

# Pronostics en ligne en cas de pénurie d'eau

Jürg Fuhrer<sup>1</sup>, Murielle Thomet<sup>2</sup>, Pascalle Smith<sup>1</sup>, Frédéric Jordan<sup>2</sup> et Peter Thomet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique IDU, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup>e-dric, 1052 Le Mont-sur-Lausanne, Suisse

<sup>3</sup>Pro Agricultura Seeland, 3232 Ins, Suisse

Renseignements: Jürg Fuhrer, e-mail: juerg.fuhrer@agroscope.admin.ch



Le calcul des besoins en irrigation et des ressources en eau dans la région des trois lacs (Broye/Seeland) permet de prévoir les pénuries d'eau jusqu'à dix jours à l'avance. (Photo: Gabriela Brändle, Agroscope)

## Introduction

Dans un contexte de changement climatique, la quantité d'eau disponible pour l'agriculture varie; les débits baissent en été dans les bassins versants des Préalpes (OFEV 2012a) et, par conséquent, les prélèvements dans les eaux naturelles pour les besoins en irrigation doivent être limités (Fuhrer *et al.* 2014). Déjà aujourd'hui, les prélèvements d'eau sont interdits dans certaines régions pendant les périodes de sécheresse pour respecter l'écologie des écosystèmes aquatiques, comme ce fut le cas en 2015. La région agricole de la Broye/Seeland est souvent touchée par des restrictions de prélèvement décidées par les autorités. Or, les besoins en eau pour l'irrigation aug-

mentent en été en raison des taux plus élevés d'évaporation et du recul des précipitations (Fuhrer et Calanca 2014). Pour garantir les rendements, il faut dès lors adapter l'utilisation des quantités d'eau disponible aux nouvelles conditions. Pour y parvenir, il est nécessaire de disposer (a) d'informations sur l'état momentané des ressources et des besoins ainsi que sur les pénuries d'eau à venir sous forme de prévisions à court terme et (b) d'une analyse spatiale des déficits pour la planification des prélèvements d'eau à long terme. Pour satisfaire ces deux besoins, un système en ligne a été conçu pour la région de la Broye/Seeland pour soutenir l'administration et la pratique dans la gestion des ressources publiques en eau.

## Matériel et méthodes

### Région d'étude

La région étudiée se situe entre les lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bière. Dans le cas du bassin versant de la Broye, seule la vallée a été prise en compte, là où l'irrigation se fait surtout à partir de l'eau des lacs et des rivières (Broye, Petite Glâne, Lembe, Arbogne, Chandon et Biber). La surface totale de la région d'étude est d'environ 480 km<sup>2</sup> et comprend 66 communes. Sur l'ensemble, on compte 309 km<sup>2</sup> de terres agricoles, dont 89 km<sup>2</sup> avec irrigation. Les hypothèses prennent en compte l'irrigation pour un maximum de 100 % de surface de pommes de terre, de légumes et de tabac, alors que ce pourcentage est réduit à 10 % pour les betteraves sucrières. Le maïs n'étant généralement pas irrigué, il n'est pas pris en compte dans le calcul de la demande en irrigation. Les surfaces indiquées pour les cultures à l'échelle des communes proviennent de la base de données AGIS de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) pour l'année 2013.

### Concept de modélisation

Le concept de modélisation repose sur l'intégration d'un modèle de calcul des besoins en eau dans un modèle de simulation de la quantité d'eau disponible dans les rivières et les lacs. Le nouveau modèle combiné permet ainsi de calculer l'évolution dans le temps des besoins en eau et de la quantité d'eau disponible pour une zone d'irrigation définie, compte tenu de l'état de développement des cultures et des propriétés du sol (fig. 1). Ces dernières proviennent de la carte d'aptitude des sols de la Suisse au 1 : 200 000 (BEK200). La quantité d'eau disponible tient compte de la quantité prélevée pour l'irrigation tout en respectant un débit résiduel minimal (Q347) défini par la loi.

Les calculs avec le modèle combiné sont basés sur des données météorologiques. Les données de précipitations, de rayonnement et de température relatives au passé proviennent des stations du réseau de mesures automatiques de MétéoSuisse (SwissMetNet). Les données de mesures sont interpolées avec la méthode de distance inverse pour chaque altitude dans le modèle des ressources ainsi que pour chaque commune dans le modèle des besoins. Pour établir les pronostics sur dix jours, les chercheurs s'appuient sur le modèle de prévision météorologique européen *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), les données des points de grille les plus proches étant interpolées selon la même méthode.

### Résumé

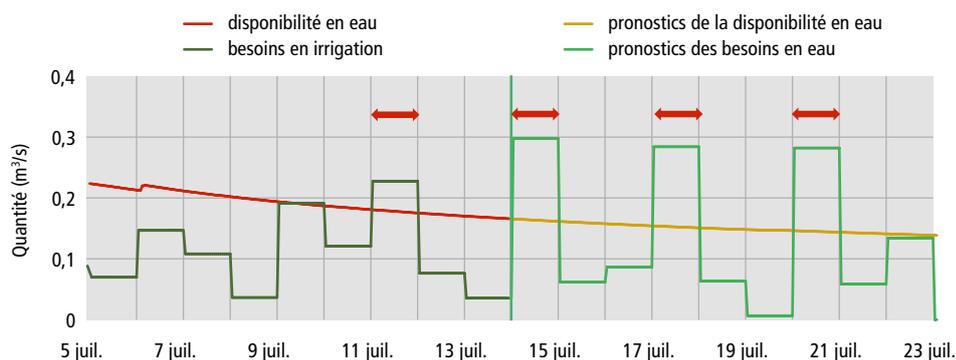
En raison du changement climatique, le risque de pénurie d'eau augmente dans les régions d'agriculture intensive. Un modèle de simulation a été conçu pour la région des trois lacs (Broye/Seeland) afin de prévoir les situations critiques et de planifier l'utilisation de l'eau à long terme en tenant compte des changements climatiques. Ce modèle permet de calculer, avec une haute résolution spatiale et temporelle, la quantité d'eau disponible dans les eaux naturelles et le besoin en eau des cultures, ainsi que de les comparer. Le modèle tient compte de la météorologie, des propriétés des sols et des cultures irriguées. La situation hydrique du moment, tout comme son évolution sur les dix jours à venir, sont publiées sur une plateforme internet, sur laquelle les données des périodes précédentes sont également archivées. Les analyses des quinze dernières années montrent que lors d'années de sécheresse telles que 2015, le besoin en irrigation dépasse les ressources en eau, localement, pendant plus de 60 % du temps. Ces informations, disponibles en ligne, sont ainsi très utiles pour prendre des mesures à court et à long terme.

### Plateforme internet

Sur la nouvelle plateforme internet (<http://isb.swissrivers.ch>), les utilisateurs-trices peuvent consulter l'évolution des besoins pour chaque combinaison de culture et de type de sol, les ressources disponibles et l'indice d'utilisation pour chaque zone d'irrigation pendant les derniers jours, tout comme les pronostics pour les dix jours suivants. Ces informations peuvent servir à réguler les prélèvements d'eau à court terme. Les données des périodes antérieures sont également disponibles et peuvent servir à établir des statistiques. Par conséquent, il est possible de réaliser des analyses de déficit pour chaque zone d'irrigation en particulier, de même que pour la région étudiée en général.

### Calcul des ressources

Le modèle utilisé pour la simulation hydrologique et hydraulique est fondé sur le logiciel *Routing System* (RS), initialement conçu à l'EPF de Lausanne, puis développé par e-dric.ch. Les détails de paramétrage sont documentés dans le manuel d'utilisation *RS 3.0* (e-dric.ch 2010). Le



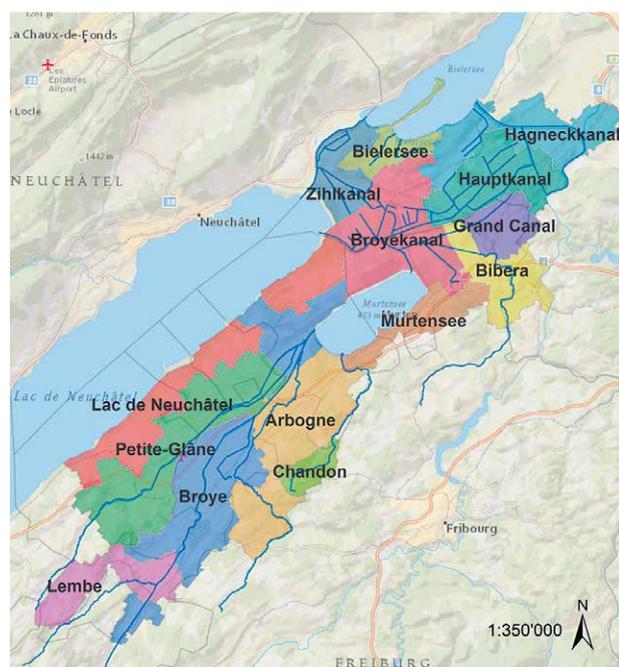
**Figure 1** | Illustration du principe de calcul du modèle, pour la période du 5 au 23 juillet 2015. Les jours de pénurie d'eau (c.-à-d. besoins > disponibilité) sont marqués par des flèches horizontales. Le 13 juillet, le canton de Fribourg a prononcé une interdiction de prélèvement des eaux de surface.

logiciel RS prend en compte les principaux processus hydrologiques dans les bassins versants alpins et pré-alpins et permet de calculer les principaux apports et prélèvements d'eau des sous-bassins, le débit des sections de cours d'eau ainsi que le niveau des lacs.

Compte tenu des principales caractéristiques du terrain, comme les lacs, la trajectoire des cours d'eau, la géomorphologie, l'orographie et les dispositifs pour l'exploitation de l'eau, la région modélisée a été répartie, sur le plan topographique, en quatorze zones d'irrigation de 1 à 10 km<sup>2</sup> (fig. 2). Chacune de ces zones se caractérise par des apports et des prélèvements en eau ainsi que par la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation.

Chaque zone a été subdivisée en bandes d'altitude de 300 m, afin de prendre en compte les variations de température (Jordan *et al.* 2008). Pour chaque bande d'altitude, les processus hydrologiques sont calculés sur les principes du modèle GSM-SOCONT (Schäfli *et al.* 2005; Jordan 2007). Finalement, les sous-bassins versants sont reliés aux cours d'eau en fonction de l'hydrographie.

Le calcul de la quantité d'eau disponible tient compte du fait que la région étudiée fait partie d'une zone hydrologique beaucoup plus vaste. L'hydrologie de l'ensemble du bassin versant de la région des trois lacs a donc été simulée en tenant compte de tous les affluents de l'Aar, de la Broye, de l'Orbe et de la Suze.



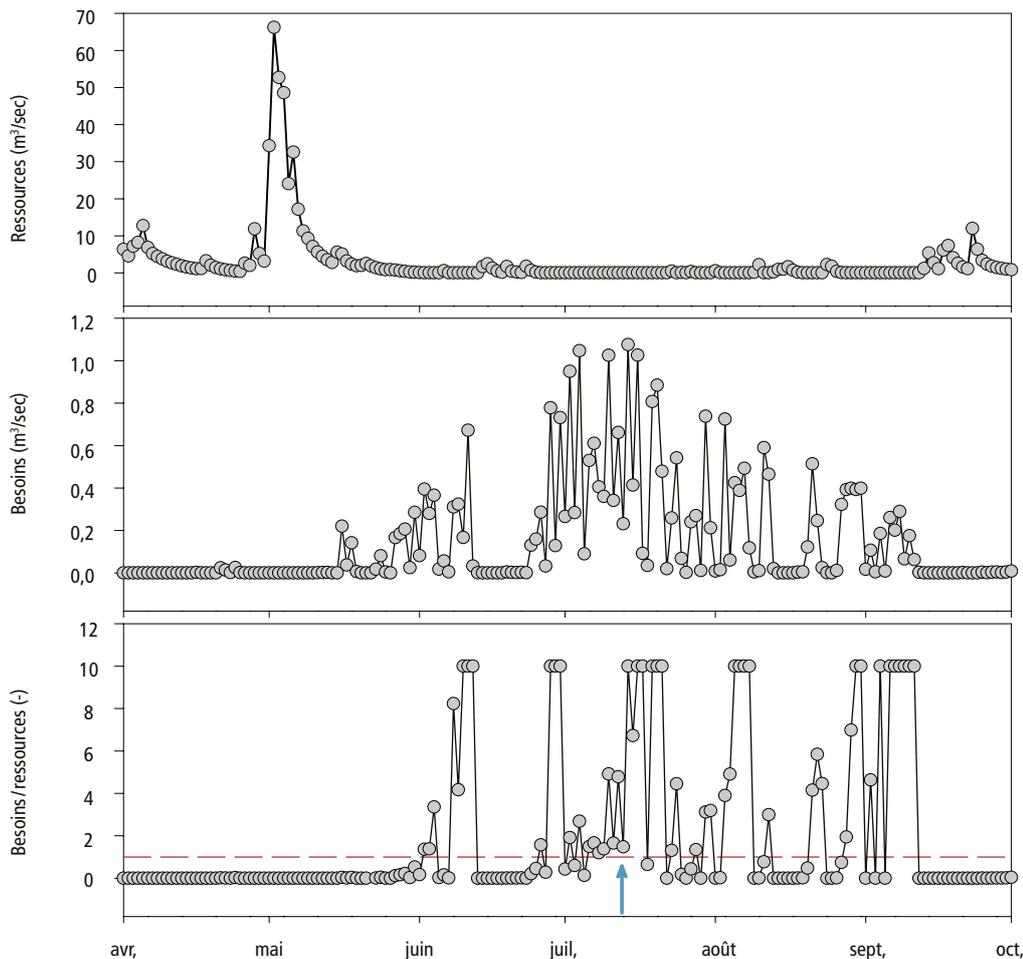
**Figure 2** | Situation des zones d'irrigation dans la région de la Broye-Seeland.

### Calcul des besoins en irrigation

Le calcul de la quantité d'eau quotidienne requise pour couvrir la totalité des besoins en irrigation repose sur les travaux de Smith *et al.* (2012; 2014). Les modèles utilisés s'inspirent de la méthode de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture FAO (Allen *et al.* 1998), qui considèrent l'évapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>) et le bilan hydrique vertical (approche *Bucket*) dans une couche de sol homogène. L'évapotranspiration actuelle (ET<sub>a</sub>) est calculée d'après l'ET<sub>o</sub> (selon Turc), en prenant en compte les besoins spécifiques de la culture par le coefficient cultural (K<sub>c</sub>) et la quantité variable d'eau disponible dans le sol par le coefficient de sécheresse (K<sub>s</sub>).

$$ET_a = K_s \times K_c \times ET_o$$

Le K<sub>c</sub> permet de tenir compte du stade de développement spécifique d'une culture. La durée et l'amplitude des différentes phases de l'évolution des plantes sont également prises en considération, c'est-à-dire les données relatives au semis et à la récolte (ou à la fin de l'irrigation) ainsi que les écarts de croissance spécifiques aux phases par rapport à une culture dite de référence. K<sub>c</sub> a des valeurs comprises entre 0 et >1, par exemple 1,2 pour



**Figure 3** | Evolution des moyennes journalières simulées pour les ressources en eau disponibles et les besoins en irrigation, avec le rapport besoins/ressources (valeurs limitées à 10 pour des ressources de 0 m<sup>3</sup>/sec) pendant la période d'avril à octobre 2015 dans la zone d'irrigation de la Broye. Les valeurs critiques se situent au-dessous de la ligne en traitillé. La flèche marque la date de l'interdiction de prélèvement par le canton de Fribourg.

les betteraves sucrières pendant la phase la plus importante de développement.

Des périodes typiques de semis et de récolte sont fixées pour chaque culture et les principaux paramètres, comme la profondeur d'enracinement et la tolérance au déficit en eau du sol, sont tirés de sources bibliographiques. Le déficit en eau dépend de la capacité au champ utile et du bilan hydrique quotidien. Si  $ET_a$  descend en dessous de 80% de son niveau potentiel ( $ET_p$ ), c'est-à-dire  $K_s = 0,8$ , on calcule alors la quantité d'eau minimale nécessaire en plus des précipitations pour rétablir le niveau potentiel.

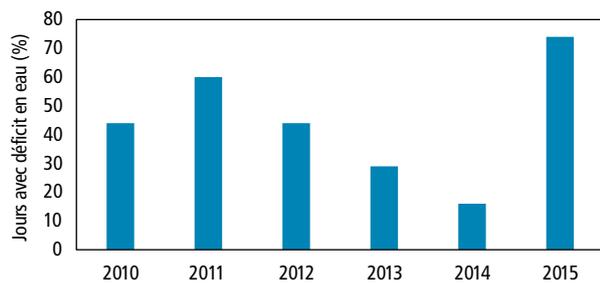
$$ET_a = K_s \times ET_p K_s$$

reflète l'effet de l'évolution du déficit en eau du sol dans la région racinaire en fonction de la quantité de précipitations, du bilan des autres flux d'eau ainsi que de la tolérance de la culture à la sécheresse.  $K_s$  est compris entre 0 (inhibition totale de l'ET) et 1 (aucune limite de

l'ET). Le calcul de  $K_s$  doit prendre en compte la capacité de rétention d'eau caractéristique d'un sol et la profondeur d'enracinement spécifique. Pour chaque combinaison de culture et de type de sol, le calcul du volume de sol à partir duquel la culture peut tirer l'eau dont elle a besoin s'appuie sur la valeur limitante de la profondeur d'enracinement ( $Z_r$ ) et de la profondeur du sol ( $Z_{max}$ ) ( $Z = \min [Z_r, Z_{max}]$ ). Le potentiel de rétention d'eau par volume de sol dépend de la texture de ce dernier et correspond à la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement permanent (PFP). Des valeurs typiques de certains types de sol proviennent des ouvrages de référence. La capacité au champ utile (CCu) est finalement adaptée à la profondeur d'enracinement effective  $Z$ .

$$CCu = Z \times (CC - PFP) \text{ [mm]}$$

Le calcul de la quantité d'irrigation potentielle part de l'hypothèse que l'efficacité de l'irrigation est de 70%.



**Figure 4** | Pourcentage des jours affichant un déficit d'irrigation dans la région de la Broye. Les données représentent la moyenne pondérée par rapport à la surface des zones Arbogne, Chandon, Petite Glâne, Broye et Lembe.

## Résultats

### Analyse de déficit

Mettre en relation les besoins momentanés en eau dans des zones d'irrigation données avec les ressources disponibles permet de déterminer le risque de pénurie d'eau sous forme d'une analyse de déficit. L'évolution dans le temps des moyennes journalières des besoins et des ressources dans la zone de la Broye (fig. 2) a montré en 2015 que, sous respect des débits résiduels, le rapport entre besoins et ressources dépassait la valeur critique de 1,0 pendant 110 jours (fig. 3).

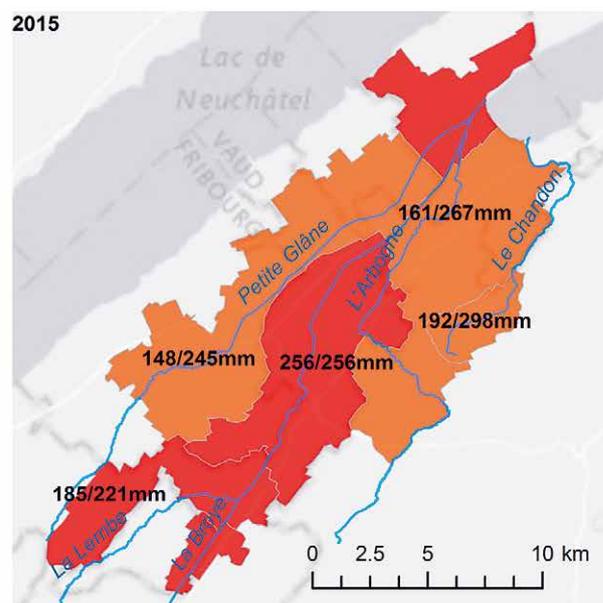
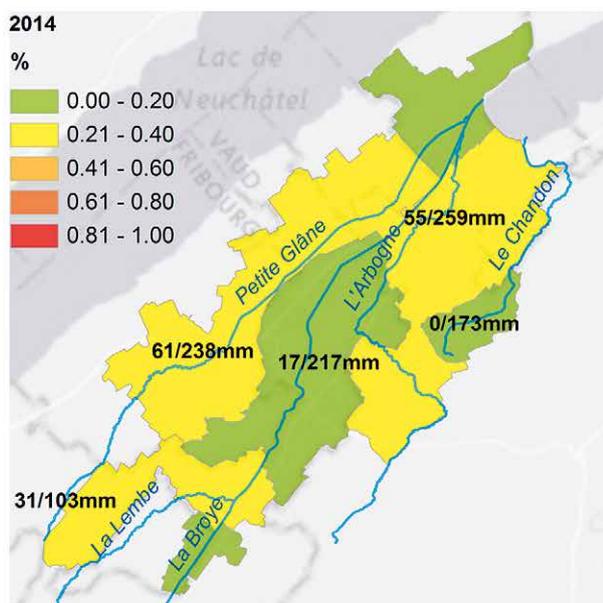
Dans l'ensemble de la région de la Broye, cette situation se manifestait même durant 70 % des jours avec besoins en irrigation. Pour 2011, année marquée par une période de sécheresse au printemps, cela concernait 60 % des jours avec besoin en irrigation. Au contraire, les

années plutôt humides comme 2014, la part de jours critiques est nettement plus faible, comme on pouvait s'y attendre (fig. 4).

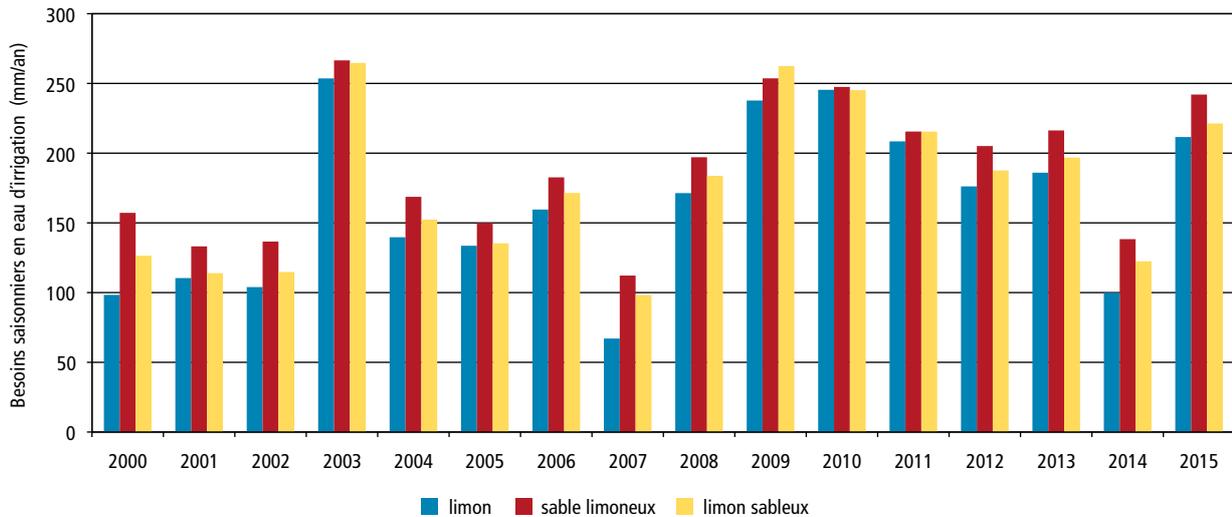
Dans la région considérée, le risque de pénurie d'eau n'était pas le même dans les différentes zones d'irrigation, comme le montre la figure 5, sur la base du déficit d'irrigation saisonnier, pour les années 2014 (humide) et 2015 (sèche) pour l'ensemble de la région de la Broye. En 2015, année sèche, la plaine de la Broye a été particulièrement touchée (zones de la Lembe et de la Broye) puisque l'apport des cours d'eau ne suffisait plus à couvrir les besoins de l'agriculture. En 2014, les valeurs saisonnières de déficit de toutes les zones d'irrigation de la région étaient nettement plus basses, car le niveau d'eau des rivières était suffisamment haut durant cet été humide.

### Besoins en irrigation

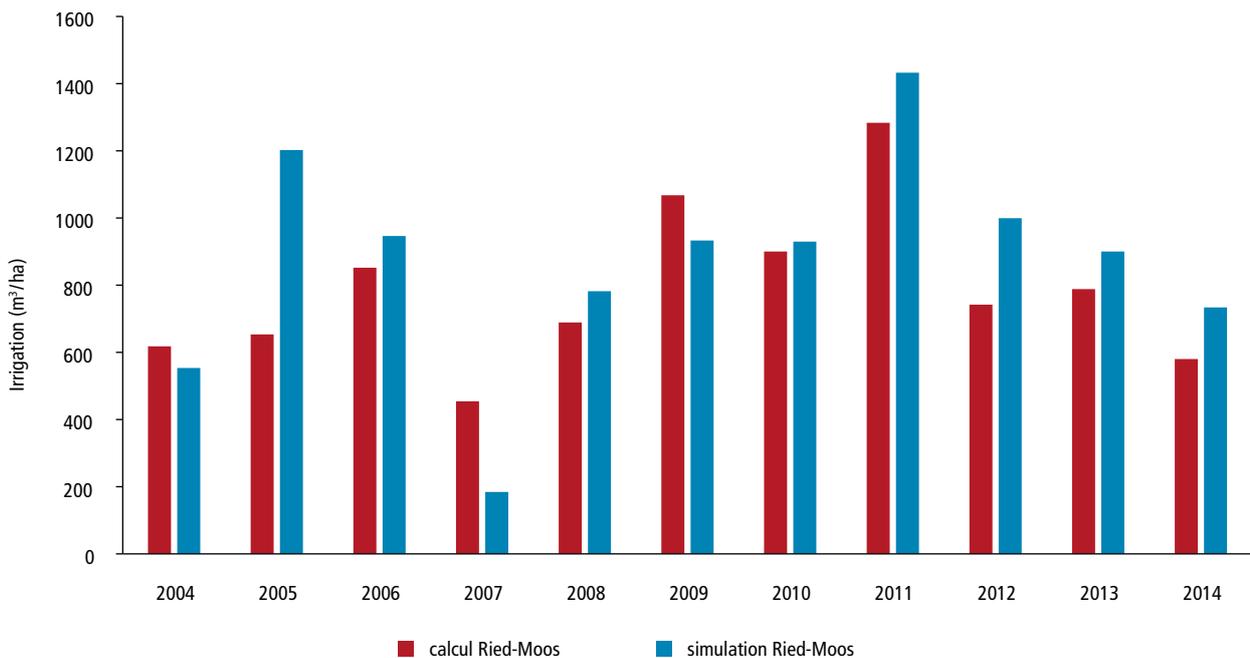
Les besoins saisonniers calculés en eau d'irrigation varient selon le type de sol et les conditions météorologiques, ce qu'illustre la figure 6 pour les seize dernières années: les besoins en eau d'irrigation en mm (= l/m<sup>2</sup>), pondérés par toutes les cultures, sont répartis selon les trois types de sol les plus fréquents. Les sommes annuelles oscillaient entre env. 100 mm (2007) et >300 mm (2003) à raison d'une efficacité de l'irrigation de 70%. Les valeurs les plus élevées ont été calculées pour les années 2003, 2009 et 2015. Les différences entre les types de sol s'expliquent par les propriétés physiques des sols et par les périodes de sécheresse intervenues à des moments différents, les cultures concernées n'ayant de ce fait pas le même poids dans la pondération.



**Figure 5** | Déficit d'irrigation saisonnier en pourcentage (100 % = 1) des besoins d'irrigation dans cinq zones de la région de la Broye pour les années 2014 (humide) et 2015 (sèche).



**Figure 6** | Besoins saisonniers moyens en eau d'irrigation (mm) pour toutes les cultures (pommes de terre 39 %, légumes 46 %, tabac 8 %, betteraves sucrières 7 %) répartis selon trois types de sol fréquents dans la région étudiée.



**Figure 7** | Comparaison des besoins en eau d'irrigation simulés et des quantités d'irrigation calculées de la communauté d'irrigation Ried-Moos pour une surface irriguée de 320 ha (avant 2010: 280 ha). La surface comprend 80 % de légumes et 20 % de pommes de terre.

La vérification des données pour les besoins en irrigation n'a été possible que partiellement, car il existait peu d'enregistrements de la consommation d'eau effective. La communauté d'irrigation de Ried-Moos a toutefois fait exception. Dans ce cas, les valeurs simulées des besoins en irrigation ont pu être comparées avec les quantités calculées. La comparaison de la figure 7 montre une bonne correspondance des valeurs, à l'exception des années 2005 et 2007, avec toutefois une tendance à une

surestimation par la simulation, qui serait atténuée par l'hypothèse d'une efficacité supérieure de l'irrigation.

## Discussion

En raison des changements climatiques, le rapport entre les ressources et les besoins en eau d'irrigation changent dans les principales régions de production. Compte tenu du recul des précipitations, il faut s'attendre à une nette

baisse des débits moyens estivaux des cours d'eau dans les principales régions du Plateau au cours de prochaines décennies, ainsi qu'à l'extension des débits d'étiage dans le temps (OFEV 2012a). Cela peut conduire à des pénuries croissantes pour l'utilisation des ressources en eau au niveau régional (Fuhrer et Calanca 2012). Ces influences risquent de créer des conflits entre les différents utilisateurs d'eau (Lanz *et al.* 2014). Pour empêcher cela, l'agriculture devra à l'avenir adapter son utilisation d'eau, afin d'une part d'augmenter la sécurité des rendements et, d'autre part, d'empêcher une exploitation disproportionnée des ressources naturelles disponibles.

Pour la planification à long terme de l'irrigation, il est essentiel de connaître l'amplitude des fluctuations des besoins en eau, tant dans le temps que dans l'espace. Ces connaissances permettent d'identifier les régions à haut risque de pénurie d'eau. Dans ces régions, deux solutions s'imposent: le développement de l'approvisionnement en eau ou la réduction des besoins. Cette dernière solution suppose théoriquement des aménagements à l'échelle de l'exploitation ou des changements du mode d'exploitation (Fuhrer *et al.* 2013). Le modèle conçu ici y contribue, car il permet de calculer, avec une haute définition spatiale et temporelle, tant les ressources disponibles que les besoins, en fonction des conditions climatiques sur plusieurs années.

L'application du modèle en combinaison avec les données climatiques mesurées, permet l'évaluation statistique de la pénurie d'eau dans les conditions actuelles. Les résultats présentés ici le confirment à partir d'une sélection d'exemples. Combiné avec des projections climatiques, le modèle pourrait également servir à estimer l'évolution du rapport entre les ressources et les besoins en fonction des changements dans les températures et les précipitations, comme cela a été fait pour certains bassins versants du Plateau à partir d'hypothèses simplifiées pour les cultures (Fuhrer et Calanca 2014). Il convient cependant d'insister sur la marge d'erreur des résultats. En ce qui concerne les besoins en eau, les incertitudes portent sur les informations imprécises au sujet des propriétés du sol et des cultures mises en place, de la profondeur des racines, de la date de semis ou du développement des cultures. Il est dès lors important de vérifier la plausibilité des résultats de la simulation. Les simulations des ressources en eau sont validées grâce aux mesures de hauteur d'eau (données non indiquées ici), tandis que celles des besoins peuvent difficilement être contrôlées par manque de mesures. Le peu de données disponibles jusqu'ici donne toutefois une impression favorable, dans la mesure où les quantités d'eau calculées sont en harmonie avec les prélèvements d'eau documentés ponctuellement. Les calculs tiennent

toutefois compte du principe que toutes les parcelles de pommes de terre, de cultures maraichères et de tabac sont irriguées, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. Les valeurs calculées représentent ainsi les besoins maximaux d'une région, sur lesquels la planification peut se baser.

## Conclusions

Le modèle développé contribue à aider l'agriculture régionale à s'adapter au changement climatique, à titre préventif. C'est un des objectifs de la stratégie nationale d'adaptation du secteur agricole au changement climatique: «L'irrigation tient compte de la disponibilité en eau et elle est réalisée de manière économique et efficiente» (BAFU 2012b). En plus d'aider à la planification à long terme, le modèle sert, par le biais de la plateforme internet, à prévoir l'utilisation de l'eau à court terme. Il permet d'identifier les pénuries d'eau de certaines zones dix jours à l'avance et donc de prendre des mesures préventives. Les réserves en eau encore disponibles peuvent être utilisées de manière plus efficace et plus ciblée en réduisant l'intensité de l'irrigation ou en la concentrant sur un plus petit nombre de surfaces particulièrement importantes. Le modèle ne peut cependant pas être utilisé directement pour gérer l'irrigation d'une parcelle donnée. ■

### Remerciements

Le projet a été réalisé dans le cadre du programme pilote «Adaptation au changement climatique» et financé par l'Office fédéral de l'agriculture OFAG et les cantons de Berne, Fribourg et Vaud.

## Riassunto

### Previsioni online sulla carenza idrica

Con il cambiamento climatico, nelle regioni in cui si pratica un'agricoltura intensiva cresce il rischio di carenza idrica. Per la Regione dei Tre Laghi (Broye/Seeland) è stato creato un modello, che funge da strumento utile a prevedere situazioni critiche e a pianificare a lungo termine l'utilizzo dell'acqua adeguandosi ai cambiamenti climatici. Il modello consente di stimare, e al contempo di confrontare, le risorse idriche nei corsi d'acqua naturali così come il fabbisogno d'acqua delle colture coltivate con esplicito riferimento spaziale e ad alta risoluzione temporale. Il modello contempla la meteorologia, le caratteristiche del terreno e le caratteristiche delle colture irrigate. Su una piattaforma internet vengono visualizzati la situazione attuale e lo sviluppo dei prossimi dieci giorni nonché memorizzati i dati dei periodi passati. Le valutazioni relative all'ultimo quindicennio mostrano che negli anni di siccità, come il 2015, il fabbisogno irriguo in singole aree della regione esaminata supera le risorse idriche per oltre il 60 per cento dei giorni. Tali informazioni online sono utilizzabili come base per opzioni di intervento a breve e a lungo termine.

## Summary

### Online water-shortage forecasts

Climate change causes the risk of water shortage to increase in regions where intensive agriculture is practised. A model for the Three-Lakes Region (Broye/Seeland) was created as a tool for forecasting critical situations and for the longer-term planning of water use with a view to adapting to climate change. The model allows the resources in natural bodies of water as well as the water requirement of the crops cultivated to be simultaneously calculated and compared at a high temporal resolution and in a spatially explicit manner. The model takes account of the weather, soil properties, and characteristics of the irrigated crops. The current situation and the trend over the following ten days are visualised, and data from past time periods are logged on an Internet platform. Analysis for the past 15 years shows that in dry years like 2015, the irrigation requirement in individual areas of the region of the study exceeds water resources on over 60 % of the days. This online information can be used as the basis for short- and long-term courses of action.

**Key words:** agriculture, climate change, hydrological model, water use.

## Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., 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.
- OFEV, 2012a. Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). Connaissance de l'environnement n° 1217, 76. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- OFEV, 2012b. Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Les miscellanées de l'environnement n° UD-1055-D, 65. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- e-dric.ch, 2010. Système RS 3.0 – User Guide. Lausanne. Accès: [http://www.e-dric.ch/images/techpdf/RS\\_USERS\\_GUIDE.pdf](http://www.e-dric.ch/images/techpdf/RS_USERS_GUIDE.pdf). Accès: [3.3.2016].
- Fuhrer J. & Calanca P., 2014. Irrigation et changement climatique: une analyse régionale du déficit en eau. *Recherche Agronomique Suisse* 5 (6), 256–263.
- Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N. & Holzkaemper A., 2013. Water demand in Swiss agriculture – Sustainable adaptive options for land and water management to mitigate impacts of climate change. *ART-Schriftenreihe* 19, 61 p. Agroscope, Zurich.
- 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. ETH Lausanne. 261 p.
- 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. Communication 38 (Ed. A. Schleiss), Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPF Lausanne. 111 p.
- Lanz K., Fuhrer J., Häberli W., Stamm C., 2014. Steigender Nutzungsdruck im Wasserschloss. *Aqua & Gas* 11, 24–29.
- Schäfli B., Hingray B., Niggly M., Musy A., 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth Systems Science* 9, 95–109.
- Smith P., Calanca P. & Fuhrer J., 2012. A simple scheme for modelling 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.