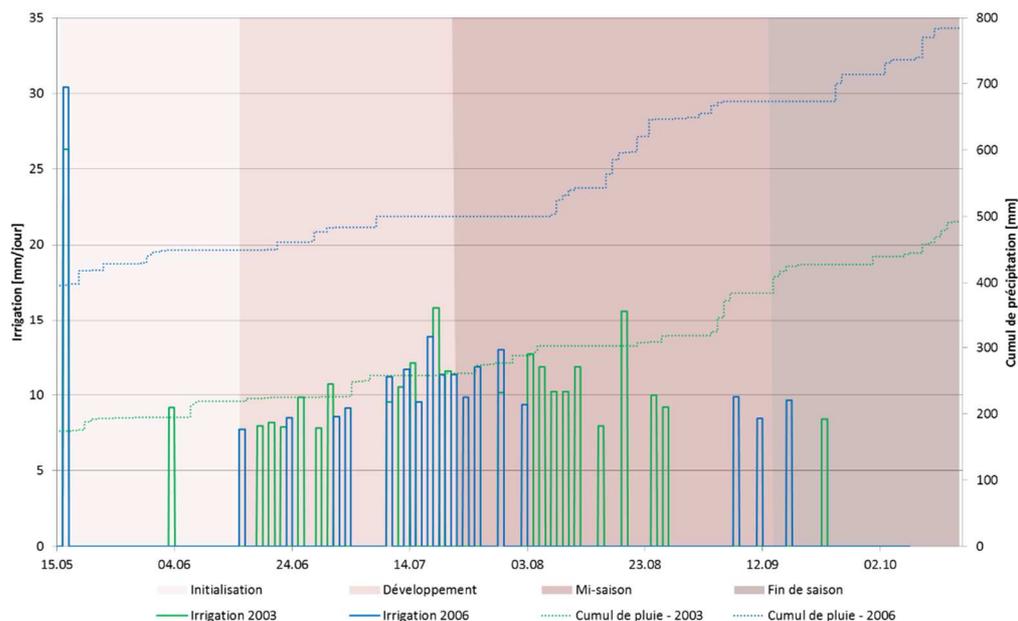


Fig. 13 : Comparaison entre une année caniculaire (2003) et une année dite standard (2006) d'une culture de pommes de terre sur un sol de type limon sableux. Le besoin d'irrigation est issu des simulations.

La différence des besoins d'irrigation est élevée dans la phase mi-saison. La canicule de 2003 a duré de fin juin jusqu'au mois d'août. La grande partie de la sécheresse a eu donc lieu lors de la mi-saison, en concomitance avec la phase de végétation ayant chaque année les plus grands besoins en eau. Ce phénomène se voit bien sur la figure : en 2003, le cumul de précipitations estivales est tellement faible que les irrigations sont très fréquentes.

### 5.2.3 Légumes : évaluation avec des mesures locales

Irrigation Ried-  
Moos

La coopérative d'irrigation Ried-Moos dispose d'un système de pompage d'eau dans la nappe pour l'irrigation. Le réseau de distribution est centralisé avec un réseau sous pression à environ 8 bars et un point de prise tous les 60 mètres où les membres de la coopérative peuvent venir s'approvisionner. La coopérative compte aujourd'hui une septantaine de membres avec une surface irrigée de l'ordre de 320 ha (avant 2010 : environ 280 ha). La répartition des cultures est estimée à 80% de légumes et 20% de pommes de terre sur la base des statistiques agricoles (Données SIPA, OFAG 2013). Pour garder une gestion simple de la coopérative, les compteurs d'eau de chaque membre sont relevés une fois par an. Ces mesures, utilisées pour la facturation, permettent aussi de déterminer un besoin moyen annuel par hectare (Tab. 4).

Consommation d'eau pour l'irrigation selon facturation annuelle

Tab. 4 : Coopérative d'irrigation Ried-Moos. Valeurs issues de la facturation.

	Surface irriguée	Consommation totale	Consommation à l'hectare	
	[ha]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /ha]	[mm]
oct. 2003 - oct. 2004	271	167'203	618	62
oct. 2004 - oct. 2005	276	180'187	653	65
oct. 2005 - oct. 2006	272	231'412	852	85
oct. 2006 - oct. 2007	246	111'701	454	45
oct. 2007 - oct. 2008	253	174'375	689	69
oct. 2008 - oct. 2009	261	278'755	1'068	107
oct. 2009 - oct. 2010	335	301'783	900	90
oct. 2010 - oct. 2011	347	445'990	1'283	128
oct. 2011 - oct. 2012	302	223'950	742	74
oct. 2012 - oct. 2013	326	257'284	788	79
oct. 2013 - oct. 2014	315	182'698	580	58

Modèle vs mesures

Ces mêmes années sont simulées avec le modèle de légumes afin de comparer le besoin annuel simulé et mesuré. Il est à noter que deux traitements sont effectués sur les valeurs simulées avant de pouvoir comparer les résultats.

Tout d'abord, le modèle ne calcule pas d'optimisation par rapport à la pluie prévue. Ainsi, une demande est calculée chaque jour sur la base du besoin de la plante et de l'eau disponible dans le sol, mais sans tenir compte des pluies futures. Pour cette raison :

1. si une pluie d'un cumul supérieur à 10 mm est observée sur les deux jours qui suivent la demande d'irrigation, l'irrigation n'est pas considérée.

Le modèle ne tient pas non plus compte des contraintes techniques d'irrigation comme la disponibilité des infrastructures ou encore le temps nécessaire. Pour cette raison :

2. si une irrigation de plus que 20 mm a eu lieu pendant les quatre jours qui précèdent la demande d'irrigation, cette dernière est éliminée.

Validation du modèle

Fig. 14 montre la comparaison entre la demande moyenne annuelle simulée (bleu) et déterminée selon la facturation (rouge). De manière générale une bonne correspondance peut être observée. A l'exception de trois années sur les onze, le modèle présente une légère tendance à la surestimation de la demande en irrigation. Il est à noter que dans le modèle les conditions d'irrigation évitent tout stress de la plante, alors qu'en pratique il est possible de maintenir la plante en stress hydrique sur une courte période. De plus une efficacité d'irrigation de 70% est admise de manière générale dans le modèle. Une augmentation de l'efficacité à 80% diminuerait les valeurs simulées pour se rapprocher encore plus des valeurs mesurées (rouge) déduites de la facturation. Selon ces résultats, les quantités irriguées en pratique sont proches des besoins théoriques et l'usage de l'eau se fait de manière raisonnable.

Volume d'eau  
annuelle irrigué  
selon modèle et  
facturation

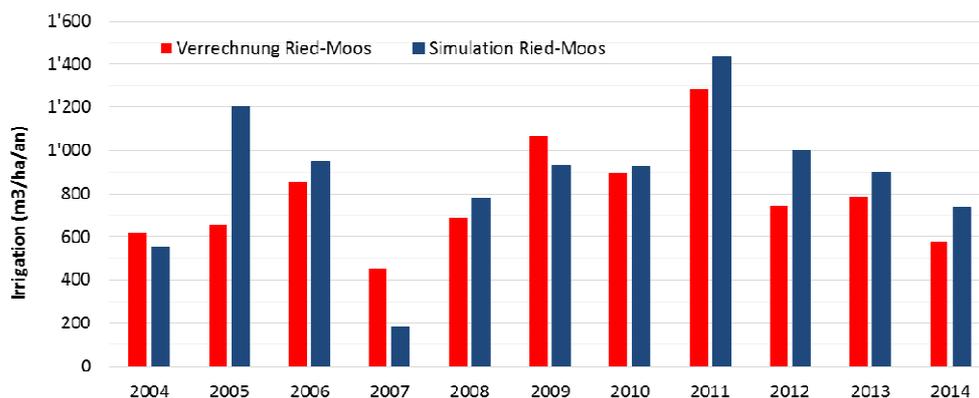


Fig. 14 : Demande en irrigation annuelle selon la facturation (rouge) et la simulation (bleu)

### 5.3 Modèle des ressource en eau

#### 5.3.1 Calage du modèle de ressource

Apports lac de  
Bienne

Le modèle de simulation opérationnel utilise en entrée les stations météorologiques de MétéoSuisse ainsi que des stations cantonales de Berne.

La simulation des débits et des niveaux des lacs est très complexe, car de nombreux affluents doivent être modélisés, tout comme les ouvrages hydroélectriques ou de régulation des niveaux des lacs les plus influents.

Les affluents principaux du lac de Bienne sont l'Aare et la Suze. Ils conditionnent le niveau du lac et la disponibilité en eau de la région. Pour avoir une bonne estimation du débit de l'Aar, il est primordial de correctement modéliser la régulation du lac de Thun et les apports en provenance de la Sarine, fortement influencés par les aménagements hydro-électriques du Groupe-e (lacs de Gruyère et de Schiffenen). La Fig. 15 montre le modèle de l'Aar. Pour toutes les gammes de débit, le modèle représente correctement les apports de l'Aar dans le lac de Bienne. Le modèle de la Suze est montré à la Fig. 16 avec un comportement qui est globalement satisfaisant.

Aare à  
Hagneck

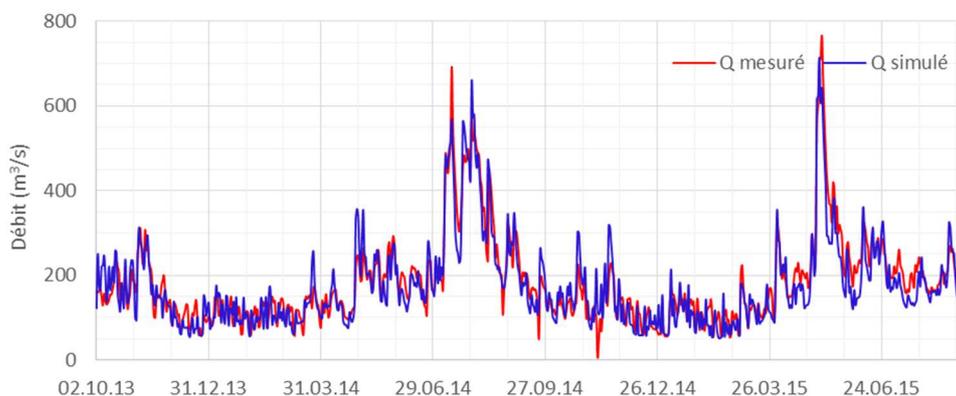


Fig. 15 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs journalières) de l'Aar à Hagneck

Suze à Bienne

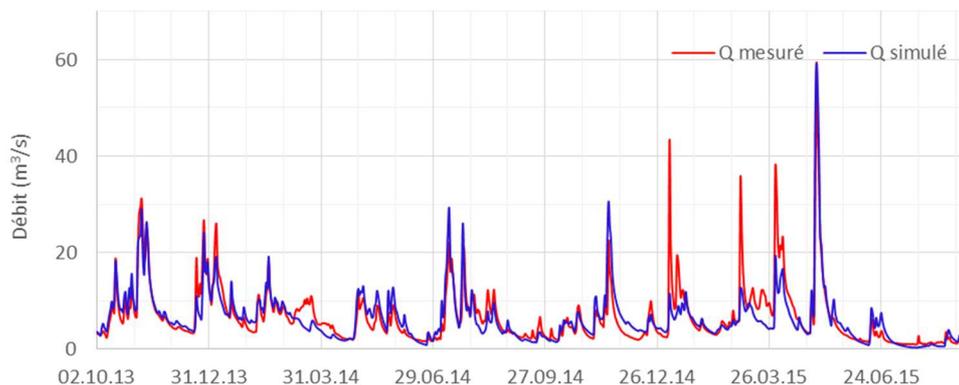


Fig. 16 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs journalières) pour la Suze à Bienne

Apports lac de  
Neuchâtel

Pour le lac de Neuchâtel, c'est l'Orbe et l'Areuse qui constituent les principaux affluents. La modélisation des ces deux cours d'eau est présentée aux Fig. 17 et Fig. 18.

Orbe au Chalet

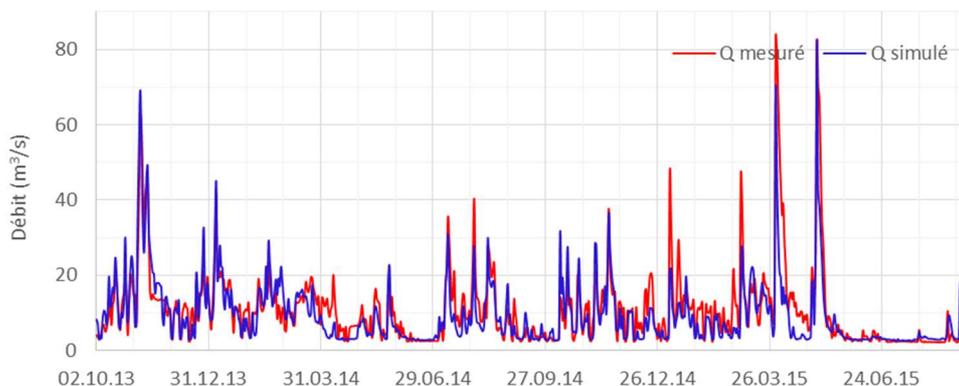


Fig. 17 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs journalières) de l'Orbe au Chalet

Areuse à  
Boudry

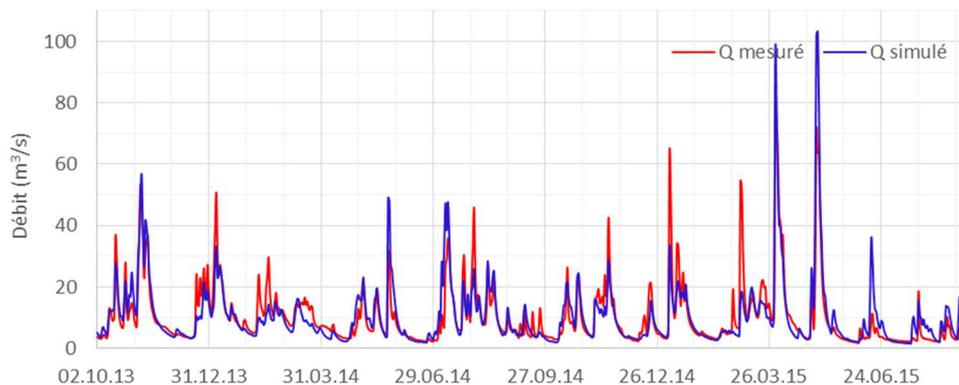


Fig. 18 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs journalières) de l'Areuse à Boudry

Apports lac de  
Morât

Pour le lac de Morat, il s'agit de considérer les affluents qui sont la Bibera, la Broye, la Petite-Glâne, l'Arbogne et le Chandon. Ces cours d'eau sont importants, car ils se trouvent dans le périmètre d'étude et peuvent ainsi directement servir comme ressource d'eau pour l'irrigation. Il est donc important de bien simuler les faibles débits (débits d'étiage) lors du calage de ces cours d'eau pour correctement prédire les ressources lors des périodes sèches.

Le calage de la Broye est présenté aux Fig. 19 et Fig. 20. L'année 2014 est une année humide avec des crues fréquentes. En 2015 l'été est très sec, permettant de démontrer la capacité du modèle à simuler correctement les bas débits.

Broye à  
Payerne 2014

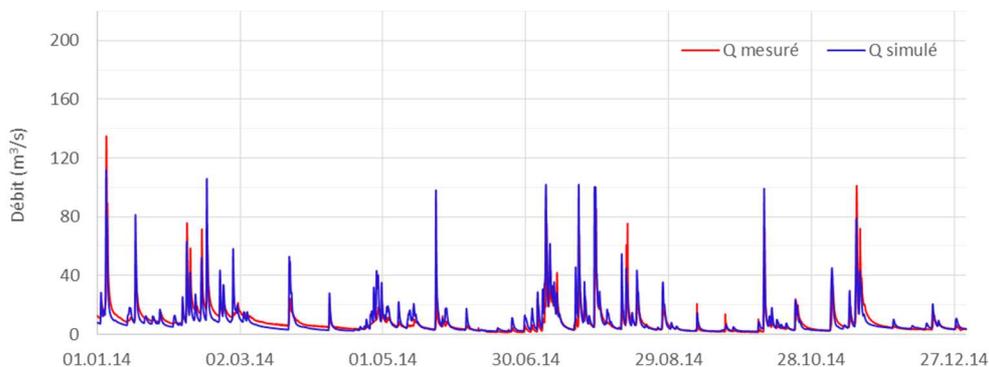


Fig. 19 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs horaires) de la Broye à Payerne en 2014

Broye à  
Payerne 2015

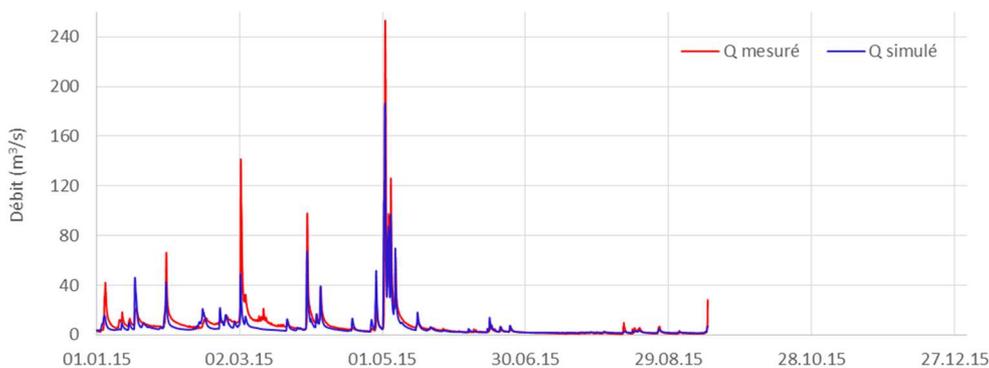


Fig. 20 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs horaires) de la Broye à Payerne en 2015

Le calage de la Bibera est montré aux Fig. 21 et Fig. 22.

Bibera à  
Kerzers 2014

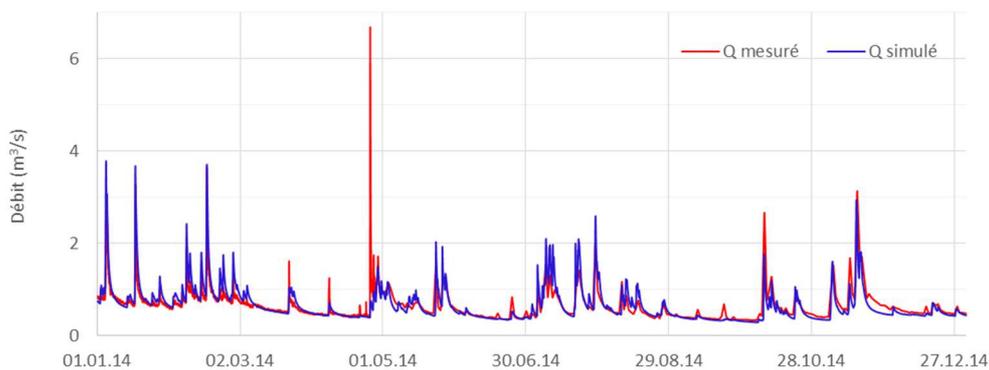


Fig. 21 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs horaires) de la Bibera à Kerzers en 2014

Bibera à  
Kerzers 2015

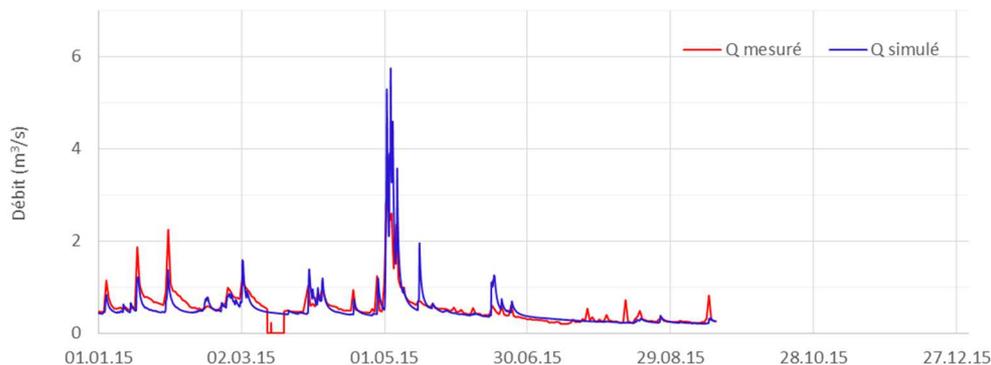


Fig. 22 : Débit mesuré et débit simulé (valeurs horaires) de la Bibera à Kerzers en 2015

### 5.3.2 Découpage en zone d'irrigation

Module de  
régulation par  
zone  
d'irrigation

Le module de régulation doit recevoir en entrée une demande et une offre pour une région définie. Ainsi, le périmètre d'étude doit être subdivisé en zones en fonction de la disponibilité de l'eau. Le périmètre est découpé en zones selon les eaux courantes naturellement disponibles. Il s'agit donc d'un découpage topographique. Les 11 zones sont présentées à la Fig. 23. Les trois zones en gris sont des rives où la ressource est constituée par le lac. A titre d'information, les prélèvements dans les lacs ne sont pas aujourd'hui une pratique courante.

Le Tab. 1 (chapitre 5.1.1) résume les surfaces agricoles totales par zone d'irrigation selon le découpage proposé ci-dessous. Pour rappel, le système opérationnel ISB considère uniquement les cultures de pommes de terre, de légumes et de tabac comme cultures toujours irriguées. Pour les betteraves, un taux de surface irriguée de 10% est admis selon les informations du questionnaire de MandaTerre (2011) et des agriculteurs questionnés en 2015, alors que le maïs n'est pas considéré comme culture irriguée.



Tab. 5 : Caractéristiques des projets d'irrigation réalisés

Projets	Commune	Cultures irriguées	Surface irriguées	Source d'eau	Zone naturelle
Société coopérative de pompage au lac à Delley-Portalban	Vallon, Saint-Aubin, Vully-les-Lacs et Delley-Portalban	Pommes de terre, légumes et tabac	170 ha	Lac de Neuchâtel	Petite-Glâne
Société d'arrosage « Duc – Lininger – Messer »	Forel, Rueyres-les-Prés et Morens	Pommes de terre	120 ha	Lac de Neuchâtel	Petite-Glâne
Bewässerungsgenossenschaft Ried-Moos	Ried et Kerzers	Légumes et pommes de terre	330 ha	Nappe	Bibera et Grand-Canal
Bewässerungsgenossenschaft Gempenach	Gempenach	Légumes et pommes de terre	70 ha	Nappe	Bibera
Bewässerungsgenossenschaft Galmiz	Galmiz	Légumes	140 ha	Canal de la Broye	Galmizkanal

## 5.4 isb.swissrivers.ch

Outil opérationnel La plateforme Internet est disponible sous [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) (ne pas taper « www »). Pour l'instant elle est protégée par mot de passe et sera disponible ouvertement dès la fin du projet et après les formations prévues en mars 2016.

Login site internet Adresse : [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch)  
 utilisateur : isb  
 mot de passe : proagricultura

### 5.4.1 Contenu du site

Alarme par zone d'irrigation Le site affiche les zones d'irrigation (Fig. 24) décrites au chapitre précédent. Pour chacune des zones, une alarme est déclenchée si le besoin en eau excède la ressource disponible (Tab. 6). Pour ce faire, un indicateur d'utilisation (IU) est calculé :

$$\frac{\text{Besoin}}{\text{Ressource disponible}} = \text{Indicateur d'utilisation (IU)}$$

Tab. 6 : Les trois niveaux d'alarme

Critère de déclenchement d'une alarme	Alarme	Critère	Interprétation
	Vert	IU < 0.8	Pas de problème. La ressource d'eau est suffisante pour couvrir l'ensemble du besoin d'irrigation.
	Orange	IU ≥ 0.8	La situation devient critique car plus que 80% de la ressource disponible est utilisée pour couvrir les besoins d'irrigation.
	Rouge	IU ≥ 1	Il y a une pénurie d'eau. La ressource d'eau n'est plus suffisante pour couvrir l'ensemble du besoin. Exemple : Si CU=2 il faudrait deux fois plus d'eau pour couvrir les besoins d'irrigation.

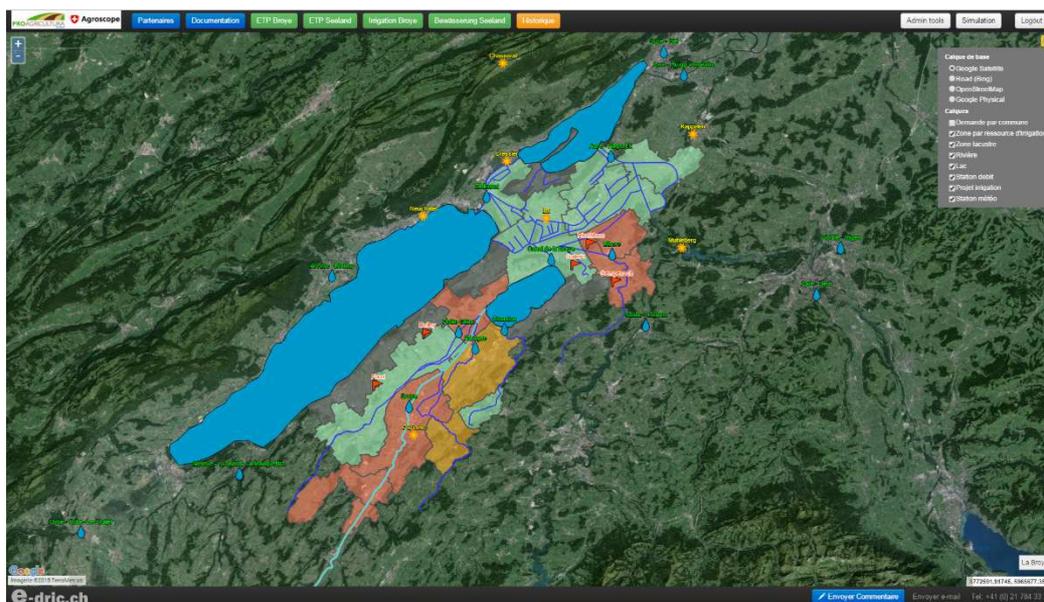


Fig. 24 : isb.swissrivers.ch. Exemple du 28 juin 2015.

Graphique par zone d'irrigation

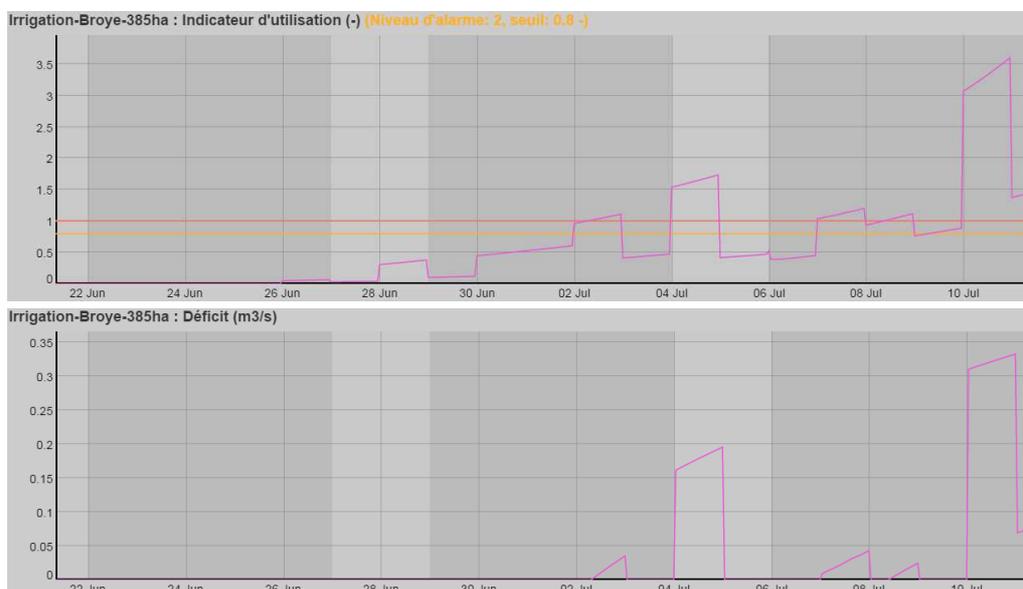
En cliquant sur la zone d'intérêt, cinq graphiques sont affichés pour montrer le détail de la situation pour la zone d'irrigation sélectionnée (Fig. 25).

- Graph 1 : Montre l'indicateur d'utilisation par jour.
- Graph 2 : Montre le déficit d'eau total en cas de pénurie
- Graph 3 : Montre le besoin total en eau d'irrigation.
- Graph 4 : Montre la ressource d'eau disponible (offre).
- Graph 5 : Montre l'eau encore disponible dans le cours d'eau après les prélèvements faites pour l'irrigation (débit restant).

Débit résiduel

Un déficit est observé sur la période de juillet alors que le débit restant n'atteint pas la valeur nulle. Un débit résiduel est imposé dans le modèle et les prélèvements sont limités pour garantir le débit minimal dans le cours d'eau.

Résultat par zone d'irrigation



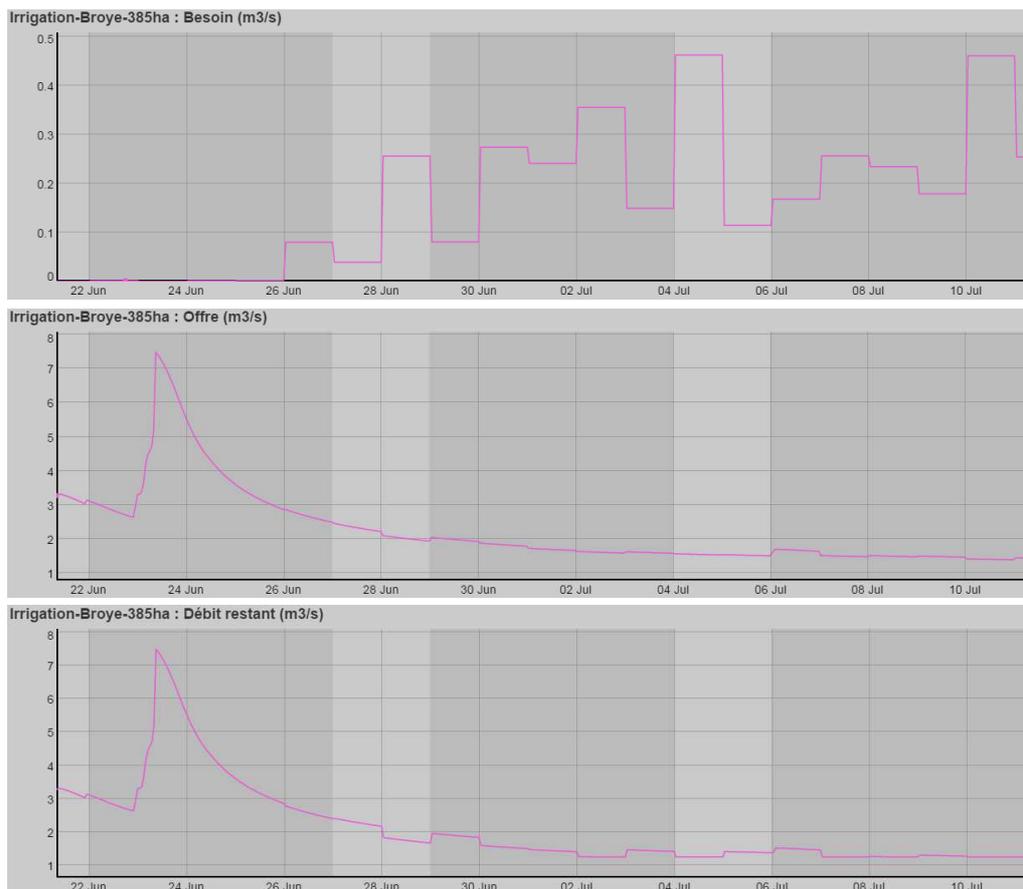


Fig. 25 : Détail de l'information affichée par zone d'irrigation. Exemple de la Broye.

ETp par région

Sur le site sont également proposés des synthèses pour la Broye et le Seeland. Ces graphiques permettent à l'agriculteur d'avoir l'information du besoin (evapotranspiration potentielle ETp) de la plante en fonction de la culture, du stade de développement et du climat (Fig. 26). Ceci permet d'évaluer facilement l'effet de la météo (température et ensoleillement) sur le besoin de la plante.

Résultat par culture irriguée

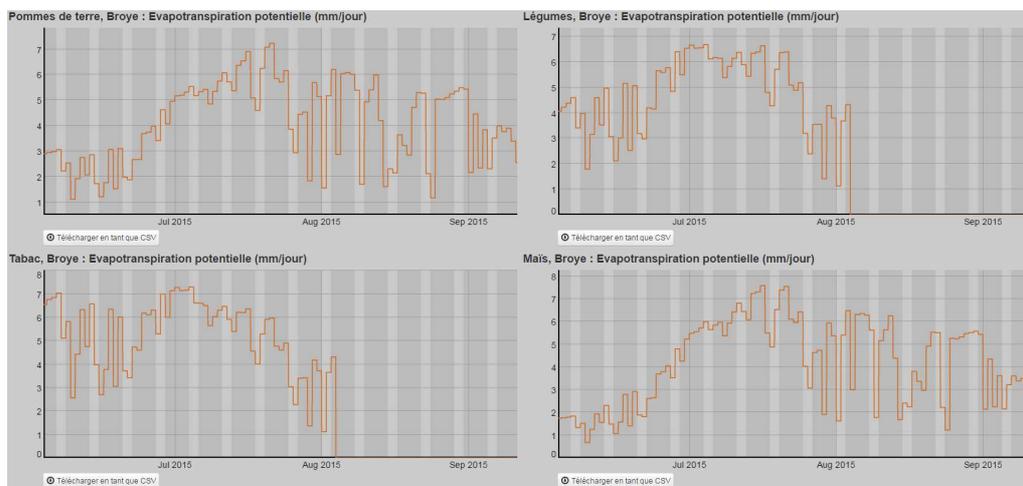


Fig. 26 : Evapotranspiration potentielle (ETp) pour quatre cultures type. Exemple de la Broye

Un autre résumé propose un graphe avec la fréquence et la quantité d'eau d'irrigation nécessaire (Fig. 27). Les deux cultures les plus irriguées, la pomme de terre et les légumes,

sont affichées, sur les deux sols les plus fréquents sur le périmètre d'étude, le limon sableux et la tourbe.

Résultat pour  
un champ type  
d'une culture  
irriguée

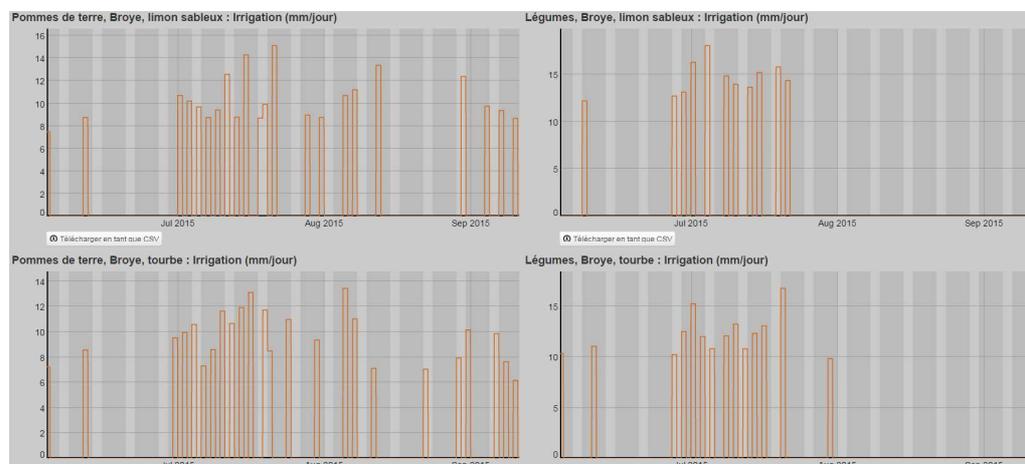


Fig. 27 : Besoin d'irrigation par culture et type de sol. Exemple de la Broye.

#### 5.4.2 Utilisation des prévisions en temps réel

En cliquant sur les objets de l'interface web des informations détaillées sont affichées. La ligne verte montre l'heure actuelle. Sur la gauche, la simulation du passé ou les mesures sont affichés. Sur la droite, la prévision pour les prochains dix jours est affichée.

Les prévisions peuvent être consultées au niveau d'un champ type d'une culture ou alors au niveau d'une région d'irrigation. Les prévisions par champ de culture sont une base de décision pour chaque agriculteur pour déterminer la fréquence et la quantité d'eau à irriguer. Les prévisions par zone d'irrigation fournissent une vision globale de la situation et une base de décision pour les autorités compétentes par rapport à la disponibilité de la ressource et à la demande globale de l'agriculture.

La Fig. 28 présente l'exemple de la prévision fournie le 10 août 2010 pour un champ de pommes de terre dans le Seeland. Le modèle prévoit une irrigation de onze millimètres pour le 11 août. Des pluies sont annoncées à partir du 13 août et le besoin de la plante sera satisfait sans irrigation supplémentaire. Dans cette situation, l'agriculteur doit évaluer si l'irrigation prévue est nécessaire malgré les pluies annoncées. Pour rappel, le modèle ne calcule pas d'optimisation par rapport aux pluies prévues. Le calcul du besoin tient uniquement compte des pluies du jour et du stock d'eau dans le sol. Ainsi, si l'agriculteur décide que la plante peut être exposée à une situation des stress hydrique pendant un à deux jours, alors l'irrigation prévue pour le 11 août ne doit pas être effectuée.

Aide à la  
décision pour  
un agriculteur

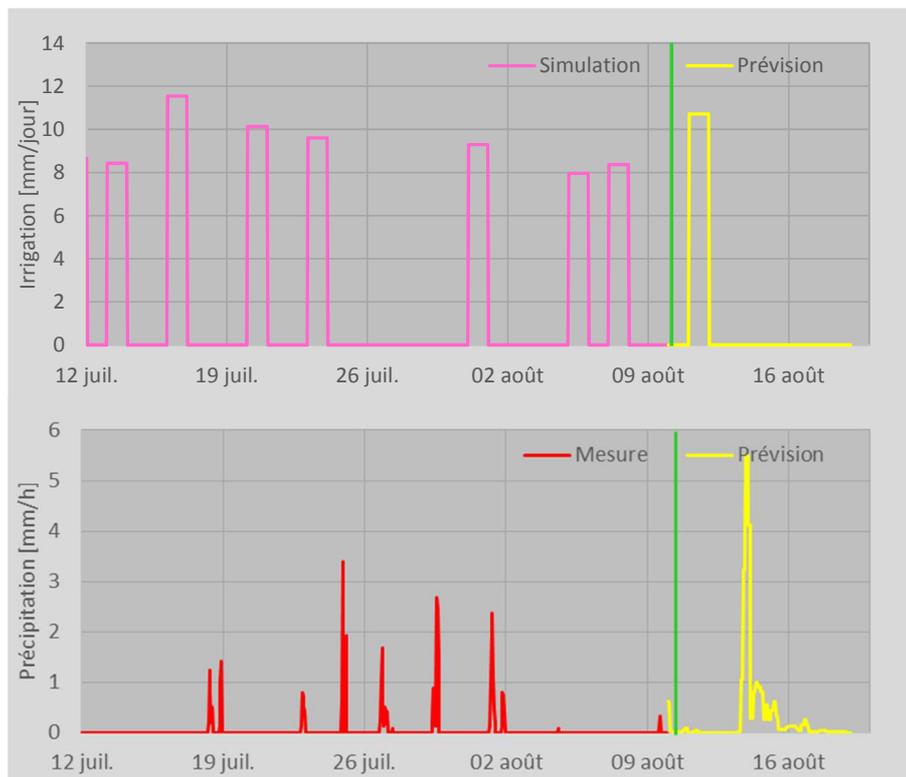


Fig. 28 : Exemple d'une prévision du 10 août 2015. Pommes de terre dans le Seeland sur un sol limon sableux.

Fig. 29 montre l'exemple d'une prévision fournie le 14 juillet 2015 pour la zone de la Petite-Glâne. Le modèle prévoit un déficit d'eau à partir du 20 juillet. Cela signifie que la ressource d'eau disponible ne peut plus fournir assez d'eau pour garantir l'irrigation de l'ensemble de la zone. Différents scénarios peuvent être envisagés : réduire les surfaces irriguées ou alors limiter l'irrigation par hectare. L'indicateur d'utilisation atteint la valeur de 1.45. Pour ne pas dépasser le seuil de 1, l'irrigation par hectare doit être réduite à 70% de la demande prévue. Ces scénarios d'optimisation ne se font pas calculés automatiquement mais les choix des utilisateurs peuvent être simulés et ainsi les scénarios envisagés peuvent être testés à grande échelle et dans un système d'interaction complexe.

Aide à la  
décision pour  
l'administration



Fig. 29 : Prévision de l'indicateur d'utilisation de l'eau pour la zone de la Petite-Glâne le 14 juillet 2015.

## 6 Synthèse

Système opérationnel depuis juin 2015	<p>Ce rapport présente les éléments de base du système de prévision des besoins et ressources en eau de la région Broye-Seeland. Ce système a été opérationnel dès juin 2015 et a subi un certain nombre d'adaptations suite aux premiers retours des utilisateurs. Il fournit chaque jour une nouvelle information pour la situation actuelle et les 10 prochains jours.</p>
Approche par simulation	<p>Le système <a href="http://isb.swissrivers.ch">isb.swissrivers.ch</a> a été développé par e-dric.ch en partenariat avec la station de recherche Agroscope et Pro Agricultura Seeland. Il permet de visualiser les principaux flux et réserves d'eau d'irrigation des régions Broye-Seeland. Ces informations sont basées sur une approche de simulation pluie-débit à haute résolution des cours d'eau et lacs, intégrant un modèle de demande en irrigation par l'agriculture développé par l'Agroscope et adapté à la technologie <i>Routing System</i> par e-dric.ch. Les données d'entrée sont les précipitations, le rayonnement solaire global et les températures de l'air. Les débits dans les cours d'eau ainsi que les niveaux des lacs sont utilisés pour l'initialisation du modèle.</p>
Information quantitative : déficit régional en eau d'irrigation	<p>L'information principale fournie par ce système est de nature quantitative : l'adéquation future entre ressource et besoin en eau est évaluée chaque jour, pour les 10 prochains jours, à l'échelle communale. Si la ressource future n'est pas suffisante, alors des alarmes sont déclenchées, mettant en garde les autorités compétentes sur la situation à venir. Cela fournit une base scientifique quantitative pour la régulation des prélèvements d'eau dans les rivières. Les déficits ou réserves éventuelles sont clairement chiffrés par le système, par ressource locale.</p>
Possibilité d'analyse locale par l'agriculteur	<p>Dans une moindre mesure, une information plus locale peut être tirée de ce système et valorisée par l'agriculteur : il s'agit du besoin d'irrigation par hectare d'une culture associée à un type de sol. Chaque jour, le besoin par hectare est calculé en fonction du stade de développement de la plante. Ce calcul est basé sur la météorologie des jours et mois précédents. Cette information, associée à la prévision du besoin des prochains jours, permet de choisir une stratégie d'irrigation (moment et quantité d'arrosage).</p>
Outil d'évaluation pour la planification	<p>Ce même système peut être valorisé pour la planification. En effet, étant basé sur la simulation continue, il permet de simuler des années du passé et de tester des variantes d'aménagement et de cultures. Ainsi, il est possible d'évaluer les besoins en eau d'irrigation d'années sèches et moyennes par région. Il est également possible d'évaluer l'efficacité de variantes d'aménagement ou de types de cultures en termes de besoins en eau.</p>
Combinaison d'échelles : bassin versant versus parcelle	<p>La complexité de ce système réside dans la combinaison de plusieurs échelles. L'échelle du bassin versant se mesure en centaines ou milliers de km<sup>2</sup>, tandis que l'échelle de la parcelle de culture est 1'000 fois plus petite. Il n'est naturellement pas réaliste de simuler toutes les parcelles, mais leur regroupement doit garantir la bonne représentation des processus et permettre une estimation quantitative fiable de la demande d'irrigation. Grâce au modèle <i>Routing System</i>, basé sur une approche orientée objet, cette combinaison d'échelle est réalisée, permettant par exemple de comparer le débit de la Broye avec la demande en irrigation de la région de Payerne.</p>
Incertitudes surtout dues	<p>Par définition, la modélisation est soumise à des incertitudes et ne permet pas de reproduire exactement tous les processus naturels. Cette incertitude provient tout</p>

aux informations inexistantes à l'échelle locale d'abord de la représentativité des modèles de comportement qui sont une simplification de la réalité. Ensuite, les données utilisées sont aussi source d'erreurs, dans la mesure où elles ne sont pas disponibles partout et doivent donc être extrapolées. En ce qui concerne les prévisions météorologiques, ces incertitudes sont reconnues et observées par chacun. Enfin, la résolution du modèle ne permet pas d'intégrer toutes les données en détail : toutes les parcelles ne sont ainsi pas délimitées ni paramétrées. Il s'agirait d'ailleurs d'une tâche impossible, la donnée n'existant pas à cette échelle.

Qualité prévisionnelle bonne (besoin en eau) à excellente (débits des rivières) Toutefois, la représentativité du système peut être considérée comme bonne à excellente. La validation du modèle permet de lui attribuer une grande confiance dans le calcul des débits des cours d'eau et niveaux des lacs. L'incertitude est plus importante pour le calcul du besoin en eau de la culture : le type de sol et ses caractéristiques n'est pas parfaitement connu ni homogène, et le stade de développement de la plante tout comme le niveau d'humidité dans le sol ne sont pas monitorés. Ainsi, seules des vérifications globales des besoins en irrigation ont pu être menées, contrôlées avec des indicateurs tels que facturations annuelles ou extrapolation de sondes de mesure de tension hydrique. Au final, le modèle a montré que les ordres de grandeur étaient bien approximés (10-20% de marge d'erreur), tout comme les périodes délicates ont pu être mises en évidence.

Les données utilisées dans le modèle pour la surface et la répartition des types de cultures correspondent à l'année 2013. Elles devraient être adaptées en cas de changement d'utilisation du sol. Cependant, cette répartition est admise représentative en moyenne.

## 7 Perspectives

Les perspectives d'amélioration du système opérationnel sont nombreuses, même si l'information actuellement fournie est de très bonne qualité. Cependant, il s'agit de traiter les plus efficaces en premier. Ci-dessous sont présentés les développements qui permettraient une valorisation maximale du système existant.

Communication et utilisation Premièrement, l'utilisation de cette information, associée à sa communication, peuvent être améliorées. En effet, la plateforme est surtout adaptée à une vision globale pour l'autorité en charge de la régulation des débits. Le potentiel d'utilisation de cette information par l'agriculteur et le particulier est probablement sous-exploité. Par exemple, cette information, couplée à certaines mesures locales disponibles en temps-réel, permettrait d'augmenter significativement le niveau de confiance de l'utilisateur et donc d'influencer favorablement sa prise de décision.

Scénarios de régulation évalués en temps-réel Deuxièmement, le modèle propose une évaluation de la situation future basée sur des règles strictes comme l'interdiction de diminuer le débit résiduel. Pour l'autorité compétente, l'exploitation des capacités du modèle en testant des scénarios de régulation régionale des débits ou de limitation des prélèvements au lieu d'interdictions permettrait de limiter les effets négatifs de ces décisions pour les agriculteurs et de réduire l'impact économique des restrictions. Dans ce cadre, la possibilité de tester des scénarios au travers de l'interface web constitue une piste prometteuse, déjà développée pour la protection contre les crues et la régulation des barrages.

Rapprochement de nouvelles sources de Troisièmement, les développements scientifiques devraient se pencher sur l'intégration des informations existantes, à l'échelle d'une exploitation agricole. En effet, le modèle étant une base théorique, il est souhaitable de le rapprocher de la pratique et des indicateurs effectivement utilisés par les agriculteurs et non les chercheurs. Pour cela, les

données (sondes, drones) informations issues du monitoring des exploitations agricoles pourraient être mieux assimilées par le modèle. Par exemple, il serait imaginable de disposer d'informations issues de sondes de mesure, ou d'images (photographies, infrarouge, etc...) fournies par des drones. Il s'agit ici de perspectives à moyen et long terme mais certainement prometteuses dans le cadre d'une information plus exacte à l'échelle de la parcelle et plus de la commune. C'est en effet sur une base extrêmement locale que l'agriculteur fixe actuellement sa stratégie d'irrigation et, si le modèle pouvait s'en approcher, ce dernier pourrait se voir exploiter de manière beaucoup plus directe et quantitative. L'objectif d'une amélioration de l'efficacité de production par l'individu se rapprocherait fortement.

## 8 Projektbilanz

Wieso ist das Pilotprojekt ein Erfolg?

- Das angestrebte Endprodukt [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) steht und ist operationell. Wetter- und Anbaudaten sowie Daten zu Wasserbedarf und -dargebot sind in Echtzeit und als 10-Tagesprognose auf einer Internet-Plattform verfügbar.
- Die Wasserbedarfsberechnungen konnten, basierend auf jährlichen Wasserbezügen, punktuell qualitativ validiert werden.
- Das Projekt stellt eine erfolgreiche interkantonale, interdisziplinäre und interlinguale Zusammenarbeit dar.
- Es konnten neue Erfahrungen bei der Kopplung verschiedener Modelle und im Umgang mit potentiellen Anwendern gesammelt werden. Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Tools wurden aufgezeigt, und konkrete Ideen für eine künftige Weiterentwicklung sind entstanden.

Was ist heute mit dem Tool möglich? Wer und wie kann das Tool heute gebraucht werden? Welche Möglichkeiten ergeben sich aus dem Tool?

- Auf [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) werden für die wichtigsten Fließgewässer in der betrachteten Region der vorhandene Abfluss und der Gesamtbedarf für die Bewässerung (Vergangenheit + 10-Tagesprognose) täglich aktualisiert. Die Auswertung dieser zwei Resultate erlaubt es, momentane und absehbare Defizitgebiete zu erkennen.
- Der berechnete Bewässerungsbedarf der Kulturen stellt ein potentielles Maximum dar. Da keine detaillierten Daten zu den tatsächlich bewässerten Flächen vorhanden sind, wird die Gesamtfläche der als bewässerungswürdigen Kulturen verwendet. In diesem Pilotprojekt wurde die ganze Mechanik für die Berechnung und Visualisierung in Echtzeit erstellt.
- Die Auflösung der Daten (Flächenverteilung auf Gemeindeebene) und die Defizitanalyse auf der Ebene einer verfügbaren Ressource bedingt, dass die momentane Version des Tools vor allem für die Bewirtschaftung der natürlichen Fließgewässer durch die zuständigen Behörden von Nutzen ist. Es könnte bei der Entscheidung über Entnahmebeschränkungen eine quantitative Grundlage bilden.
- Das vorhandene Tool kann in Zukunft weiterentwickelt werden, indem angenommene Werte durch gemessene Daten ersetzt werden. So wäre es möglich, anstelle des maximalen Potentials den Bewässerungsbedarf wirklichkeitsnäher zu bestimmen. Die Restwassermengen können durch die Behörden festgelegt werden, so dass eine Warnung beim Erreichen dieser Werte automatisch ausgelöst wird.
- Auswertungen haben gezeigt, dass die Berechnungsmethode den Jahresbewässerungsbedarf auf Gemeindeebene sehr gut annähert und in der Lage ist, die wetterbedingten Jahresunterschiede zu simulieren. Demzufolge kann das Modell eine wertvolle Grundlage für die Planung und

Dimensionierung von neuen Bewässerungsinfrastrukturen bilden. Mit Langzeitsimulationen von historischen Klimabedingungen sowie zukünftigen Klimaszenarien können Veränderungen im Risiko von Wasserknappheit berechnet werden.

- Hinter dem Bewässerungsbedarf stecken viele Daten wie u.a. die Flächenanteile landwirtschaftlicher Kulturen pro Gemeinde, die Verteilung der Bodeneigenschaften, das Entwicklungsstadium einer Kultur (ab Aussaatdatum), die Bewässerungsmethode, etc. Ein Grossteil dieser Daten fehlt zur Zeit oder müsste jährlich angepasst werden. Deshalb müssen im Moment noch plausible Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden. So wurden z.B. die Kulturen gemäss der Agrarstatistik 2013 bestimmt, ein typisches Aussaatdatum und der Entwicklungszyklus pro Kultur festgelegt und die Annahme getroffen, dass der Bewässerungsbedarf immer gedeckt wird. Regional macht dies Sinn und gibt einen guten Überblick, lokal können die Resultate jedoch erheblich von der tatsächlichen Situation abweichen. Das Tool ist deshalb in der heutigen Form nur bedingt für die Steuerung der Bewässerung durch den einzelnen Landwirt nutzbar. Die Plattform liefert jedoch bereits jetzt wichtige Informationen z.B. zu den prognostizierten Niederschlägen und Temperaturen, sowie Angaben zum klimabedingten Bedarf einer Kultur, welche als Entscheidungsgrundlage auch für den einzelnen Landwirt nützlich sein können.

Wie wird das Tool durch die Nutzer eingeschätzt?

- Die Einschätzung des Tools durch die Nutzer wurde in zwei separat durchgeführten Workshops ermittelt. Die Workshops fanden am 12. und 19. Februar 2016 im Inforama in Ins statt. Insgesamt haben 15 Personen aus Verwaltung, Bildung/Forschung und Praxis teilgenommen.
- Die Benutzerfreundlichkeit, Verständlichkeit und Nützlichkeit der Plattform [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) wurde aus Sicht der Behörden, Planung und Forschung als gut eingeschätzt. Aus Sicht der Praxis ist die Plattform im heutigen Zustand noch nicht nutzbar.
- Die gleichzeitige Darstellung von Wetter, Abfluss und Bewässerungsbedarf, sowie die räumliche Auswertung der Defizite (Ampelfarbenkarten) werden als nützliche und interessante Information eingestuft.
- Das Potential der Berechnungsmethode für die Planung regionaler Bewässerungsprojekte und zur Bestimmung von ‚Hotspots‘ für Wasserknappheit wurde anerkannt.
- Die heute verfügbaren Resultate werden vor allem für die Vollzugsbehörden als wertvoll eingestuft. Für die Produzenten ist die Berechnungsebene zu wenig detailliert und die Interpretation der Resultate zu aufwändig und unsicher.
- Der Schritt in die Praxis mit einer parzellenscharfen Modellierung wurde einheitlich als nächster wichtiger Arbeitsschritt, der für die Praxis einen grossen Mehrwert ergeben würde, genannt. Der Einbezug von Daten eines Messnetzes mit Bodenfeuchtesonden in Referenzparzellen wurde von mehreren Teilnehmern gewünscht und würde die Genauigkeit der Modellierung erhöhen.

Welche Schlüsse können aus dem Pilotprojekt gezogen werden?

- [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) zeigt die heutigen Möglichkeiten eines praxisnahen Simulationsmodells und gibt einen Überblick über die Daten und Resultate, welche in Echtzeit verfügbar sind. Um den Nutzen und Gebrauch im Alltag einer Vollzugsbehörde zu bewerten, müssten die internen Entscheidungsprozesse genauer analysiert werden. Das Modell ist ein Grundgerüst, welches an regionale Bedürfnisse angepasst werden kann.
- Die Nützlichkeit und Interpretation der Resultate ist je nach Teilgebiet unterschiedlich. Im Grossen Moos, wo die ganze Wasserverfügbarkeit über das Binnenkanalsystem und das Grundwasser reguliert wird, ist die Anwendung anders als in der Broye-Ebene, wo hauptsächlich natürliche Fließgewässer die Wasserverfügbarkeit bestimmen.
- Die Berechnungen der potentiell benötigten Bewässerungsmenge für die Broye-Ebene zeigen, dass die Wasserverfügbarkeit oft nicht genügt, um den Bedarf aller bewässerungswürdigen Kulturen zu decken. Um die Bewässerung langfristig zu sichern, müsste ein Ausbau und Ausweichen auf zusätzliche Wasserressourcen geprüft werden. Die Auswertung der vom Tool berechneten Daten liefert dazu erste Resultate zur räumlichen Verteilung des Bedarfs und des Risikos von Defiziten. In der Zwischenzeit kann das Tool vor allem als quantitative Unterstützung bei der Einschätzung der Situation während Trockenperioden gebraucht werden. Bei limitierter Wasserverfügbarkeit können z.B. verschiedene Regulierszenarien getestet werden, wie z.B. die Wirkung temporärer Beschränkungen der Bewässerung auf sensible Kulturen oder Reduzierung der bewässerten Flächen, um Schäden während einer Trockenperiode möglichst gering zu halten. Die Entscheidungsprozesse bei Entnahmestopps könnten verbessert werden, indem im Voraus verschiedene Szenarien simuliert und berechnet werden.
- Die Bewässerungsberechnungen im Grossen Moos zeigen, dass der Bedarf theoretisch problemlos durch die grossen Zuflüsse wie Aare, Saane, den Verbindungskanälen Broye/Zihl, sowie den Grundwasservorkommen gedeckt werden kann. Es besteht jedoch ein komplexes Zusammenspiel zwischen Speisung und Regulierung der Binnenkanäle und dem Grundwasserstand. Heute fehlen die Grundlagen, um die Situation präzise einzuschätzen. Es gibt keine Messungen zu den abgeleiteten Wassermengen und den Wasserständen in den Binnenkanälen. Die Speisung des Hauptkanals und des Grand Canals scheinen jedoch völlig unterdimensioniert, so dass trotz der grossen Wassermenge im Gesamtgebiet lokal Versorgungsengpässe auftreten können.
- Eine parzellenscharfe Modellierung der ganzen Region ist daten- und berechnungstechnisch wenig sinnvoll und, wie die regionalen Resultate zeigen, auch nicht nötig. Hingegen sollte eine nutzerfreundliche, interaktive Anwendung der Berechnungsmethoden auf Parzellenebene geprüft werden. In diesem Fall könnte der Produzent die Kultur-, Boden- und Bewässerungsdaten selber im System einfügen und eine lokale Bewässerungsempfehlung erhalten.

Welche Folgeprojekte sind auf Grund der Erfahrungen des Pilotprojekts sinnvoll?

- Abonnement [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch): Das entwickelte Tool sollte mindesten während den nächsten 3-Jahren operationell geschaltet bleiben. Dadurch ist garantiert, dass die Datengrundlage aufrecht erhalten bleibt, und dass neue Daten und

neues Wissen direkt integriert werden können. Das Tool ist das Grundgerüst für Folgeprojekte, in denen spezifische Anwendungen oder Problemlösungen vertieft und weiterentwickelt werden können.

- Integrales Wassermanagement (IWM): Die Entscheidungen rund um den Gebrauch von Wasser ist ein Zusammenspiel vieler Akteure mit unterschiedlichen Prioritäten und Verpflichtungen. Hilfsmittel wie [isb.swissrivers.ch](http://isb.swissrivers.ch) könnten objektive Elemente für die Entscheidungsfindung bringen. Die Einbindung des Tools in den Entscheidungspfad müsste abgeklärt werden.
- Pilotage-Irrigation: Die Effizienzsteigerung der Bewässerung beginnt bei der Bewässerung jeder einzelnen Parzelle. Heute werden vermehrt Bodenfeuchtesonden eingesetzt, um quantitative Daten für die Wasserreserven im Boden und damit für den Bewässerungsbedarf zu haben. Es besteht aber noch wenig Erfahrung der landwirtschaftlichen Praxis im Umgang und bei der Interpretation dieser Messungen. Es wurde ein starkes Interesse von den Projektpartner ausgesprochen, die Modellierung auch auf der Ebene der Parzelle zu testen. Eine Kombination Modell – Messung ermöglicht es, neues Wissen zu generieren und die Modellierung zu verbessern. Mit einem guten Modell kann der einzelne Produzent mit wenig Aufwand und geringen Kosten wertvolle Angaben zur effizienten Bewässerung erhalten und damit einen Beitrag an die Schonung der natürlichen Gewässer zu leisten. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, das Potential des Modells für die parzellenscharfe Berechnung zu testen und weitere Entwicklungen in diese Richtung vorzunehmen.
- Im Projektperimeter liegt das Grosse Moos mit einer Gesamtfläche von 7'700 ha. Noch etwa 20 % der Flächen sind tief-torfig. Auf einem grossen Teil der restlichen Flächen besteht die oberste Bodenschicht immer noch aus einem grossen Anteil organischer Substanz. Auf alle diesen Flächen findet eine Bodensackung von 1-2 cm pro Jahr statt, unter gleichzeitiger Freisetzung von CO<sub>2</sub>. Es müsste nun dringend untersucht werden, wie sich die Bewässerungs- und Wasserregulierungspraxis auf diese Vorgänge auswirken. Zunehmend wird das Wasser für die Bewässerung aus dem Grundwasser bezogen, was lokal den Grundwasserpegel periodisch signifikant absenken kann, was die tiefe Durchlüftung des Bodens (Sauerstoffzufuhr) mit verstärkter CO<sub>2</sub>-Freisetzung nach sich zieht.
- Im Jahr 2016 beginnt eine Bodenkartierung ‚Grosses Moos‘ (Gesamtdauer: 5 Jahre).  
Basierend auf den generierten Daten und Erkenntnissen soll ein Konzept für die zukünftige Nutzung dieses Agrarraumes entstehen. Für die Erstellung dieses Konzeptes werden die Ergebnisse des vorliegenden Projektes von grossem Nutzen sein.

## Equipe de projet

Murielle Thomet	e-dric.ch eau énergie environnement ingénieurs conseils Sarl, Ch. du Rionzi 54, 1052 Le Mont-sur-Lausanne murielle.thomet@e-dric.ch
Frédéric Jordan	e-dric.ch eau énergie environnement ingénieurs conseils Sarl, Ch. du Rionzi 54, 1052 Le Mont-sur-Lausanne fred.jordan@e-dric.ch
Pascalie Smith	Agroscope, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich pascalie.smith@laposte.net
Jürg Fuhrer	Agroscope, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich juerg.fuhrer@agroscope.admin.ch
Peter Thomet	Pro Agricultura Seeland, Geschäftsstelle Herrenhalde 80, 3232 Ins info@proagricultura.ch

## Références

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and Drainage Paper 56; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy
- AWA Amt für Wasser und Abfall des Kantons Berns (2010), "Hochwasserschutz im Grossen Moos", Etude, Lüscher & Aeschlimann AG, Ins
- AWA Amt für Wasser und Abfall des Kantons Berns (2014), Hydrometrische Daten des Kantons Bern, Abfluss- und Niederschlagsmessungen 1980-2014, Bern
- Béguin J. (2007), "Irrigation dans la Broye fribourgeoise : trois exploitants agricoles se jettent à l'eau", Article, Géomatique Suisse 7/2007
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2014), Hydrometrische Daten, Abfluss- und Pegelmessungen 1974-2014, Bern
- Calanca P., Smith P., Holzkämper A., Ammann C. (2011), Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. Agrarforschung Schweiz 2(4), 176-183
- DGE-Eaux (2008), Données hydrométriques, mesures de débit 1993-2008, Lausanne
- Lüscher & Aeschlimann AG (2014), "Bewässerungsanlagen im Grossen Moos Kanton Bern", Plan 1:10'000, Ins
- e-dric.ch (2010b). "Système RS 3.0 – Description générale du système et mode d'emploi", documentation de référence clients, Lausanne
- Etat de Vaud SESA & Etat de Fribourg SLCE, "Diagnostic de la plaine de la Broye – Secteur Moudon – Lac de Morat", Rapport final, Vaud et Fribourg
- Fuhrer J. (2010). "Estimation des besoins en irrigation pour l'agriculture suisse", Rapport final, Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon
- Jordan, F. (2007). "Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue", thèse de doctorat n°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Jordan, F., García Hernández, J., Dubois, J. & Boillat, J.-L. (2008). "MINERVE: Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets". In A. Schleiss (ed.), Communication 38 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. Lausanne : EPFL
- MandaTerre (2011), "Evaluation des besoins en eau d'irrigation dans la Broye", Rapport final, Yverdon
- Rawls W. J., Brakensiek D. L., Saxton K. E. (1982). "Estimation of Soil Water Properties", TRANSACTIONS of the ASAE, Vol. 25, No. 5 pp. 1316-1320 & 1328 Service de l'agriculture du Canton de Fribourg
- SAGRI FR (2014), "Périmètre d'irrigation", SIG, Fribourg
- Schaepli, B., Hingray, B., Niggly, M. & Musy, A. (2005). "A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments", Hydrol. Earth Syst. Sc. Disc., 2, 73-117.
- Smith P.C., Calanca P., Fuhrer, J. (2012): A simple scheme for modeling irrigation water requirements at the regional scale applied to an alpine river catchment: Water, 4, 869-886.
- Smith, P.C., Heinrich, G., Suklitsch, M., Gobiet, A., Stoffel, M., Fuhrer, J. (2014), Irrigation water requirements in the Swiss Rhone catchment under climate change – Station-scale bias correction and uncertainty

analysis. Climatic Change 127, 521-534. Stauffacher + Partner AG (2014), "Bewässerungsanlagen im Grossen Moos Kanton Freiburg", Plan 1:10'000, Murten

WWA Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern (2004a), "Hydrologie Seeland Stand 2004", Geotechnisches Institut AG, Bern

WWA Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern (2004b), "Wasserentnahmen aus Oberflächengewässer – Sicherung der Mindestwassermengen", Bericht, Bern