



Besoins en eau d'irrigation et ressources disponibles dans les conditions climatiques actuelles et futures

Auteur

Jürg Fuhrer, Hygiène de l'air/Climat ART



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de
l'économie DFE

Station de recherche
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Impressum

Mandataire	Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zurich Téléphone +41 44 377 71 11, info@agroscope.ch , www.agroscope.ch
Photo première page:	Installation d'irrigation, Jürg Fuhrer, ART
Traduction:	Regula Wolz, ART
Copyright:	2012 ART

Sommaire

1. Introduction.....	5
1.1. Situation initiale.....	5
1.2. Cahier des charges.....	5
2. Principes méthodologiques.....	7
2.1. Calcul du besoin en irrigation à l'aide du modèle hydrologique.....	7
2.2. Calculs modélisés approfondis pour les régions testées.....	8
2.3. Extrapolation des résultats du modèle.....	12
2.4. Evaluation statistique pour les régions.....	12
2.5. Définition et déduction des régions d'irrigation.....	12
2.6. Traitement des données de débit (ressources).....	13
3. Besoins d'irrigation dans les régions.....	15
3.1. Comparaison régionale des ressources et des besoins.....	15
3.2. Comparaison régionale des besoins et des ressources.....	19
4. Définition et étalonnage des zones sensibles.....	23
4.1. Définition.....	23
4.2. Structure et étalonnage du modèle pour les zones sensibles.....	24
5. Scénarios climatiques.....	26
5.1. Point de départ et déduction.....	26
5.2. Scénarios climatiques pour les régions sélectionnées.....	27
6. Résultats des besoins et ressources en eau dans les régions sensibles.....	33
6.1. Besoins en eau d'irrigation.....	33
7. Résumé et évaluation.....	37
8. Bibliographie.....	39
9. Annexe.....	40
9.1. A1 Tableaux.....	40
9.2. A2 Figures.....	40
9.3. B1 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation.....	42
9.4. B2 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation.....	43
9.5. B3 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation.....	44
9.6. B4 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation.....	45
9.7. B5 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation.....	46

Résumé

Le modèle hydrologique WaSiM-ETH a servi à calculer la quantité d'eau dont les surfaces agricoles ont eu potentiellement besoin durant les mois de juin, juillet et août des années 1981 à 2010 dans des bassins versants de taille moyenne et permis de comparer avec les débits. Pour les zones dans lesquelles le rapport entre les ressources et les besoins est critique, des projections supplémentaires ont été effectuées jusqu'en 2050. Sur la base de deux scénarios climatiques régionaux, ces calculs ont montré qu'avec le changement climatique, la pénurie d'eau pourrait devenir nettement plus sévère dans les régions de la Broye-Mentue et de la Birse, ce qui pourrait conduire à une recrudescence des conflits d'utilisation, si les pratiques d'arrosage ne sont pas adaptées.

Cette étude avait pour but d'identifier des régions dans lesquelles il pouvait éventuellement y avoir conflit entre l'eau disponible (débit superficiel) et les besoins potentiels d'irrigation, dans les conditions climatiques actuelles (1981–2010) et futures (2036–2065). Un modèle hydrologique (WaSiM-ETH) a permis de calculer le besoin en irrigation sur la base de la dernière Statistique de la superficie pour les terres arables, les prairies et les vergers avec une résolution de 500x500 mètres, de compiler les résultats par région et de les mettre en relation avec le débit observé dans ces mêmes régions. A partir de ces résultats, cinq régions prioritaires ont été sélectionnées (Thur, Emme, Glatt-Töss, Birse, Broye-Mentue). Les calculs ont ensuite été effectués pour le climat actuel et pour les conditions climatiques futures. Deux scénarios climatiques ont été employés pour un horizon temporel s'étendant de 2036 à 2065.

Les calculs indiquent que dans la période de 1981 à 2010, dans les deux régions (Birse, Broye-Mentue) pendant les années à températures élevées, précipitations limitées et débit réduit (2003), les besoins peuvent dépasser les ressources en eau (sans les eaux souterraines). Avec le scénario climatique « tempéré » (SMHIRCA-BCM), le risque augmente de manière insignifiante dans ces régions, mais avec le scénario climatique « extrême » (ETHZ-CLM), il s'accroît considérablement au point que, certaines années, les besoins dépassent les ressources, également dans les régions de la Thur et de l'Emme.

On constate donc que le risque de pénurie en eau durant les mois d'été à l'échelle des bassins versants augmente considérablement avec le changement climatique. Par conséquent, il est indispensable de prendre des mesures pour intervenir sur le mode d'exploitation ou les infrastructures (conduites d'amenée en provenance de plus grands réservoirs) pour adapter les besoins et améliorer les ressources pendant la période critique de l'été.

1. Introduction

1.1. Situation initiale

On estime qu'aujourd'hui en Suisse, environ 38'000 ha de surface agricole utile sont régulièrement arrosés et que 12'000 à 17'000 ha supplémentaires le sont occasionnellement (OFAG 2007). La surface qui aurait besoin d'arrosage est même nettement supérieure; des simulations indiquent qu'une irrigation serait nécessaire dans 41 % de la surface potentielle des terres arables et dans 26 % de la surface agricole utile totale (Fuhrer & Jasper 2009), c'est-à-dire que le potentiel de rendement ne peut être atteint sans apport complémentaire en eau. Dans les prochaines décennies, la situation pourrait évoluer : du fait du changement climatique, de nombreux agriculteurs et agricultrices se verront confrontés à la nécessité croissante d'arroser les cultures pour garantir les rendements de récolte. Pour éviter les conflits liés à la pénurie d'eau, il est donc primordial de trouver de nouvelles solutions et stratégies d'utilisation de cette ressource.

Dans ce contexte, le Postulat Walter 10.3533 «Eau et agriculture – Les défis de demain» demande l'élaboration d'un rapport qui présente une stratégie de l'eau reposant sur les principes du développement durable et tenant compte des besoins des différents groupes d'utilisateurs. Cette stratégie fournira des ébauches de mesures et de solutions tant pour surmonter des événements à court terme que pour relever des défis à long terme. Elle établira des directives, des ébauches de mesures et des règles du jeu sur la répartition de l'eau aux différents utilisateurs, définira comment ménager les intérêts des protecteurs des ressources en eau et ceux des utilisateurs et enfin comment élaborer une base juridique correspondante.

Pour trouver des solutions stratégiques à l'utilisation de l'eau en période de pénurie, il faut d'abord dresser un état des lieux de la situation actuelle et estimer les enjeux des différents utilisateurs d'eau et les intérêts des protecteurs des ressources en eau. A ce niveau, il est essentiel d'évaluer les besoins et les ressources en eau de manière différenciée dans l'espace durant les années moyennes et les « années de sécheresse ». La présente étude doit servir de base au rapport demandé par le Postulat Walter pour évaluer les besoins en irrigation de l'agriculture et les comparer aux ressources en eau disponibles, en tenant compte notamment de la situation en cas d'un futur changement climatique.

1.2. Cahier des charges

Le mandat prévoyait, sur la base des études Fuhrer et Jasper (2009) ainsi que Fuhrer (2010), et à l'aide du modèle hydrologique WaSiM-ETH (Schulla & Jasper 2007), l'établissement de bilans différenciés dans le temps et dans l'espace des besoins en eau d'irrigation de l'agriculture (sans production animale) compte tenu des ressources d'eau superficielle disponible (débit). Les simulations devaient d'abord être effectuées et évaluées pour les régions tests sélectionnées dans les études citées. La période choisie pour la simulation était la période de référence utilisée dans les études récentes sur le changement climatique, à savoir de 1981 à 2010 (p. ex. SGHL & CHy 2011, CH2011 2011). Le besoin en irrigation devait être indiqué mensuellement pour chaque région test. Les résultats des simulations spécifiques aux régions pour les besoins d'irrigation mensuels et annuels (moyenne des années 1981–2010 et année 2003) devaient ensuite être extrapolés à l'ensemble de la surface agricole. Les résultats du changement d'échelle devaient être évalués statistiquement et graphiquement pour des régions d'irrigation prédéfinies (taille moyenne environ 1000 km²) compte tenu des ressources en eau disponibles (débit) La comparaison des besoins et des ressources avait pour but d'identifier les régions problématiques potentielles („Hotspots“).

Après consultation du mandataire, une deuxième phase des travaux a consisté à soumettre les éventuelles régions problématiques à une analyse plus détaillée. Il était notamment important d'effectuer des calculs supplémentaires afin d'évaluer les besoins de ces régions dans les futures conditions climatiques et de les comparer aux ressources estimées durant les mois de juin, juillet et août. Les simulations devaient s'appuyer sur les données actuellement disponibles sur le changement climatique en Suisse et devaient couvrir un horizon temporel allant jusqu'en 2050 (OcCC 2007, CH2011 2011).

2. Principes méthodologiques

2.1. Calcul du besoin en irrigation à l'aide du modèle hydrologique

Les bases de calcul des besoins en irrigation ont été décrites par Fuhrer (2010) et mises en application à l'aide du débit hydrologique et du modèle de régime hydrique WaSiM-ETH (Schulla 1997, Schulla & Jasper 2007, voir également www.wasim.ch). Ce modèle d'une utilisation très souple reflète l'état actuel des connaissances en matière de modélisation hydrologique des bassins versants orientée processus. A l'aide de ses méthodes physiques, le modèle permet une simulation détaillée dans le temps et dans l'espace de tous les flux d'eau importants pour l'hydrologie. Le modèle cherche particulièrement à simuler la dynamique et le régime de l'eau du sol de la manière la plus proche possible de la réalité. Cette propriété jointe aux exigences relativement minimales en termes de données faisait du modèle Wasim-ETH un outil prédestiné dans le projet actuel.

Le calcul des besoins en irrigation correspond à une simulation d'irrigation gérée selon les besoins, dans laquelle ceux-ci sont déterminés au moyen de la réduction d'évaporation modélisée. Pour ce faire, on calcule l'humidité moyenne du sol à la profondeur d'enracinement en tenant compte de la différenciation par surface, ainsi que le rapport entre l'évapotranspiration actuelle et potentielle (ET/ETP). A chaque intervalle de temps nécessaire au calcul, ces valeurs sont introduites dans le module d'irrigation de WaSiM-ETH où elles sont évaluées. Lorsqu'à un intervalle de temps, une valeur seuil ET/ETP prédéfinie n'est pas atteinte, l'irrigation est déclenchée. La quantité d'eau d'irrigation est calculée en faisant la différence entre la valeur cible et la valeur actuelle de l'humidité du sol à la profondeur d'enracinement.

Comme l'ont déjà montré des études antérieures (Fuhrer et Jasper 2009, Fuhrer 2010), on a constaté qu'une réduction de 20 % de la transpiration, paramètre dépendant de l'humidité du sol, déclenchait l'irrigation (ET/ETP = 0,80). La valeur cible d'irrigation correspond à l'état d'humidité du sol à partir duquel la transpiration actuelle diminue par rapport à la transpiration potentielle. La procédure de gestion de l'irrigation est représentée schématiquement à la figure 1. $\Delta\theta$ représente la quantité d'eau qui doit être fournie par arrosage au cas où la valeur seuil ET/ETP n'est pas atteinte. Il faut savoir que la quantité d'irrigation ainsi calculée représente une quantité potentielle moyennant une technique d'irrigation idéale. Les pertes d'irrigation, telles qu'elles se produisent couramment dans la pratique (c.-à-d. efficacité d'irrigation <100 %) n'ont pas été prises en compte. Cela veut dire que les résultats de calcul indiquent plutôt la limite inférieure de la quantité d'eau qui doit être apportée par irrigation.

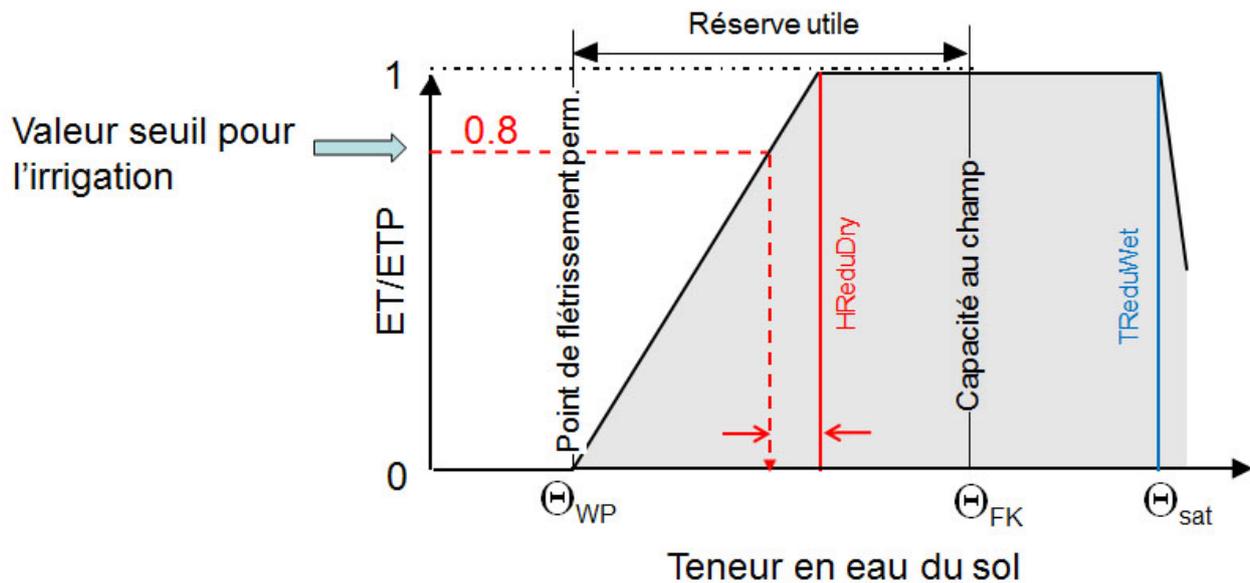


Figure 1: Définition de la quantité d'eau d'irrigation en fonction de la transpiration et de la teneur en eau du sol. nFK = capacité utile au champ; DW = eau de drainage ou eau de gravitation; θ_{WP} = teneur en eau au point de flétrissement; θ_{FK} = teneur en eau à la capacité au champ; θ_{sat} = teneur en eau à saturation; $\Delta\theta$ = besoins en irrigation; $HReduDry$ = valeur indicative de début de stress dû à la sécheresse; $TReduWet$ = valeur indicative de début de stress dû à l'engorgement (à cause d'une carence en oxygène).

Conformément à ce qui a été dit plus haut, le début du stress dû à la sécheresse est déterminé par une valeur limite du potentiel hydrique du sol, qui dépend du type de culture ($HReduDry$). Dans la présente étude, cette valeur limite a été fixée à 350 hPa (ou en cm de colonne d'eau) indépendamment du type d'utilisation des sols (= pF 2,54). Elle correspond à la valeur du paramètre choisi pour les applications du modèle de Fuhrer & Jasper (2009). Comme le montre la figure 1, les teneurs en eau dépendantes du type de sol qui correspondent au paramètre $HReduDry$ se situent chacune au-dessous de celles qui correspondent à la capacité au champ (FK). Dans la littérature, cette dernière est souvent désignée par la teneur en eau du sol liée lorsque le potentiel hydrique est de 60 hPa (= pF 1,8) (p. ex. Schlichting & Blume 1966, Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005). Cette définition simplifiée ne reflète pas tout à fait la complexité de ce paramètre. Il s'ensuit que dans la pratique pédologique, la capacité au champ FK est de plus en plus souvent remplacée par l'équivalent d'humidité (FÄ) qui dépend du type de sol (p. ex. Renger et al. (2008) et qui comporte un domaine relatif au potentiel hydrique allant de 60 hPa (sols sableux) à 320 hPa (sols argileux) (= pF 1,8 – 2,5).

2.2. Calculs modélisés approfondis pour les régions testées

Comme dans les études précédentes (Fuhrer & Jasper 2009, Fuhrer 2010), les calculs différenciés par surface de la modélisation hydrologique des bassins versants de la Thur, de l'Emme, de la Broye, du Rhône, du Tessin et de la Dischma ont également servi de base dans le présent projet pour établir les cartes des besoins en irrigation de l'agriculture suisse. La figure 2 permet de visualiser la situation et l'extension des bassins versants cités (régions testées). La superficie des bassins va de 43 km² (Dischma) à 1700 km² (Thur), sachant que le pourcentage de surface agricole utile par rapport à la surface totale de la région oscille entre 13 et 65 % (cf. tab. 1). Au total, environ 16 % (soit environ 2200 km²) des régions testées sont répertoriés dans la surface agricole totale de la Suisse. La situation et les caractéristiques géographiques particulières des régions testées permettent de bien représenter la palette des conditions d'utilisation (climat, sol, relief, etc.) auxquelles est confrontée l'agriculture suisse.

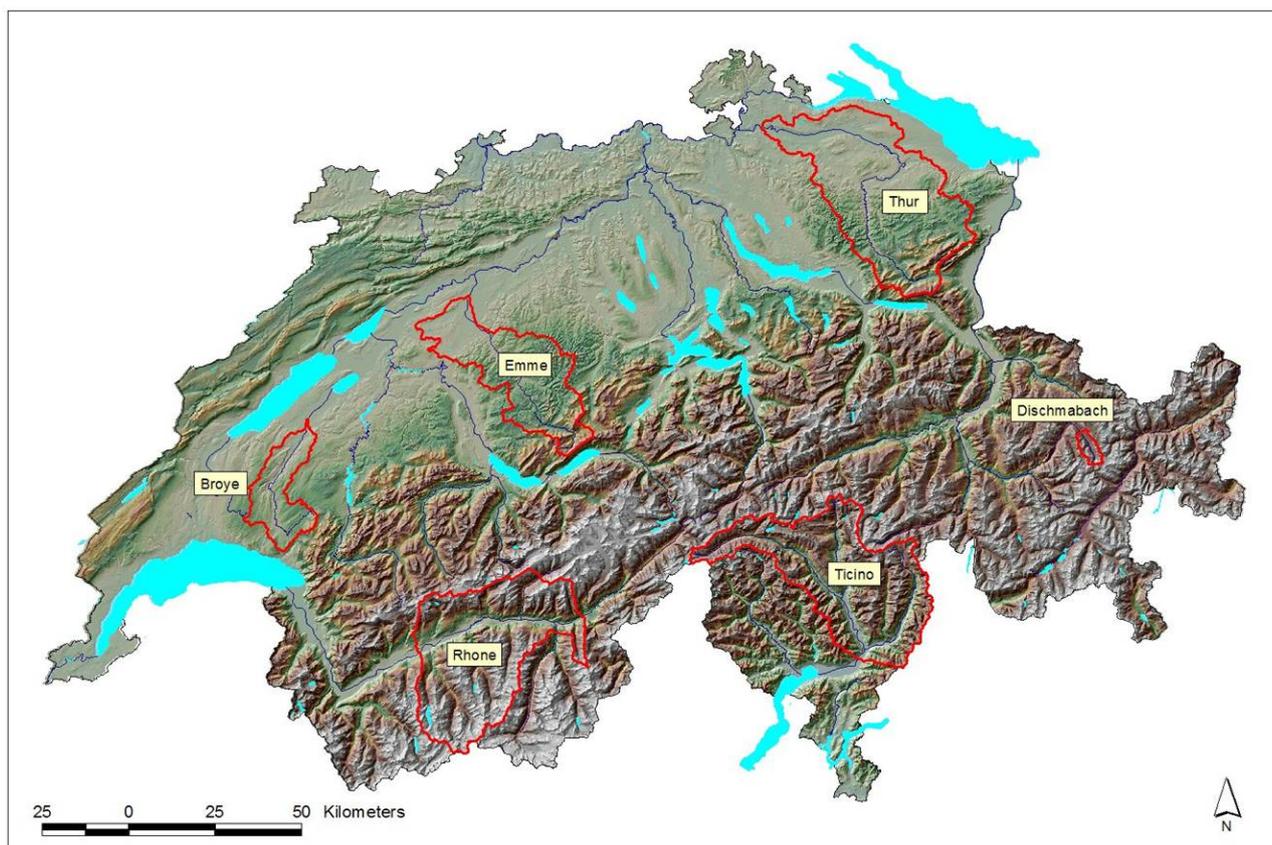


Figure 2: Situation des zones d'étude en Suisse (tiré de Fuhrer & Jasper 2009).

Contrairement à celles de Fuhrer et Jasper (2009) et de Fuhrer (2010), la présente étude tient compte de la Statistique de la superficie 2004/09 (état: août 2011; cf. fig. 3) pour identifier les surfaces agricoles (terres arables, prairies, arboriculture). Pour les régions de la Suisse qui n'ont pas encore été saisies à ce jour, l'étude s'est référée aux données plus anciennes de la Statistique de la superficie 1992/97 (OFS 2004). Dans cette compilation, les terres arables ne sont toutefois pas indiquées séparément, mais doivent être déterminées à l'aide d'un procédé de déduction spécial (cf. Fuhrer & Jasper 2009). C'est pourquoi on parle de la catégorie « terres arables potentielles », dont la localisation géographique et la superficie peuvent tout à fait avoir été surestimées par rapport aux surfaces réellement occupées par des terres arables. Dans l'ensemble, environ 25 % de la surface agricole utile de la Suisse a encore dû être identifiée sur la base de l'ancienne Statistique de la superficie 1992/97.

Tableau 1: Part de surface agricole (SA) dans les régions testées

Région		Thur	Emme	Broye	Rhône	Tessin	Dischma
Surface totale	[km ²]	1696	939	392	1574	1515	43
Part de SA (rel.)	[%]	58	52	65	18	13	28
Part de SA (abs.)	[ha]	97 800	49 100	25 400	28 300	19 700	1200
Terres arables	[ha]	33 800	17 800	14 500	600	800	0
Prairies	[ha]	59 900	30 500	10 500	24 500	18 600	1200
Vergers	[ha]	4100	800	400	3'200	300	0

^a Secteur entre Brigue et Sion (sans les régions des affluents latéraux Vispa-Viège et Lonza-Blatten)

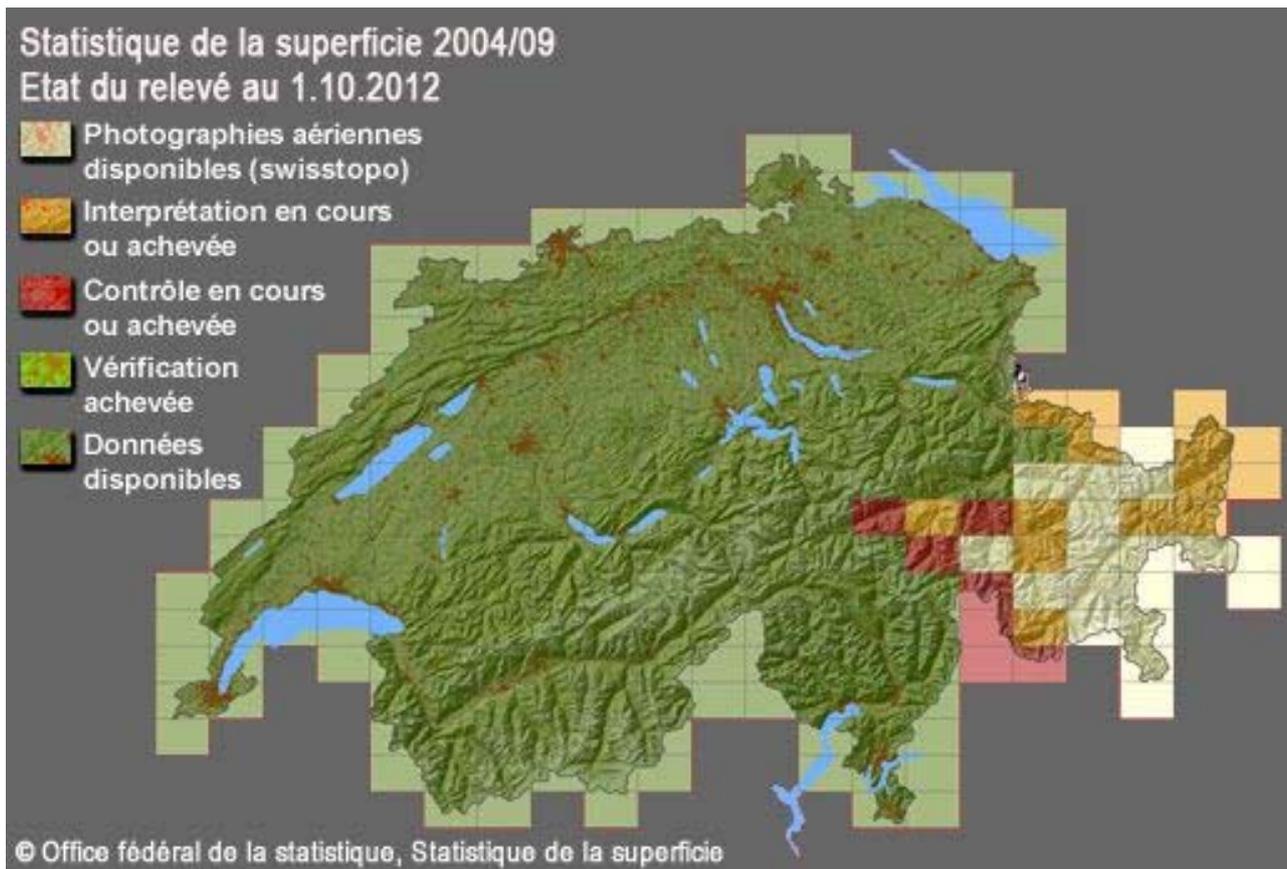


Figure 3: Etat actuel du relevé des données pour la Statistique de la superficie 2004/09 (Source: Office fédéral de la statistique OFS, www.bfs.admin.ch)

Les simulations à haute résolution du régime hydrique et des besoins en eau d'irrigation ont été faites à partir de l'application du modèle présentée par Fuhrer & Jasper (2009) et Fuhrer (2010). Les calculs ont fourni des simulations journalières en continu avec une résolution spatiale de 500 x 500 m.

Par ailleurs, l'application du modèle choisie pour la gestion de l'irrigation se caractérise par les postulats suivants:

- Aucune limitation de l'apport en eau pour l'irrigation
- Aucune valeur des paramètres spécifique selon le type de culture pour le calcul du régime hydrique du sol et de la gestion d'irrigation. C'est-à-dire valeurs moyennes pour la description phénologique de la croissance des cultures arables, des prairies et de l'arboriculture.
- Simulation du régime hydrique du sol à partir du modèle de van Genuchten (1980) et de la paramétrisation de Carsel et Parrish (1988).

Contrairement aux deux études précédentes (Fuhrer & Jasper 2009, Fuhrer 2010), dans les simulations actuelles, les cycles phénologiques d'évolution des prairies sont interrompus par des dates de fauche. Trois coupes sont prédéfinies par période végétative, sachant que ces dates ne sont pas figées mais peuvent varier suivant l'altitude du site concerné.

L'introduction des coupes et la prolongation de la période de simulation a entraîné les travaux supplémentaires suivants:

- Mise à disposition et préparation des séries de données météorologiques et hydrologiques nécessaires au modèle (données liées aux stations pour la période de prolongation 2007–2010)
- Contrôle et éventuellement réétalonnage de l'application du modèle

- Réalisation de simulations annuelles (1981–2010) pour toutes les régions testées
- Evaluation des résultats des besoins en eau d'irrigation spécifiques aux régions

La période de simulation s'étendait désormais sur les années 1981 à 2010 (auparavant 1980–2006). Cette plage correspond à la période de référence actuelle dans les simulations du climat (p. ex. CH2011 2011) et est donc utilisée dans la présente étude pour faciliter les comparaisons.

Les résultats des évaluations statistiques des besoins en eau d'irrigation sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: Besoins mensuels en eau d'irrigation pour les surfaces agricoles (sans composants partiels) dans les régions testées; moyennes pour la période 1981 à 2010 et pour l'année de sécheresse 2003 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m³)

Région	Thur	Emme	Broye	Rhône	Tessin	Dischma
Moyenne pour 1981–2010						
Janvier	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Février	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Avril	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Mai	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0,0
Juin	0,5	0,4	0,5	0,7	0,2	0,0
Juillet	2,1	1,3	2,0	1,1	0,3	0,0
Août	0,9	0,9	1,1	0,8	0,1	0,0
Septembre	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,0
Octobre	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Novembre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Décembre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Année	4,5	3,1	4,1	3,9	1,0	0,0
Année de sécheresse 2003						
Janvier	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Février	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Avril	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
Juin	7,7	4,5	4,6	1,2	1,1	0,0
Juillet	11,8	5,8	8,1	2,9	0,9	0,0
Août	9,9	7,9	9,0	2,1	1,0	0,0
Septembre	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
Octobre	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Novembre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Décembre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Année	29,5	18,3	21,7	8,1	3,2	0,0

^a Secteur entre Brigue et Sion (sans les régions des affluents latéraux Vispa-Viège et Lonza-Blatten)

2.3. Extrapolation des résultats du modèle

L'extrapolation à l'ensemble de la surface agricole de la Suisse des quantités d'eau d'irrigation calculées pour les régions spécifiques a été effectuée à l'aide de la méthode de régression multiple décrite par Fuhrer (2010) en tenant compte de la dépendance des besoins en eau vis-à-vis des conditions climatiques, topographiques et pédologiques.

Les résultats de l'extrapolation sont présentés dans le tableau 3, sous formes de valeurs mensuelles et annuelles. Ils permettent de chiffrer les besoins moyens en eau d'irrigation de la Suisse à 130 millions de mètres cube par an. En 2003, année marquée par la sécheresse, ces besoins ont été plus que multipliés par quatre. Comme on pouvait s'y attendre, les mois d'été sont les périodes où les quantités d'irrigation sont les plus élevées. En août 2003, les besoins en eau étaient par exemple sept fois supérieurs à la moyenne annuelle.

Tableau 3: Extrapolation des quantités d'eau d'irrigation spécifiques aux régions à l'ensemble de la surface agricole de la Suisse (tous les chiffres sont indiqués en millions de m³)

Période	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
1981–2010	0	0	1	7	9	19	52	30	8	5	0	0	130
2003	0	0	5	8	6	136	201	211	5	1	0	0	572

Il faut signaler que les estimations des besoins par extrapolation sont sans doute un peu inférieures à la réalité, notamment durant les années de sécheresse. C'est ce que montre la comparaison des résultats entre extrapolation et simulation dans les régions testées concernées. Durant l'année de sécheresse 2003, les valeurs d'extrapolation sont par exemple inférieures d'environ 10 % à celles de la simulation explicite pour plusieurs régions testées (Emme, Rhône, Tessin, Broye).

2.4. Evaluation statistique pour les régions

A partir des résultats de l'extrapolation, les besoins calculés ont été comparés aux ressources en eau effectivement disponibles. Par manque de données d'observation spatiale et temporelle détaillées sur les eaux souterraines (les données relatives à la nappe phréatique ne sont disponibles que ponctuellement) seul le débit des cours d'eau superficiels mesuré a été considéré dans l'étude pour simplifier (sans prises en compte des lacs et des réservoirs).

Les travaux à réaliser se répartissaient comme suit:

- Définition de régions d'irrigation «appropriées». Ces régions devaient si possible avoir une taille moyenne d'env. 1000 km² et représenter l'ensemble de la Suisse
- Recoupement entre la carte des besoins établie par extrapolation (cf. chapitre 3) et la carte des régions d'irrigation
- Mise à disposition et traitement statistique des débits correspondant aux régions (moyennes mensuelles sur l'année pour la période 1981–2010)
- Evaluations statistiques et graphiques sur le rapport entre les besoins et les ressources

2.5. Définition et déduction des régions d'irrigation

Les régions ont été délimitées sur la base de deux jeux détaillés de données sur les surfaces: le modèle d'altitude RIMINI (swisstopo 2004) a tout d'abord servi à réaliser une analyse topographique approfondie de la Suisse et à déterminer les bassins versants correspondant aux stations hydrométriques choisies. Ensuite,

les régions „mal délimitées“ issues de la déduction ont été complétées à l'aide du produit *EZGG-CH* « Subdivision de la Suisse en bassins versants » (OFEV 2011). Les jeux de géodonnées pris en compte étaient du niveau d'agrégation 1000 km^2 . La présente étude a sciemment renoncé à utiliser exclusivement le jeu de données *EZGG-CH*, car ce dernier n'offre pas de classification explicite des régions sur le base de stations hygrométriques librement sélectionnées.

A l'issue de l'analyse, 39 régions ont été délimitées (cf. fig. 4 et tab. 4). Les régions avaient des superficies comprises entre 526 km^2 (région de Broye-Mentue [31]) et 1722 km^2 (Broye-plaine-Seeland [33]). Les parts de surfaces agricoles étaient comprises entre 6 % (région de Maggia [7]) et 66 % (région de Broye-Mentue [31]).

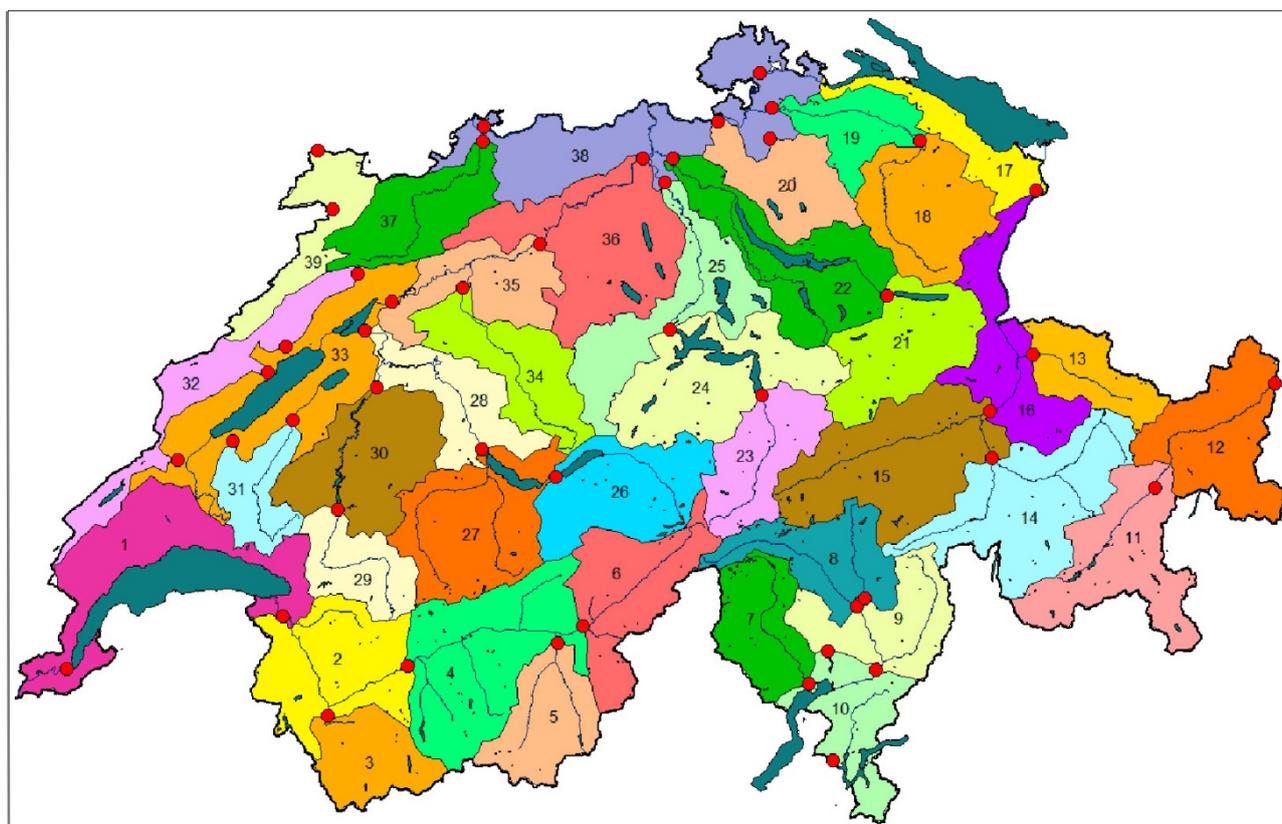


Figure 4: Situation et ID des régions délimitées et stations hygrométriques correspondantes (cercles)

2.6. Traitement des données de débit (ressources)

Dans le cadre de l'étude, les ressources potentielles d'eau d'irrigation ont été estimées à partir du volume de débit observé. Pour ce faire, dans chaque région, les séries temporelles de débit se rapportant aux stations (cf. tab. 4) ont été soumises à une évaluation statistique pour la période d'étude de 1981 à 2010. Au total, les sommes des débits mensuels moyens de 47 stations hydrométriques ont été déterminées. Les quantités d'eau résiduelle n'ont pas été prises en compte.

Tableau 4: Indications relatives aux régions sélectionnées (SA: surface agricole)

ID	Désignation de la région	Superficie ^a [km ²]	Pourcentage de SA [%]	Station hydrométriques correspondantes [Nom du fleuve – de la station]
1	Région du Léman	1668	35,2	Rhône – Genève
2	Chablais	1235	25,6	Rhône – Port du Scex
3	Région de Dranse	670	15,0	Dranse – Martigny
4	Valais central	1661	17,1	Rhône – Sion
5	Vallée de la Vispa	777	8,9	Vispa – Viège
6	Haut-Valais	1077	15,6	Rhône – Brigue
7	Vallée de la Maggia	753	6,1	Maggia – Locarno-Solduno
8	Région du Haut-Tessin (Leventina, vallée de Blénio)	846	16,5	Tessin – Pollegio Brenno – Loderio
9	Région du Tessin central (Riviera, Misoix, vallée de la Verzasca)	853	8,3	Ticino – Bellinzona Verzasca – Lavertezzo
10	Région Magadino-Tresa	777	11,2	Tresa – Ponte Tresa
11	Haute-Engadine	1210	16,2	Inn – Cignes-chel
12	Basse-Engadine	1133	22,4	Inn – Martina
13	Prättigau	619	34,1	Landquart – Felsenbach
14	Région du Rhin postérieur	1523	27,5	Hinterrhein – Fürstenau
15	Région du Rhin antérieur	1640	28,8	Rhin – Domat-Ems
16	Vallée du Rhin alpin	974	38,1	Rhin – Diepoldsau
17	Région du lac de Constance	708	41,3	Rhin – Neuhausen
18	Région de la Thur supérieure	1083	56,2	Thur – Halden
19	Région de la Thur inférieure	597	60,2	Thur – Andelfingen
20	Vallée du Glatt-Vallée de la Töss	768	40,8	Glatt – Rheinfelden Töss – Neftenbach
21	Glarnerland-Sarganserland	1072	29,4	Linth – Weesen
22	Région du lac de Zurich	1318	38,2	Limmat – Baden
23	Vallée supérieure de la Reuss	831	16,2	Reuss – Seedorf
24	Suisse centrale	1431	33,2	Reuss – Lucerne
25	Entlebuch –Reuss inférieure	1125	48,6	Reuss – Mellingen
26	Région du lac de Brienz	1141	18,5	Aare – Ringgenberg
27	Région du lac de Thoune	1370	35,7	Aare – Thoune
28	Mittelland bernois	802	54,3	Aare – Hagneck
29	Saänenland	636	41,2	Sarine – Broc
30	Pays de Gruyère – Senseland	1208	56,5	Saane – Loyes
31	Région de Broye-Mentue	526	65,6	Broye – Payerne Mentue – Yvonand
32	Région d'Orbe-Areuse-Seyon-Suze	863	42,6	Orbe – Orbe, Areuse – Boudry, Seyon – Valangin, Suze – Sonceboz
33	Plaine de la Broye-Seeland	1722	46,3	Aare – Brügg
34	Emmental	928	51,6	Emme – Wiler
35	Région de l'Aare centrale	825	54,0	Aare – Murgenthal
36	Région de l'Aare inférieure	1617	50,2	Aare – Brügg
37	Région de la Birse	880	42,0	Birse – Münchenstein
38	Rhin supérieur	1719	44,2	Rhin – Bâle
39	Région du Doubs	636	50,9	Doubs – Ocourt Allaine – Boncourt

^a Les indications de superficie se réfèrent aux régions représentées dans la figure 2, pas aux régions des affluents se rapportant aux stations.

3. Besoins d'irrigation dans les régions

3.1. Comparaison régionale des ressources et des besoins

L'évaluation des besoins saisonniers en irrigation spécifiques aux régions a été effectuée d'une part pour la période de 1981 à 2010 (fig. 4 et tab. 5) et d'autre part pour l'année 2003 (fig. 5 et tab. 6). Durant ces deux périodes, la région du Léman (région 1), la région de Broye-Seeland (région 33) et le Rhin supérieur (région 38) étaient les régions qui affichaient les besoins saisonniers en eau d'irrigation les plus élevés. En revanche, la région de Maggia (région 7), peu exploitée par l'agriculture, était celle qui avait les besoins les plus faibles.

Il faut noter que les quantités calculées pour chaque région dépendent d'une part, du mode d'exploitation agricole dominant (grandes cultures, prairies, arboriculture) et d'autre part, des conditions spécifiques à l'environnement (altitude, pente, sol et climat). Dans les régions, où une large part des sols est consacrée à l'exploitation agricole en altitude, les besoins en eau d'irrigation sont plutôt bas, car le volume de précipitations est élevé et le taux d'évaporation plus faible (notamment du fait des températures plus basses) que dans les régions de plaine. C'est le cas notamment de larges secteurs de la région du Rhône, où les prairies dominent dans les surfaces agricoles en altitude. Dans cette région, les grandes cultures et l'arboriculture se concentrent surtout en plaine.

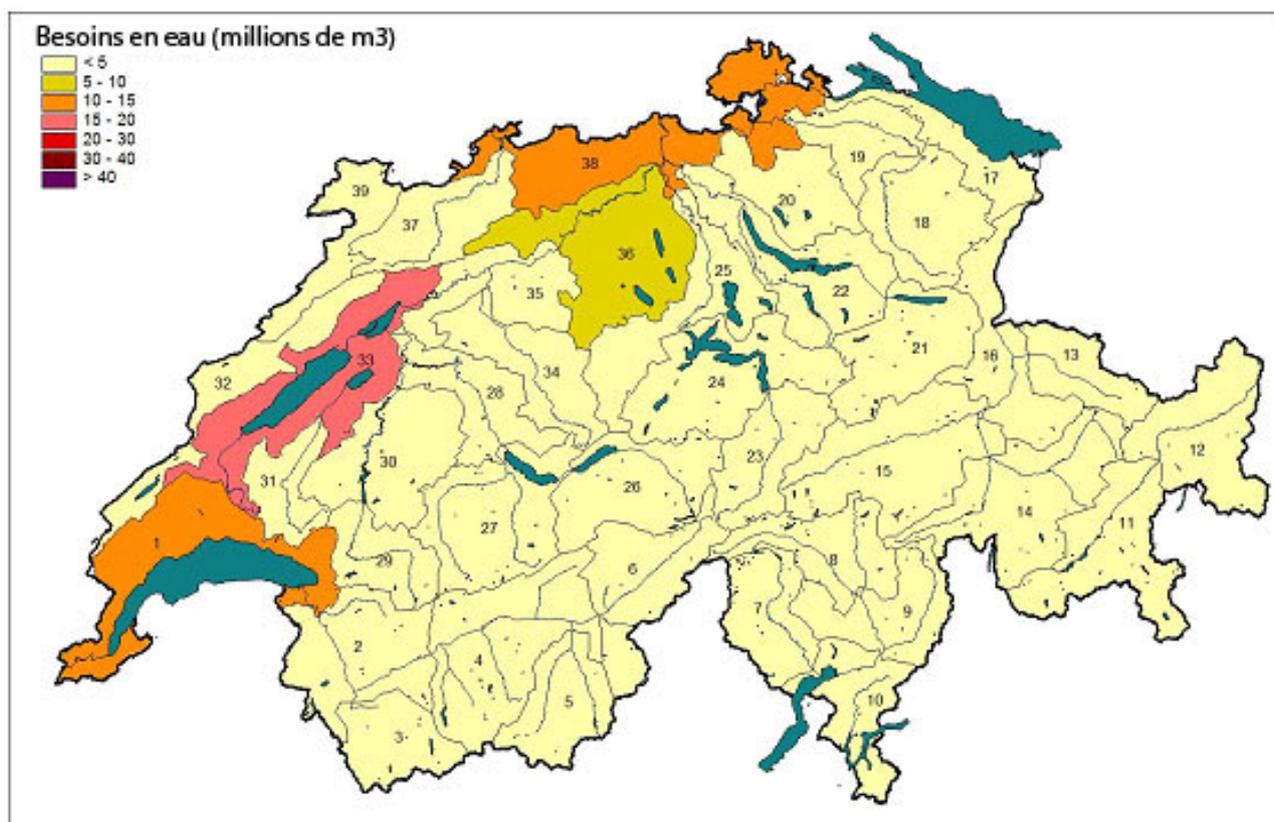


Figure 5: Besoins annuels moyens en eau d'irrigation de l'agriculture suisse pour la période 1981 à 2010 (avec numérotation des régions)

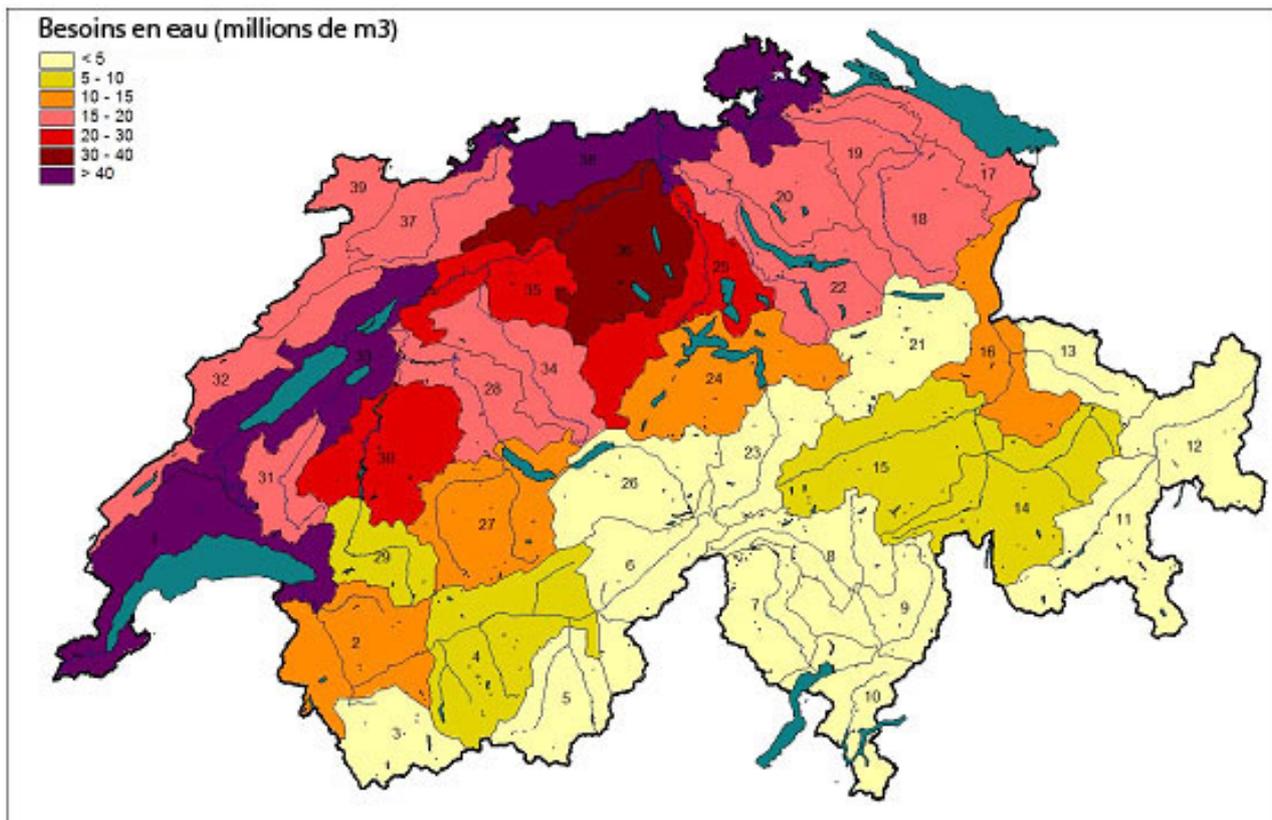


Figure 6: Besoins en eau d'irrigation de l'agriculture suisse pour l'année de sécheresse 2003 (avec numérotation des régions)

Il faut également tenir compte du fait que certaines surfaces agricoles utiles prises en compte dans l'étude actuelle ont encore été définies à l'aide de « l'ancienne » Statistique de la superficie 1992/97 (cf. chapitre 2). La „nouvelle“ Statistique de la superficie 2004/09, qui en août 2011 avait été évaluée pour environ 75 % de la superficie du pays (fig. 2), indique nettement moins de grandes cultures (-35 %) et plus de prairies (+30 %) par rapport à la Statistique 1992/97. Comparé aux études précédentes, cela devrait conduire à une baisse des valeurs exprimant les besoins.

Tableau 5: Besoins moyens en irrigation par région pour les surfaces agricoles en Suisse dans la période de 1981 à 2010 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m³)

Région	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
1	0,0	0,0	0,0	0,6	1,0	2,3	5,0	2,7	0,6	0,3	0,0	0,0	12,4
2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,6	1,3	0,8	0,3	0,2	0,0	0,0	3,8
3	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0,0	0,0	2,4
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9
12	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	1,1
13	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9
14	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	1,8
15	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	2,0
16	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,4	1,3	0,8	0,2	0,2	0,0	0,0	3,3
17	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	1,3	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	2,7
18	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	1,5	0,9	0,3	0,2	0,0	0,0	3,5
19	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	1,5	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,2
20	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	1,3	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	2,9
21	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	1,4
22	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	1,7	1,0	0,2	0,2	0,0	0,0	3,9
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
24	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,9	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	2,5
25	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	1,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,8
27	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,9	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	2,5
28	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,7	1,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,2
29	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	1,5
30	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,7	2,1	1,2	0,2	0,2	0,0	0,0	5,0
31	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,8	1,9	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,7
32	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,1
33	0,0	0,0	0,0	1,4	2,2	3,9	6,8	3,7	1,2	0,5	0,0	0,0	19,8
34	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	1,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	3,3
35	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,8	1,9	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,5
36	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	1,0	3,0	1,7	0,3	0,1	0,0	0,0	6,8
37	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	1,4	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	3,5
38	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	1,6	4,6	2,8	0,5	0,2	0,0	0,0	10,8
39	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,1
Total	0,0	0,0	0,0	6,2	8,5	19,6	51,9	29,9	7,4	5	0,0	0,0	130,1

Tableau 6: Besoins régionaux en irrigation pour les surfaces agricoles en Suisse durant l'année de sécheresse 2003 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m³)

Région	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
1	0,0	0,0	0,4	1,2	0,9	14,6	15,7	15,7	0,7	0,1	0,0	0,0	49,2
2	0,0	0,0	0,2	0,4	0,3	2,9	4,5	5,1	0,2	0,0	0,0	0,0	13,6
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	1,5	2,4	2,8	0,2	0,0	0,0	0,0	7,5
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6
14	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,8	2,1	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3
15	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	1,1	2,5	3,6	0,1	0,0	0,0	0,0	7,4
16	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	3,3	4,7	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9
17	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	4,8	6,1	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
18	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	3,5	7,1	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	18,6
19	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	5,4	7,4	6,1	0,1	0,0	0,0	0,0	19,3
20	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	4,4	6,2	5,6	0,1	0,0	0,0	0,0	16,5
21	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,8	1,5	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
22	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	4,8	7,3	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8
24	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,9	3,8	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6
25	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	5,7	8,9	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	23,1
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7
27	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	1,4	3,9	5,2	0,1	0,0	0,0	0,0	10,8
28	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	5,1	7,1	7,1	0,1	0,0	0,0	0,0	20,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,6	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9
30	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	5,2	8,9	10,0	0,1	0,0	0,0	0,0	24,7
31	0,0	0,0	0,1	0,4	0,3	5,3	6,8	7,0	0,2	0,0	0,0	0,0	20,1
32	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	3,7	6,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
33	0,0	0,0	1,0	2,8	2,2	15,8	18,3	17,6	1,6	0,2	0,0	0,0	59,4
34	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	4,0	6,0	6,3	0,1	0,0	0,0	0,0	16,7
35	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	5,5	7,5	7,2	0,2	0,0	0,0	0,0	21,1
36	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	9,6	14,0	12,8	0,1	0,0	0,0	0,0	37,3
37	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	3,4	5,9	6,5	0,1	0,0	0,0	0,0	16,4
38	0,0	0,0	0,3	0,5	0,4	12,8	18,5	19,3	0,3	0,0	0,0	0,0	52,2
39	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	3,5	6,1	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
Total	0,0	0,0	4,4	7,7	6,0	136,3	200,7	210,5	4,3	0,3	0,0	0,0	572

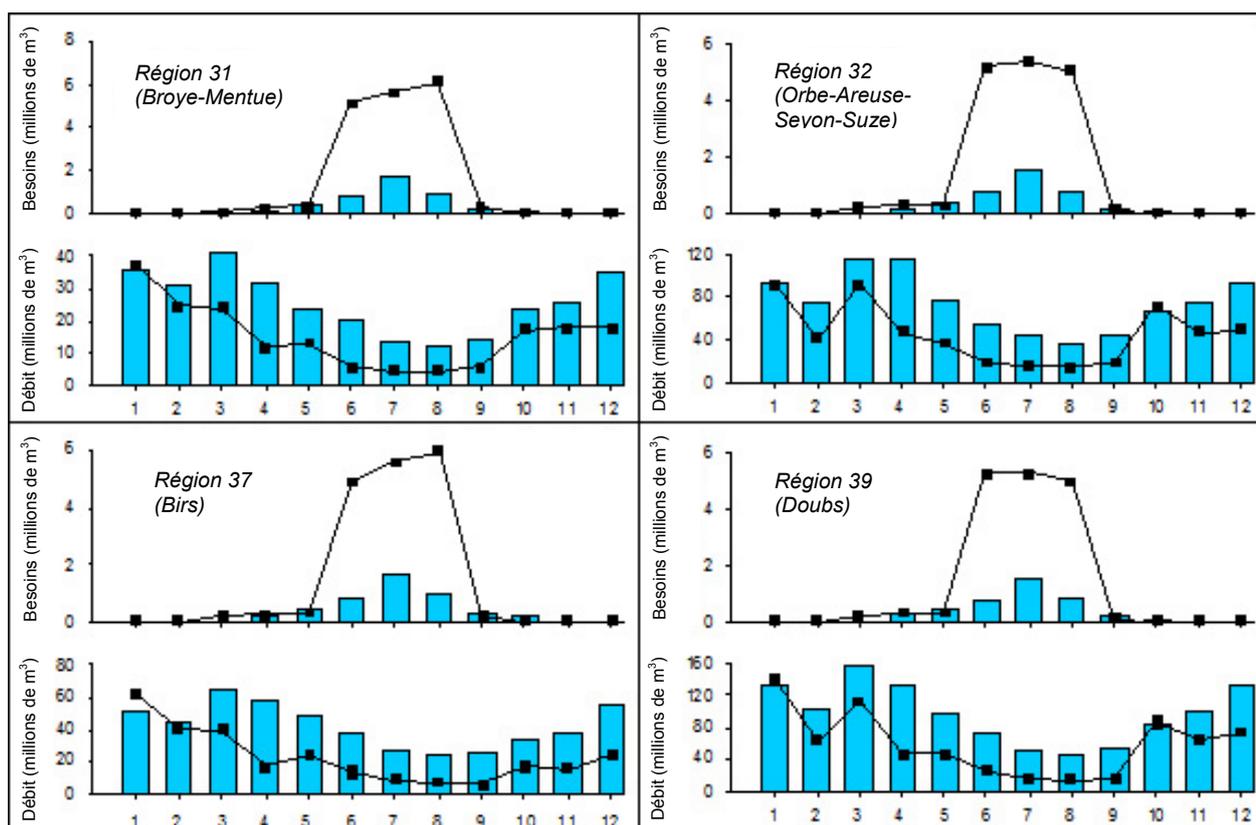


Figure 7: Valeurs mensuelles des besoins en eau d'irrigation et des ressources disponibles (débit) pour les régions choisies, pour la période de 1981 à 2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)

3.2. Comparaison régionale des besoins et des ressources

Sur la période étudiée (1981–2010), la comparaison régionale entre les besoins calculés en irrigation et les ressources en eau disponibles (en surface) n'indique une limitation possible de l'utilisation de l'eau fluviale pour les besoins de l'irrigation que durant les années de sécheresse comme 2003. Pendant l'été 2003, particulièrement dans les régions Broye-Mentue, Orbe-Areuse-Seyon-Suze, Birse et Doubs, les ressources ont atteint un ordre de grandeur semblable à celui des besoins (cf. fig. 6). Les graphiques comparatifs mensuels de toutes les régions se trouvent dans l'annexe B.

Le mode de comparaison (besoins/ressources) suppose premièrement que chaque surface agricole utile de la région concernée puisse être irriguée par de l'eau fluviale, ce qui n'est quasiment pas envisageable dans la pratique (longues distances de transport), et deuxièmement qu'aucune source d'eau souterraine n'est utilisée. Par conséquent, les déficits en matière de disponibilité de l'eau d'irrigation devraient être nettement plus répandus à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale et ce, pas seulement les années de sécheresse. La différenciation temporelle par mois ne permet pas de saisir les phases de manque d'eau de courte durée. Pour cela, il faudrait pouvoir tenir compte des quantités prescrites d'eau résiduelle ainsi que du degré d'efficacité de l'irrigation qui peut se situer nettement en dessous de 80 % en fonction du système employé.

Les résultats des mois d'été, reconnus comme critiques, juin-juillet-août (JJA) sont classés dans la figure 8 suivant le niveau de la moyenne (1981–2010). La figure 9 donne une vue d'ensemble de la répartition spatiale des conditions moyennes de 1981 à 2010 et la figure 10 de l'année 2003.

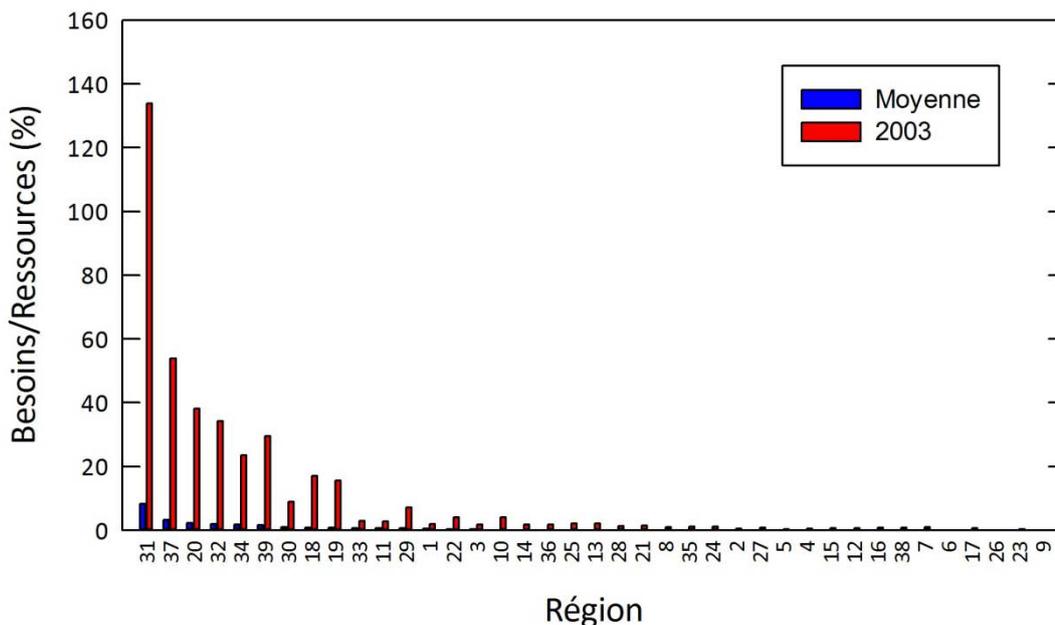


Figure 8: Rapport entre les besoins et les ressources (JJJ) pour tous les bassins versants en moyenne (1981–2010) et pour 2003, classé selon le niveau du rapport moyen (numéros de bassins versants selon tab. 4).

Cette méthode permet d’identifier les éventuelles régions problématiques, dans lesquelles l’agriculture peut se voir confrontée à des pénuries d’eau pendant les années extrêmement chaudes et sèches. La figure 8 montre que dans la majorité des bassins versants, les besoins moyens sont inférieurs à 1 % des ressources. Même en 2003, en dépit de conditions climatiques extrêmes, les valeurs relatives des besoins sont très basses, à l’exception de quelques régions, où les besoins ont dépassé 20 % des ressources disponibles.

Les évaluations montrent que la région de Broye-Mentue (région 31) et la région de la Birse (région 37) sont celles où le potentiel de risque est le plus élevé en ce qui concerne l’approvisionnement de l’agriculture en eau. Durant les mois d’été de l’année de sécheresse 2003, les besoins d’irrigation calculés dépassent les ressources en eau (débit disponible) de plus de 30 %. Dans les autres régions, les besoins sont nettement inférieurs aux ressources, ce qui ne veut pas pour autant dire qu’il faut sonner la fin de l’alerte. Une augmentation de la sollicitation des ressources (30–60 %) a notamment été identifiée dans la région Glatt-Töss, les zones d’affluents des lacs de Neuchâtel et de Bienne (Orbe-Areuse-Seyon-Suze) et la région du Doubs.

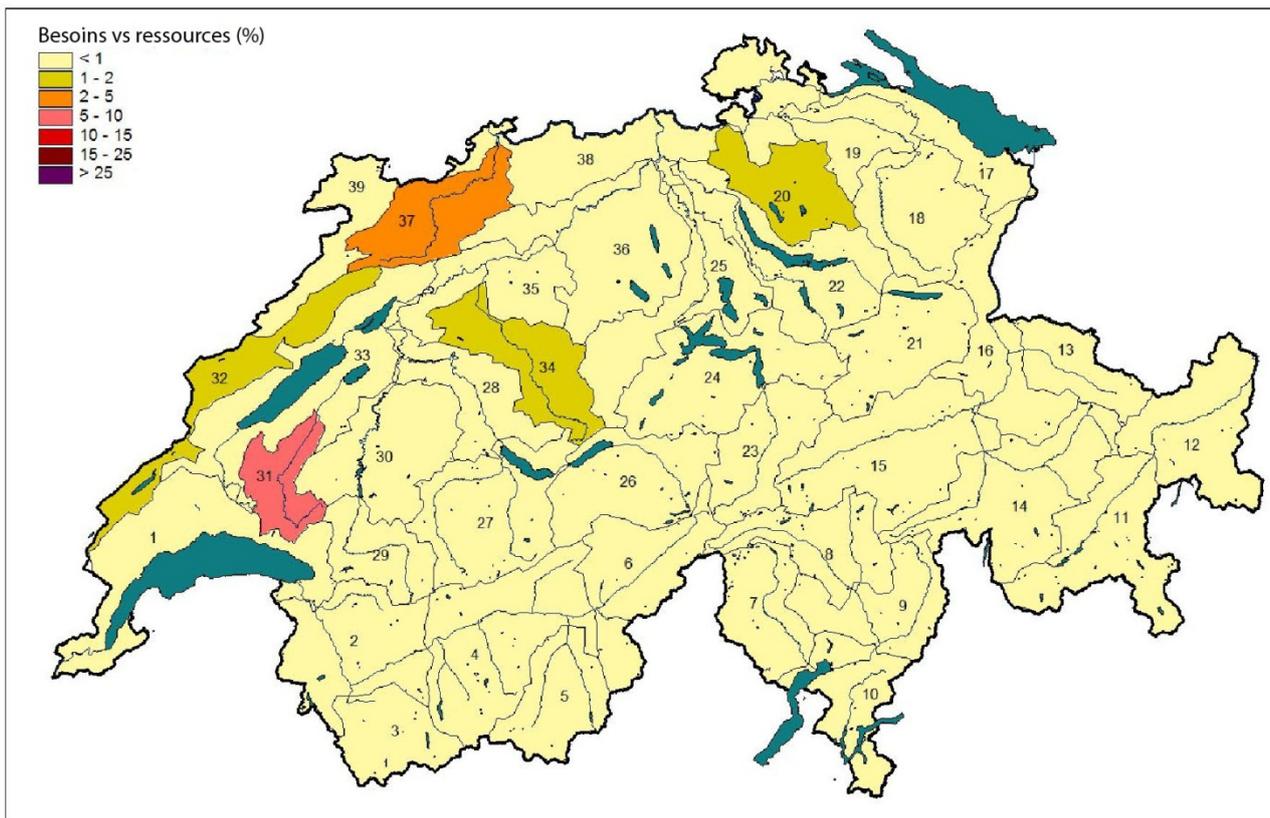


Figure 9: Répartition du rapport entre les besoins d'irrigation et les ressources disponibles (volume de débit) durant les mois d'été (JJA) de la période 1981 à 2010 (avec numérotation des régions)

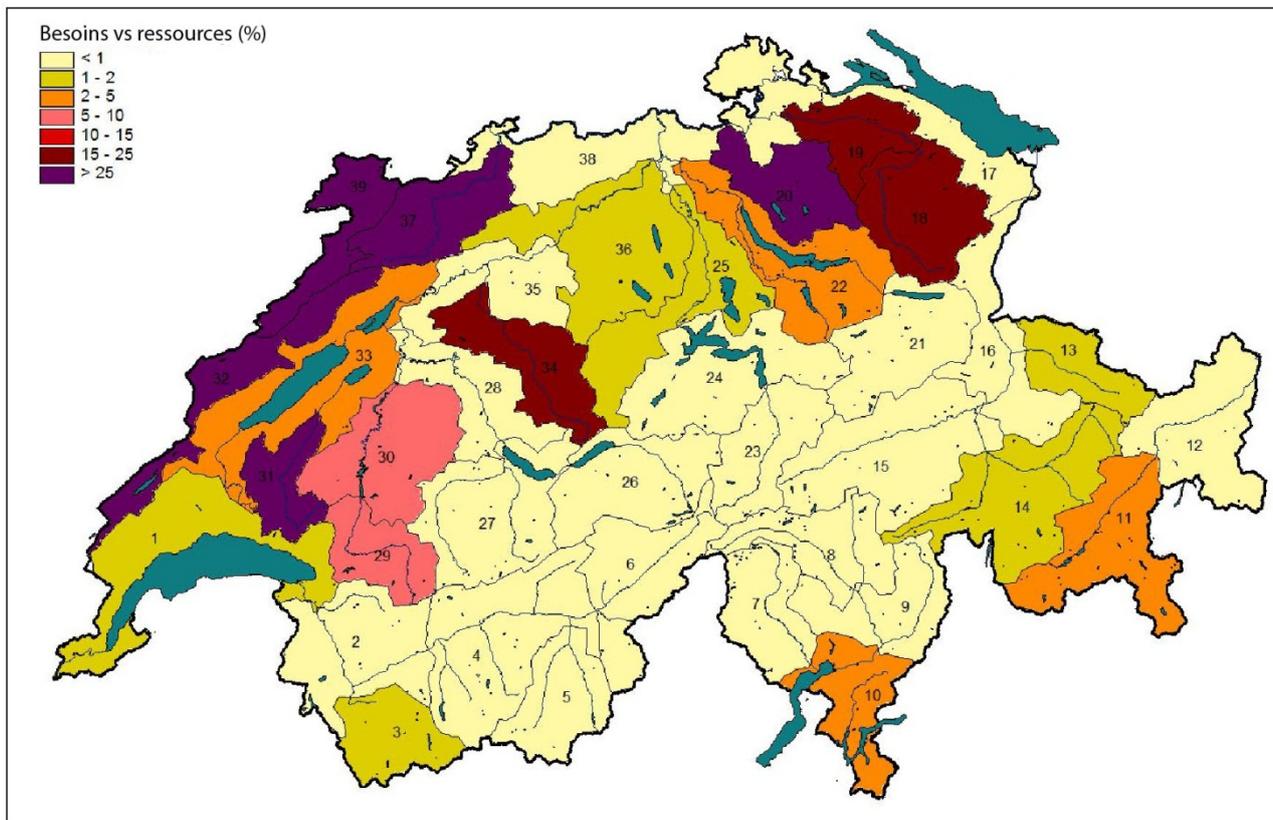


Figure 10: Répartition régionale du rapport entre les besoins d'irrigation et les ressources disponibles (volume de débit) en été (JJA) de l'année 2003 (avec numérotation des régions)

Il faut savoir que la situation dans les années extrêmes dépend largement du régime de débit des cours d'eau observés. Les années de faibles précipitations, l'eau disponible pour l'irrigation dans les régions pluvio-nivales est nettement moindre que celle des régions nivo-glaciaires. Si l'on considère uniquement les besoins, la différenciation spatiale n'est pas la même, comme le montre la carte des intensités d'irrigation (m³/ha) pour l'année de sécheresse 2003 (fig. 11). Il apparaît clairement que les intensités les plus élevées (quantités d'eau d'irrigation par hectare de surface agricole) se rencontrent à la fois dans les régions avec des ressources importantes en eau et dans les régions avec de faibles ressources.

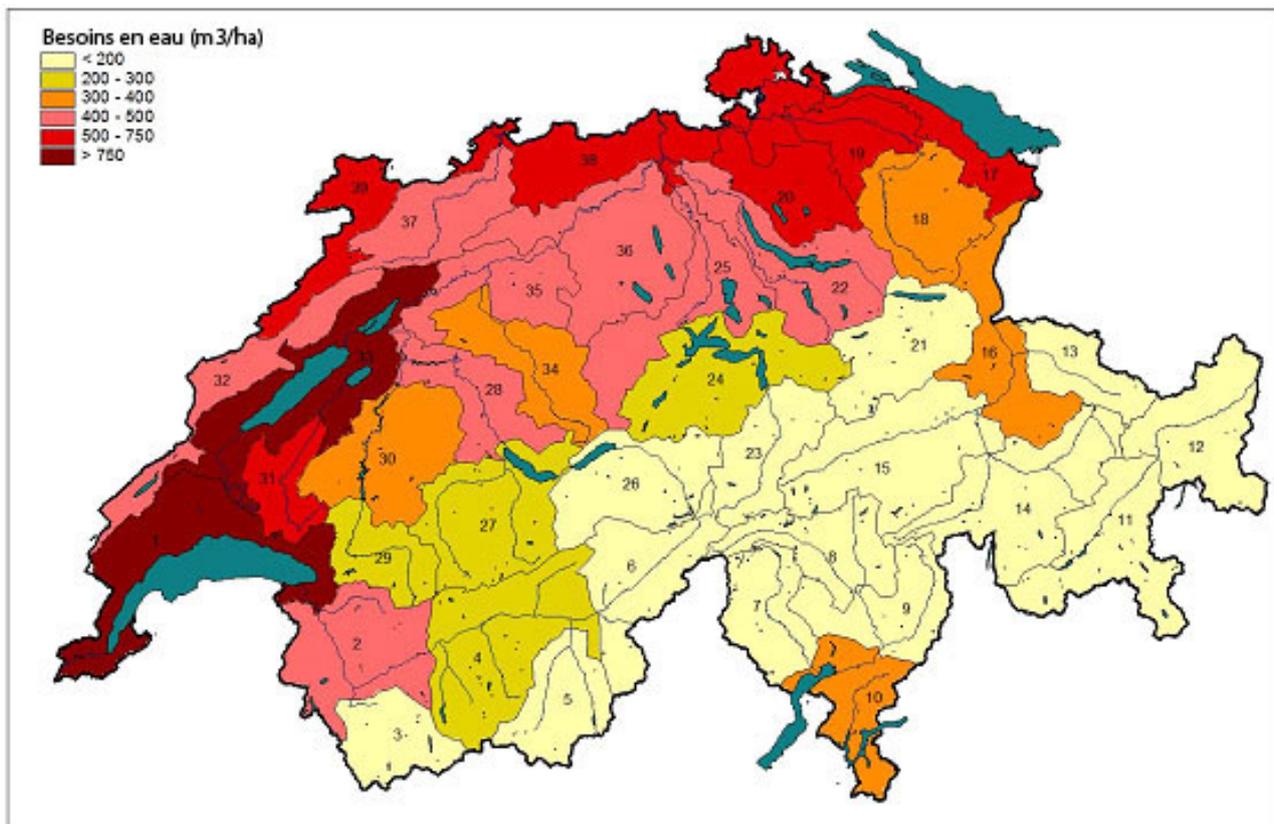


Figure 11: Répartition régionale des besoins d'irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse ; calculs effectués pour l'année de sécheresse 2003 (avec numérotation des régions)

4. Définition et étalonnage des zones sensibles

4.1. Définition

La répartition régionale des besoins d'irrigation indique que plusieurs régions présentent un potentiel de risque accru en ce qui concerne l'approvisionnement en eau de l'agriculture. Des simulations et des analyses plus approfondies ont donc été réalisées pour ces zones sensibles ou „hotspots“. Pour ce faire, on a notamment estimé et comparé la situation des besoins et des ressources dans les conditions climatiques futures (jusqu'en 2050) (cf. chapitre 1).

La figure 12 présente les zones sensibles choisies et leur situation géographique. Deux zones (Emmental et région de la Birse) ont été reprises quasiment sans modification de l'ancien masque des régions (cf. figure 3). Les trois autres zones sensibles (région de la Thur, vallée du Glatt et de la Töss et région de Broye-Mentue) ont par contre subi une extension de leur territoire. Les régions de la Thur et de la Töss incluent désormais les estuaires. La région de Broye-Mentue quant à elle, comprend en plus de l'ancienne région les secteurs des affluents des lacs de Morat et de Neuchâtel.

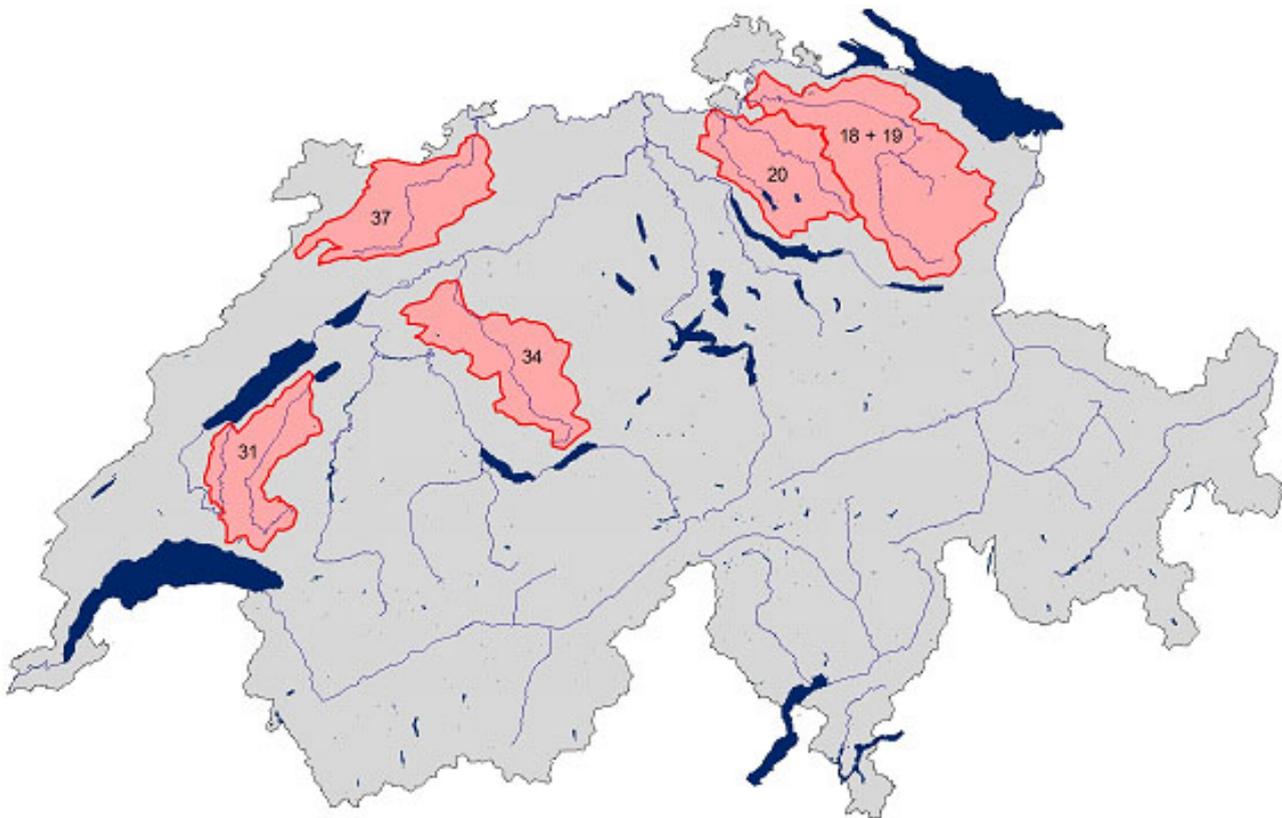


Figure 12: Situation géographique des zones sensibles sélectionnées ([18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birse)

Le tableau 7 représente la part de surfaces agricoles des zones sensibles. La part de surface agricole utile dans la surface totale est en moyenne de 52 % dans les zones sélectionnées, sachant que les prairies (54 %) dominent par rapport aux grandes cultures (43 %) (3 % d'arboriculture).

Tableau 7: Pourcentage de surface agricole (SA) dans les zones sensibles: [18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birse

Région		Thur	Glatt-Töss	Broye-Mentue	Emme	Birse
Surface totale	[km ²]	1758	862	755	939	911
Part de SA (rel.)	[%]	57	42	67	52	42
Part de SA (abs.)	[ha]	100 600	35 800	50 600	49 100	38 200
Grandes cultures	[ha]	36 100	18 400	35 000	17 800	10 500
Prairies	[ha]	60 300	16 200	14 900	30 500	27 000
Arboriculture	[ha]	4200	1200	700	800	700

4.2. Structure et étalonnage du modèle pour les zones sensibles

Pour certaines des zones sensibles sélectionnées (Thur, Emme et Broye), il existait déjà des applications étalonnées du modèle (cf. chapitre 2). Toutefois, pour la majorité des régions fluviales considérées (Glatt, Töss, Mentue et Birse), il a fallu mettre en place et étalonner de nouveaux modèles. Ces travaux sont très laborieux. Ils doivent être effectués séparément pour chaque modèle et comportent les phases suivantes:

- Recueil, analyse et traitement des données nécessaires au modèle:
 - données spatiales, p. ex. répartition des altitudes, des types d'exploitation, caractéristiques des sols
 - données temporelles (séries de mesures météorologiques et hydrologiques de plusieurs années provenant de stations sélectionnées)
- Configuration du modèle (élaboration de modèles partiels et paramétrage)
- Etalonnage et validation du modèle
- Réalisation de la simulation longue durée (1981–2010)

Les calibrations spatiales du modèle se sont appuyées sur des simulations continues du régime hydrique et du débit pendant plusieurs années en tentant notamment de reproduire le mieux possible les débits faibles et moyens. Dans certains cas, il a été possible de transférer les paramètres des applications des régions testées aux régions cibles. Il a cependant toujours fallu faire des ajustements pour certains paramètres.

Les résultats des étalonnages du modèle montrent que les débits mesurés correspondent bien aux débits simulés. L'efficacité logarithmique Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe 1979) qui a servi de référence pour évaluer la qualité de la simulation des débits est comprise entre 0,70 et 0,85 dans les régions cibles (pour la période 1981–2010) et confirme que le modèle utilisé est en mesure de simuler avec une précision adéquate les différents bassins versants et leurs débits. Les débits simulés sur plusieurs années avaient un volume qui correspondait relativement bien au volume mesuré ($\Delta Q < 3\%$; fig. 13). De légères surestimations du volume de débit simulé ($\Delta Q < 10\%$) ont été relevées dans la région de Mentue, elles étaient plus importantes ($\Delta Q > 10\%$) pour la région de la Birse. Les écarts constatés dans la région de la Birse sont probablement dus à l'influence du Karst. Ce dernier domine le réseau hydrologique notamment dans les parties supérieures et centrales de cette région. Il est possible que des portions significatives des cours d'eau soient déviées dans les régions voisines de manière souterraine par le système karstique. Le modèle hydrologique de la région de la Birse n'a pas pris en compte de telles hypothèses. Dans la région

de l'Emme, on observe une nette surestimation pendant l'été (fig. 13). Elle pourrait s'expliquer par des captages non pris en compte dans le cours inférieur du fleuve. Au niveau de la station de jaugeage de la région de l'Emme se trouve un canal de dérivation (Gerlafingen) dont l'influence est apparemment accrue en été.

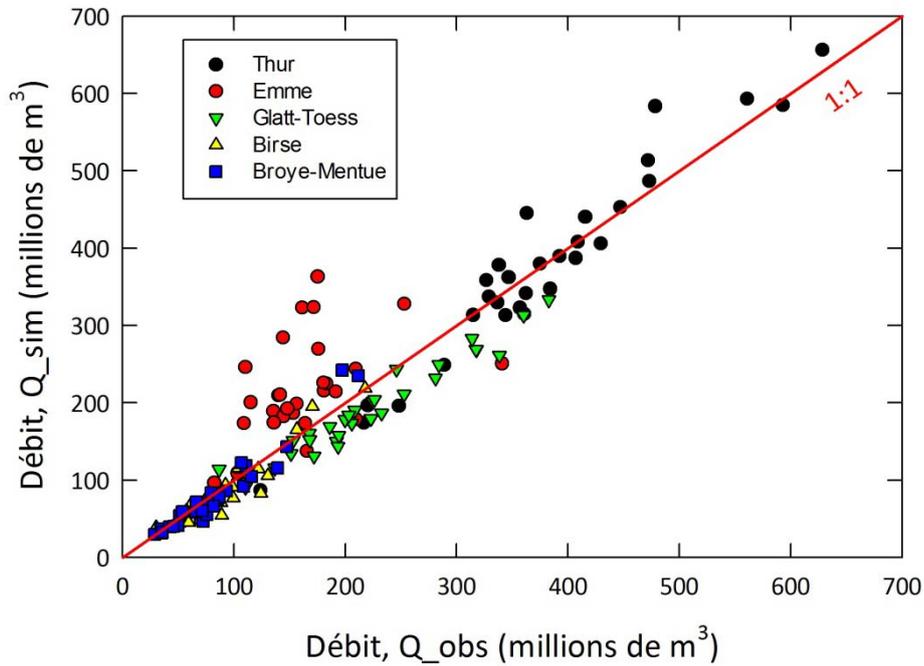


Figure 13: Comparaison des débits observés et simulés dans les régions sélectionnées pendant les mois d'été (JJA)

5. Scénarios climatiques

5.1. Point de départ et élaboration

Pour les zones sensibles, le cahier des charges prévoyait des calculs pour les conditions climatiques actuelles et futures (période allant jusqu'en 2050).

Dans le cadre de la discussion sur le changement climatique, les débats portent essentiellement sur trois scénarios d'émissions différents. Deux scénarios supposent une nouvelle augmentation des émissions de gaz à effet de serre (A2 et A1B). Un troisième scénario, aussi appelé scénario de stabilisation climatique, prévoit une baisse des émissions de 50 % jusqu'en 2050 (RCP3PD). Les courbes d'émissions associées à ces trois scénarios sont représentées à la figure 14. Le scénario d'émissions A1B et ses répercussions liées au climat sont représentés dans le cadre de cette étude. Ce scénario part d'une utilisation équilibrée des sources d'énergie d'origine fossiles ou non. Il décrit en outre une forte croissance économique, un pic global de la population au milieu du siècle actuel et un rapide progrès technologique (Nakicenovic & Swart 2000).

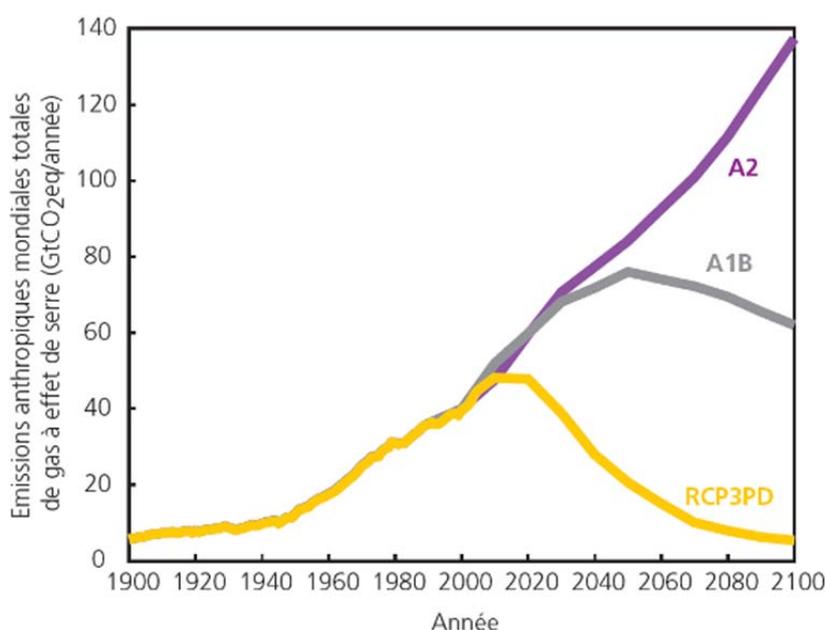


Figure 14: Scénarios d'émissions liés au changement climatique en Suisse (CH2011 2011)

Le projet européen de recherche sur le climat, ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell 2009) a calculé et évalué un grand nombre de modèles du climat européen à l'avenir en se basant sur le scénario A1B. Plus de trente combinaisons de modèles différentes ont été utilisées, c'est-à-dire des chaînes de modèles composées d'un modèle climatique global (GCM) et de modèles climatiques régionaux associés (RCM) (plus d'informations sous: <http://ensemblesr3.dmi.dk/>; cf. également Christensen *et al.* 2010). Les projections climatiques de deux de ces chaînes de modèles employées (Ensemble Members) font l'objet des études décrites ci-après.

La simulation des principaux paramètres dans les futures conditions climatiques a été réalisée par P. Calanca (Agroscope ART) sur la base de deux scénarios climatiques régionaux pour la période de 2036 à 2065. Pour la Suisse, ces deux séries de modèles fournissent la limite supérieure (scénario « extrême ») et

la limite inférieure (scénario « tempéré ») des évolutions climatiques possibles résultant des scénarios ENSEMBLES.

- Modèle climatique de l'ETH Zurich: **ETHZ-CLM** (ci-après ETHZ); => à dominante GCM: HadCM3Q0 avec scénario A1B, RCM: CLM, résolution RCM: 25 km
- Modèle climatique du SMHI (Institut météorologique et hydrologique suédois). **SMHIRCA-BCM** (ci-après SMHI); => à dominante GCM: BCM avec scénario A1B, RCM: RCA, résolution RCM: 25 km

Les scénarios fournissaient des valeurs Delta mensuelles moyennes (= écart par rapport aux valeurs de référence) pour la température, les précipitations et l'ensoleillement. Avant de les utiliser pour les calculs dans les modèles hydrologiques, les résultats des RCMs ont d'abord été soumis à un filtrage (lissage) (Moving Windows pendant trois mois avec pondération de: 0,25, 0,50 et 0,25), pour éviter les éventuelles irrégularités des résultats non filtrés (données brutes).

5.2. Scénarios climatiques pour les régions sélectionnées

Les figures 15 à 19 présentent les fluctuations de paramètres climatiques sélectionnés, exprimés en moyenne mensuelle sur l'année pour la période de référence. Ces figures illustrent l'ampleur du changement climatique, particulièrement importante pour les calculs ultérieurs. Ces fluctuations se réfèrent à la période 2036 à 2065 et représentent les changements attendus pour 2050.

Dans l'ensemble, on constate qu'avec le scénario ETHZ, les étés sont nettement plus chauds et plus secs, ce qui est marqué par la baisse des précipitations, ainsi que par la hausse des phases de sécheresse et de rayonnement global (resp. évaporation). Avec le scénario SMHI, les tendances sont similaires, mais nettement moins prononcées. Les changements les plus importants avec le scénario ETHZ ont été calculés pour les régions Broye-Mentue et Birse.

Comme on pouvait s'y attendre, c'est avec le scénario ETHZ que le signal des fluctuations de températures pronostiquées est le plus fort (fig. 15). L'augmentation moyenne des températures mensuelles peut aller jusqu'à 3,8 °C suivant la zone sensible. Les hausses les plus élevées ont été calculées en août. Avec le scénario SMHI au contraire, les hausses de températures les plus marquées ont lieu en décembre. La température saisonnière moyenne augmente d'environ 2,6 °C selon le scénario ETHZ; et d'environ 1,2 °C selon le scénario SMHI. Durant les mois d'été (JJA), on enregistre une différence de température moyenne de 1,7 °C entre les scénarios.

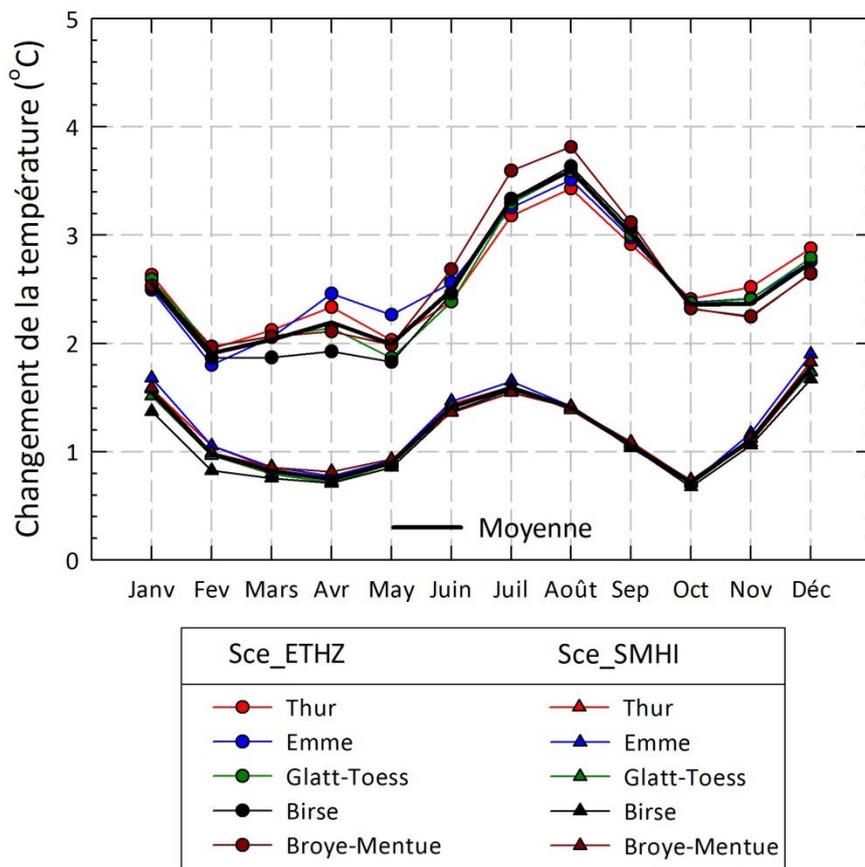


Figure 15: Moyenne mensuelle de la variation de température attendue dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.

Les projections réalisées avec le scénario ETHZ indiquent une nette baisse du volume des précipitations durant les mois d'été en 2050 (fig. 16). Suivant la région, il faut s'attendre à une diminution des précipitations de 20 à 30 % durant cette période, avec des maxima en juillet de l'ordre de -30 % (ETHZ) pour les régions de Broye-Mentue et de Birse. Sur l'ensemble des régions sensibles, le recul pronostiqué est en moyenne de 22 % (pour JJA). Par comparaison, la baisse moyenne des précipitations en été avec le scénario SMHI est nettement moins marquée (-8 %). Avec le scénario SMHI, la variation annuelle des précipitations attendue indique une forte augmentation du volume des pluies en dehors de la période estivale. À l'échelle annuelle, le scénario SMHI pronostique une légère hausse des précipitations (+4 %) alors que le scénario ETHZ, lui, prévoit une baisse moyenne annuelle de 8 %.

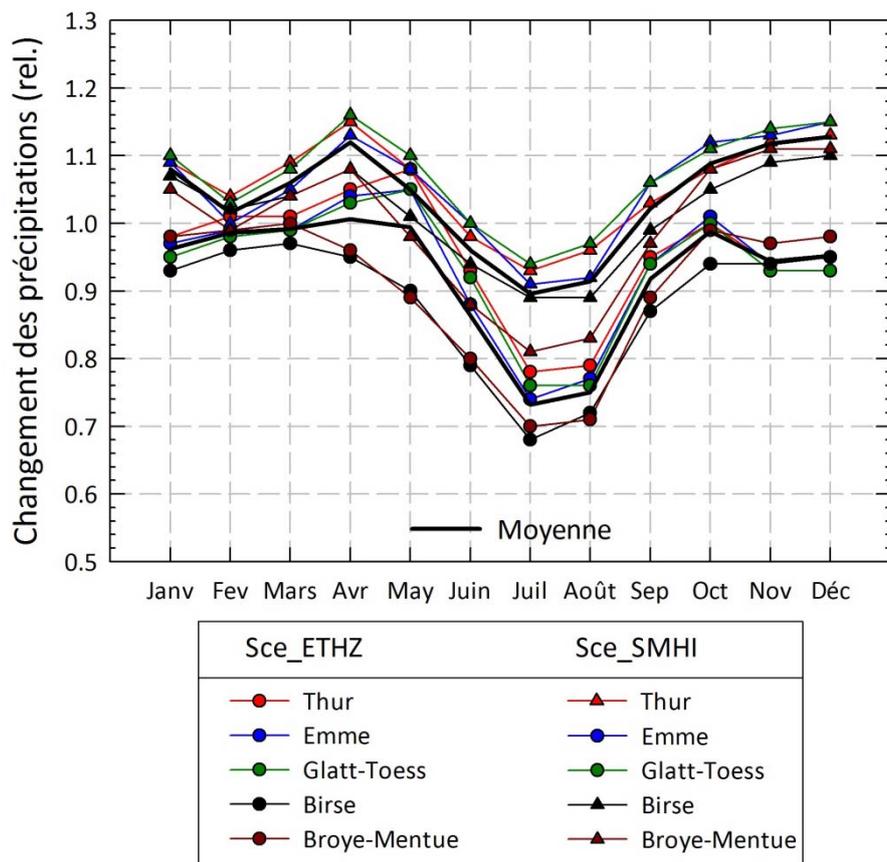


Figure 16: Moyenne mensuelle de la variation attendue des précipitations dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.

Les pronostics relatifs à la variation du rayonnement sont également des résultats importants pour le calcul des besoins en eau d'irrigation dans les conditions climatiques futures. Les deux scénarios sont partis du principe que le rayonnement augmenterait durant les mois d'été, à noter que l'augmentation est largement plus prononcée avec le scénario ETHZ (fig. 17). Les deux scénarios s'accordent pour pronostiquer une réduction de l'ensoleillement en hiver et au printemps.

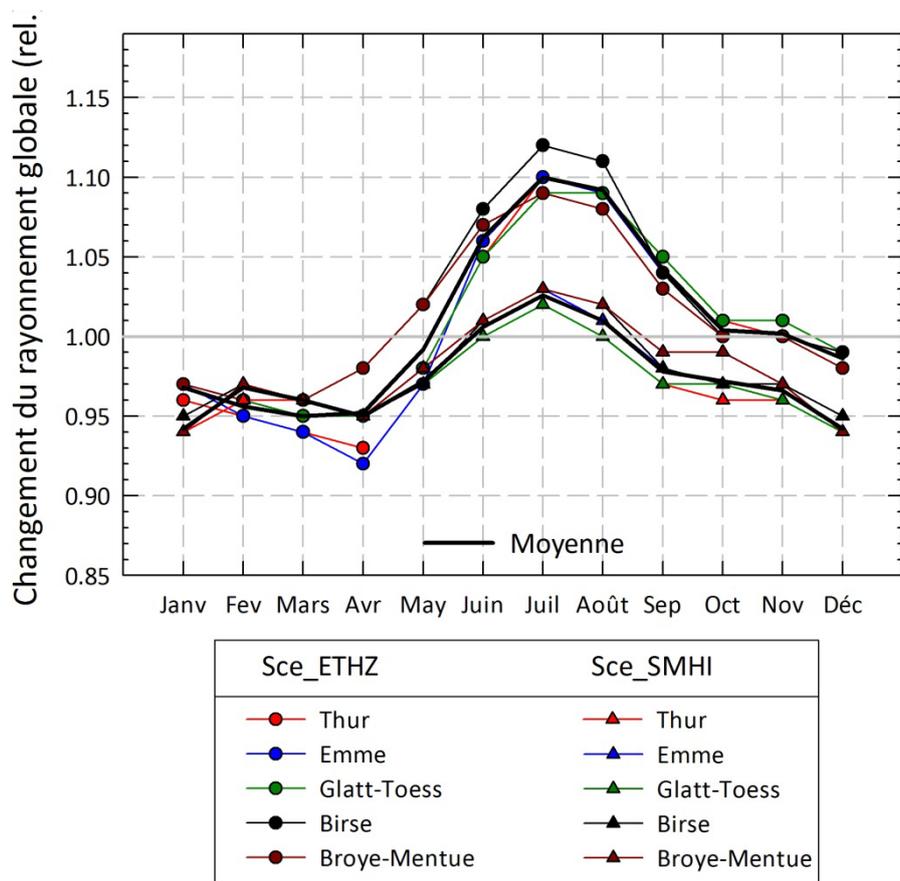


Figure 17: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue du rayonnement global dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.

Ce qui est intéressant, ce ne sont pas seulement les fluctuations des valeurs moyennes de températures et de précipitations, mais aussi les variations de durée des « Dry-Spells » (phases sèches sans précipitations appréciables) et des « Wet-Spells » (phases humides avec jours de précipitations). Il faut cependant noter à propos de ces valeurs que les données initiales provenant des modèles climatiques régionaux sont encore plus incertaines que celles des valeurs moyennes de températures et de précipitations.

Les tendances représentées montrent que le scénario ETHZ prévoit une augmentation des phases de sécheresse en été de 20 à 30 % dans toutes les régions, tandis que le scénario SMHI pronostique une faible baisse en été avec des différences notables entre les régions et une forte baisse au printemps (fig. 18). Durant les mois d'hiver, ces paramètres augmentent avec les deux scénarios.

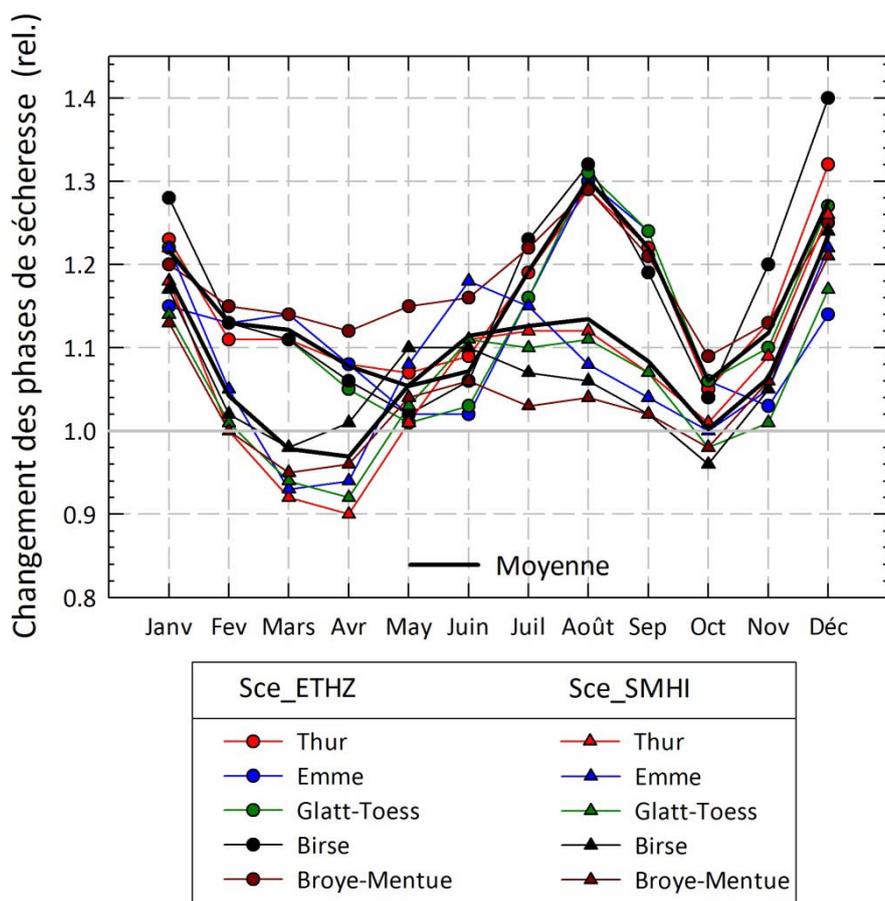


Figure 18: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue de la durée des phases de sécheresse dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.

Dans le cas des phases humides, la situation est inverse : la baisse de ces phases en été est claire pour le scénario ETHZ, tandis qu'avec le scénario SMHI, elle est peu marquée et présente une ampleur différente suivant les régions (fig. 19).

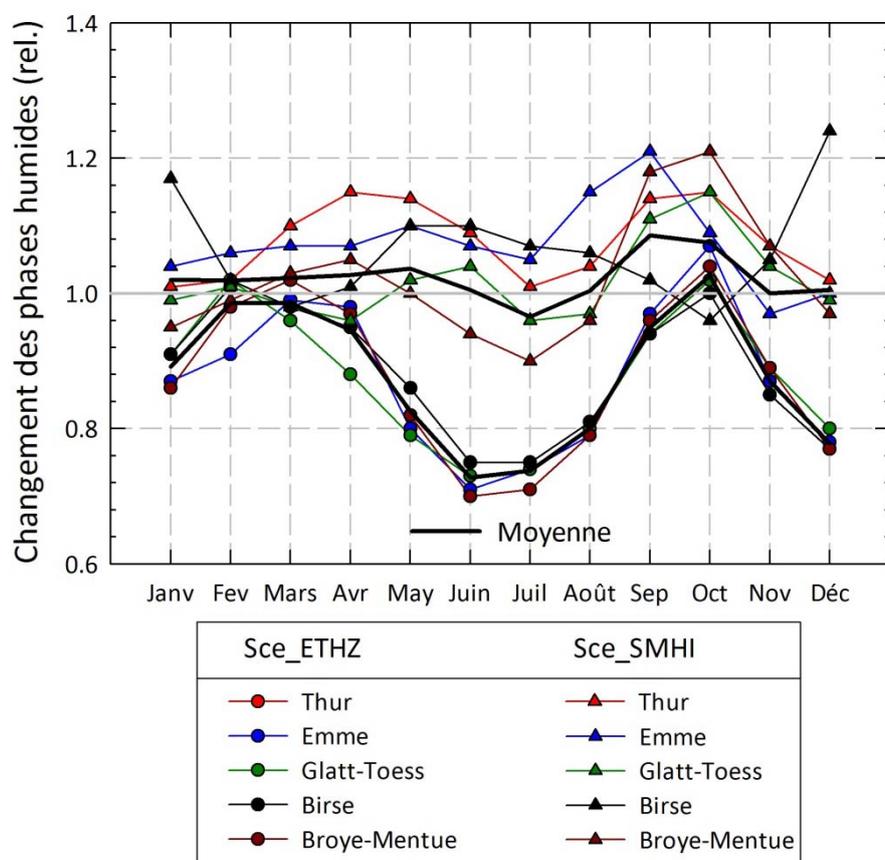


Figure 19: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue de la durée des phases humides dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.

6. Résultats des besoins et ressources en eau dans les régions sensibles

6.1. Besoins en eau d'irrigation

Les besoins potentiels en eau d'irrigation (sans tenir compte de l'efficacité de l'irrigation), c'est-à-dire la quantité d'eau potentiellement nécessaire pour éviter les pertes de récoltes, sont présentés globalement dans la figure 20 pour les régions sélectionnées. Pour la période de référence, les valeurs médianes sont comprises entre 1,2 (Thur) et 5,4, (Broye-Mentue). Avec le scénario « extrême » (ETHZ), elles sont multipliées par 4, voire par 5 et plus, la région de la Birse affichant la hausse la plus forte. Avec le scénario « tempéré », les besoins sont au maximum 2,5 fois plus élevés. C'est la région de Broye-Mentue qui affiche la hausse relative la plus faible avec les deux scénarios.

Les valeurs extrêmes en dehors du quantile des 95 % sont également intéressantes. Les maxima sont environ deux fois plus élevés que les maxima de la période de référence. Les valeurs (médianes et extrêmes) du scénario « tempéré » sont également plus élevées que celles de la période de référence, mais seulement légèrement plus.

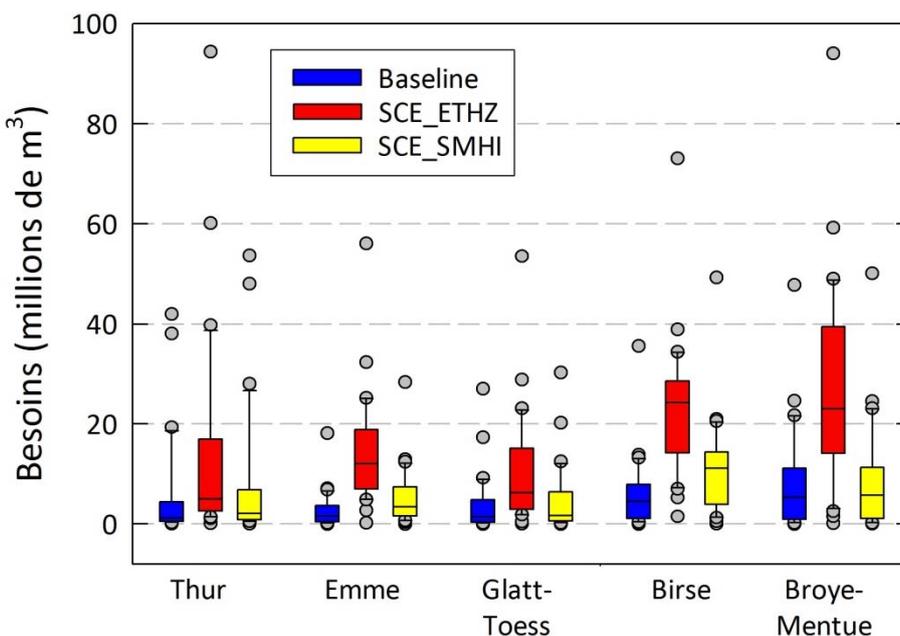


Figure 20: Besoins moyens en eau d'irrigation en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points).

Les données de la figure 20 dépendent de la taille des régions. Le tableau 8 indique les besoins toutes catégories d'utilisation des sols confondus par rapport à la surface agricole utile totale dans les différentes régions. Ils se situent au maximum autour de 100 mm dans la région de la Birse et de Broye-Mentue pour la période de référence et autour de 200 mm avec le scénario ETHZ. Avec le scénario « extrême », les maxima sont multipliés environ par 2 dans toutes les régions.

Tableau 8: Pourcentages de surfaces agricoles (SA) dans les régions sensibles et besoins en eau proportionnels à la surface pour JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birse, [31] Broye-Mentue,

Région		Thur	Emme	Glatt-Töss	Birse	Broye-Mentue
SAU	[ha]	100 600	49 100	35 800	38 200	50 600
<i>Période de référence</i>						
Médiane	[mm]	1	3	4	12	11
Maximum (2003)	[mm]	42	37	75	93	94
<i>Scénario SMHI 2050</i>						
Médiane	[mm]	2	7	5	29	11
Maximum	[mm]	54	56	84	129	99
<i>Scénario ETHZ 2050</i>						
Médiane	[mm]	5	25	17	63	46
Maximum	[mm]	94	114	150	191	186

Les résultats de la simulation des ressources (débit régional) sont présentés dans la figure 21. Pour la période de référence, on constate une variabilité significative d'une année sur l'autre, qui se maintient largement dans les simulations avec les scénarios climatiques. Il est intéressant de noter que les valeurs extrêmement basses dans les simulations – même dans le cas du scénario « extrême » – ne se situent que légèrement en dessous des débits les plus bas de la période de référence, particulièrement influencés par l'année 2003. Par contre, les débits maximaux et les médianes sont nettement plus bas que dans la période de référence. Cela signifie que les débits dans les simulations sont généralement plus bas et aussi que les débits maximaux ne sont plus atteints en été.

Par rapport aux valeurs médianes de la période de référence, le débit baisse dans les régions sélectionnées. Le tableau 9 présente les pourcentages de baisse. En moyenne de toutes les régions, ils sont de l'ordre de 43 % pour le scénario ETHZ « extrême » et de 12 % pour le scénario SMHI « tempéré ».

Tableau 9: Variation relative du volume de débit simulé par rapport à la période de référence pour JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birse, [31] Broye-Mentue.

Région		Thur	Emme	Glatt-Töss	Birse	Broye-Mentue
ETHZ 2050	[%]	34,1	52,3	34,5	51,2	39,6
SMHI 2050	[%]	10,1	19,8	3,5	24,4	3,7

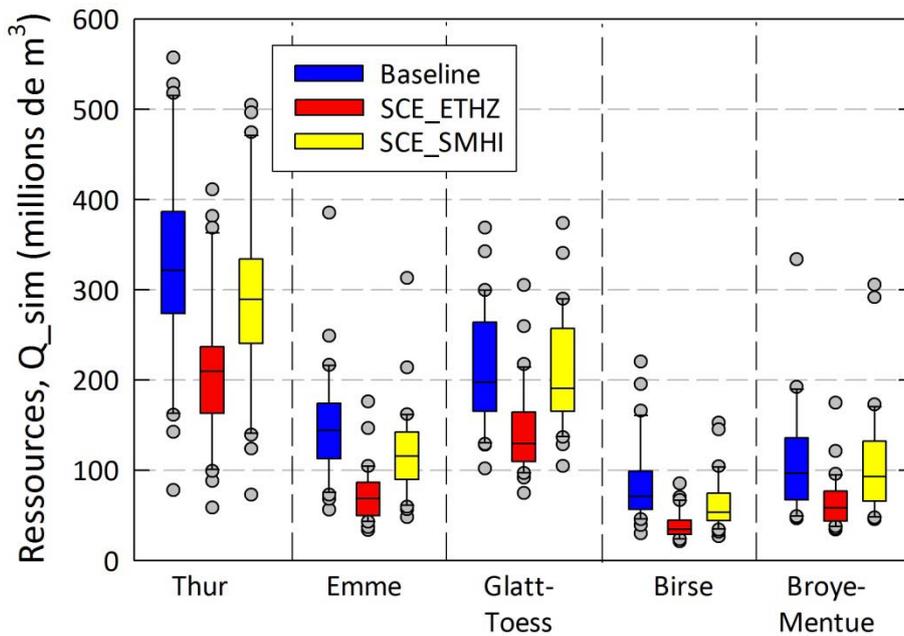


Figure 21: Ressources moyennes en eau d'irrigation (volume de débit) en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points).

La majeure partie des calculs concerne le rapport entre besoins et ressources. Si ce rapport dépasse 100 %, cela signifie que les besoins potentiels en eau d'irrigation ne peuvent plus être couverts par l'eau prélevée dans les cours d'eau. Ces calculs ne tiennent pas compte du fait qu'une quantité minimale d'eau résiduelle doit être respectée pour chaque cours d'eau, ce qui veut dire que la quantité d'eau disponible en réalité est plus faible que celle qui a servi de base aux calculs. Par ailleurs, les besoins calculés représentent une limite supérieure, qui n'est pratiquement jamais atteinte en pratique, car toutes les cultures ne doivent pas forcément être irriguées. Par conséquent, les résultats ne doivent pas être considérés dans l'absolu mais plutôt comme une sorte d'analyse de risques.

Les résultats de la figure 22 montrent que la majorité des années (valeur médiane), la barre des 100 % n'est pas dépassée quelle que soit la région, pas même dans les simulations avec les scénarios climatiques. On compte certaines années critiques durant la période de référence dans les régions Birse et Broye-Mentue. Elles reflètent la situation en 2003. Dans les simulations avec le scénario « extrême » (ETHZ), la fréquence des dépassements s'accroît considérablement, notamment dans les deux régions mentionnées plus haut. Dans la région Glatt-Töss, les valeurs restent en dessous de la barre des 100 %.

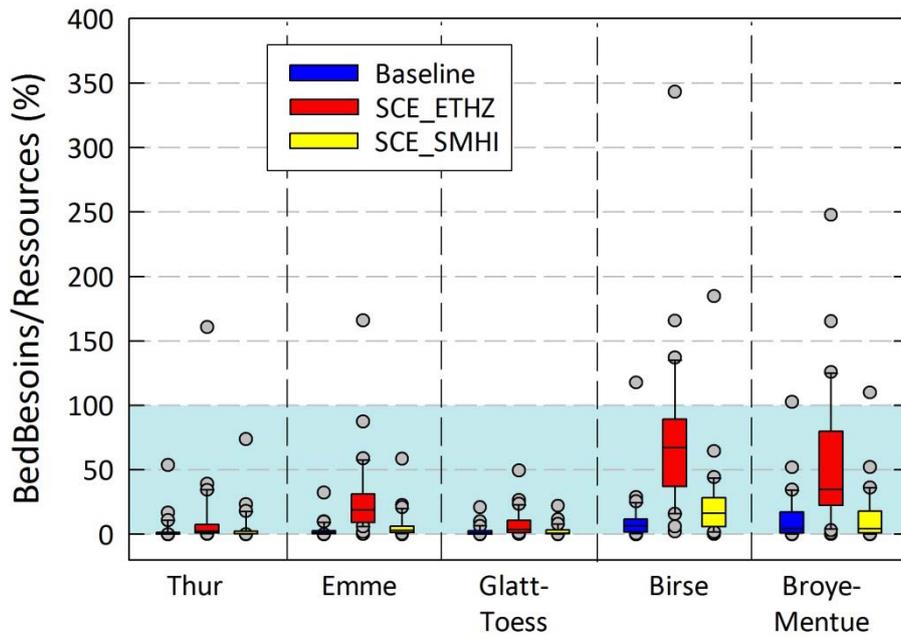


Figure 22: Rapport entre les besoins et les ressources en eau d'irrigation en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points). La section sur fond bleu marque la plage des valeurs inférieures à 100 %.

Sur les trente ans, avec le scénario ETHZ, la barre des 100 % est dépassée une année dans les régions Thur et Emme, jamais dans la région Glatt-Töss – malgré des besoins élevés – et cinq respectivement six fois dans les régions Birse et Broye-Mentue. Ces derniers cas de figure correspondent à des pourcentages de risques de 17 et 20 %.

7. Résumé et évaluation

La présente étude a réalisé des bilans différenciés spatialement et régionalement des besoins potentiels en eau d'irrigation dans l'agriculture. Dans un premier temps, les besoins en eau de plusieurs régions fluviales de Suisse (régions testées) ont été étudiés à l'aide du modèle WaSiM-ETH. Les calculs modélisés ont été différenciés spatialement (500 x 500 mètres) et ont été effectués sous forme de simulations journalières en continu sur la période allant de 1981 à 2010 s'appuyant sur les statistiques les plus récentes de la superficie, lorsqu'elles étaient disponibles.

Les besoins en eau d'irrigation spécifiques aux régions ont ensuite été extrapolés à l'ensemble de la surface agricole suisse à l'aide d'une régression multiple et ont été évalués pour un total de 39 régions différentes (bassins versants). Afin d'identifier les éventuelles régions problématiques, une comparaison a été établie entre les besoins en eau calculés dans les régions et les ressources disponibles. Du fait des limites de disponibilité des données et pour simplifier, on a considéré que les ressources dans les régions étaient représentées par le débit des fleuves (sans prise en compte des lacs et des réservoirs). L'évaluation statistique et graphique des résultats montre que dans les années sèches comme 2003, différentes régions (notamment la région de Broye-Mentue) pourraient avoir des difficultés à couvrir les besoins en eau de l'agriculture même sans tenir compte des pertes potentielles (d'efficacité de l'irrigation = 100 %) et des quantités d'eau résiduelle.

L'étape suivante a consisté à isoler cinq régions dans lesquelles le potentiel de risque était particulièrement élevé et à recalculer leurs besoins après adaptation partielle des limites de leur territoire. Les simulations ont été effectuées à la fois pour la période de référence 1981 à 2010 et pour la période 2036 à 2065. Deux scénarios climatiques ont été appliqués, qui représentent chacun la limite supérieure et la limite inférieure des changements climatiques possibles. Les résultats ont surtout été évalués pour les mois d'été (juin-août), durant lesquels il faut s'attendre aux plus grands conflits. Il ne faut cependant pas perdre de vue que l'eau peut également se faire rare au printemps, comme ce fut le cas par exemple dans certaines régions en 2011.

Les résultats montrent que dans les régions Broye-Mentue et Birse, les besoins risquaient constamment de dépasser les ressources en eau déjà durant la période de référence et que ce risque se multipliait avec le changement climatique. Dans le cas « extrême » (scénario plus chaud et plus sec), ce dépassement se produisait, statistiquement parlant, tous les 5, respectivement 6 ans, ce qui correspond à un risque de 17 à 20 %. L'augmentation des risques dans toutes les régions est due à la hausse du besoin en eau des cultures dans un climat plus chaud et plus ensoleillé, ainsi qu'à la baisse du débit des fleuves suite à une diminution des précipitations.

Du fait de cette recrudescence des risques, il est indispensable de prendre des mesures de précaution dans les régions les plus touchées, afin de minimiser les conflits durant les années extrêmes. Font partie de ces mesures, l'adaptation du mode d'exploitation (entre autres choix des cultures, des variétés, du site, travail du sol) ou des infrastructures (notamment conduites d'amenée) pour puiser de l'eau supplémentaire dans les plus grands réservoirs (lacs, grands fleuves). L'étude approfondie des mesures ne faisait pas partie du présent projet.

Les résultats des calculs sont soumis à différentes restrictions et incertitudes, dont notamment les points suivants:

- Aucune valeur paramétrée spécifique au type de cultures pour le calcul du bilan hydrique et de la gestion de l'irrigation, c'est-à-dire valeurs moyennes pour la description phénologique de la végétation des terres arables, des prairies et des cultures arboricoles;
- Incertitudes relatives aux propriétés pédologiques (déduction des paramètres du modèle à partir de la carte d'aptitude des sols comme unique base cartographique nationale avec informations sur les sols et les sous-sols);
- Incertitudes quant à la simulation du régime hydrique des régions par manque d'informations sur les interventions anthropogènes (p. ex. prélèvements d'eau, exploitation des lacs et des réservoirs);
- Incertitudes relatives aux scénarios climatiques;
- Hypothèses simplifiées dans les simulations basées sur les scénarios (p. ex. aucune prise en compte des modifications futures de l'aspect du paysage telles que la répartition des surfaces agricoles utiles).

Il faut également noter qu'il s'agit de l'estimation des besoins « potentiels » en eau d'irrigation. L'estimation des besoins « actuels » nécessiterait l'emploi de données spécifiques aux cultures et devrait se limiter aux cultures nécessitant une irrigation. Par conséquent, les résultats ne doivent pas être considérés dans l'absolu mais plutôt comme une sorte d'analyse de risques.

En dépit de ces restrictions, les résultats apportent différents éléments qui seront d'une utilité précieuse pour discuter des mesures à prendre dans la gestion des eaux notamment dans l'optique des exigences de l'agriculture.

8. Bibliographie

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2011). *EZGG-CH – Einzugsgebietsgliederung Schweiz*. Produktdokumentation, Bern.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004). *Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz*, Neuchâtel.
- BLW (Bundesamt für Landwirtschaft) (2007). *Stand der Bewässerungen in der Schweiz – Bericht zur Umfrage 2006*, Bern.
- Carsel R.F. & Parrish R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24, S. 755–769.
- CH2011 (2011). *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Hrsg. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate und OcCC, Zürich, 88 S. (ISBN: 978-3-033-03065-7).
- Christensen J.H., Kjellström E., Giorgi F., Lenderink G. & Rummukainen M. (2010). Weight assignment in regional climate models. *Clim Res* 44: 179–194 [doi: 10.3354/cr00916].
- Fuhrer J. (2010). *Abschätzung des Bewässerungsbedarfes in der Schweizer Landwirtschaft*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 26 S.
- Fuhrer J. & Jasper K. (2009). *Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich, 74 S.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Nakicenovic N. & Swart R. (2000). *IPCC Special Report on Emission Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570 pp.
- OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Hrsg.) (2007). *Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*. 173 S.
- Renger D., Bohne K., Facklam M., Harrach T., Riek W., Schäfer W., Wessolek G. & Zacharias S. (2008). *Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte*, Berlin, 51 S.
- Schlichting E. & Blume H.P. (1966). *Bodenkundliches Praktikum*. P. Parey, Hamburg, 209 S.
- Schulla J. (1997). *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*. Zürcher Geographische Schriften 69, ETH Zürich.
- Schulla J. & Jasper K. (2007). *Model description WaSiM-ETH* [verfügbarer Download unter: http://www.wasim.ch/wasim/products/wasim_description.htm].
- SGHL (Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie) & CHy (Hydrologische Kommission) (2011). *Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung: Synthesebericht*. In: *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* Nr. 38, Bern.
- swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004). *RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz*, Wabern.
- van der Linden P. & Mitchell J.F.B. (eds.; 2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, Fitz Roy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 pp.
- Van Genuchten M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44 (5), S. 892–898.

9. Annexe

9.1. A1 Tableaux

	Page
Tableau 1: Part de surface agricole (SA) dans les régions testées.....	9
Tableau 2: Besoins mensuels en eau d'irrigation pour les surfaces agricoles (sans composants partiels) dans les régions testées; moyennes pour la période 1981 à 2010 et pour l'année de sécheresse 2003 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m ³).....	11
Tableau 3: Extrapolation des quantités d'eau d'irrigation spécifiques aux régions à l'ensemble de la surface agricole de la Suisse (tous les chiffres sont indiqués en millions de m ³).....	12
Tableau 4: Indications relatives aux régions sélectionnées (SA: surface agricole).....	14
Tableau 5: Besoins moyens en irrigation par région pour les surfaces agricoles en Suisse dans la période de 1981 à 2010 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m ³).....	17
Tableau 6: Besoins régionaux en irrigation pour les surfaces agricoles en Suisse durant l'année de sécheresse 2003 (tous les chiffres sont indiqués en millions de m ³).....	18
Tableau 7: Pourcentage de surface agricole (SA) dans les zones sensibles: [18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birse.....	24
Tableau 8: Pourcentages de surfaces agricoles (SA) dans les régions sensibles et besoins en eau proportionnels à la surface pour JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birse, [31] Broye-Mentue,	34
Tableau 9: Variation relative du volume de débit simulé par rapport à la période de référence pour JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birse, [31] Broye-Mentue.....	34

9.2. A2 Figures

	Page
Figure 1: Définition de la quantité d'eau d'irrigation en fonction de la transpiration et de la teneur en eau du sol. nFK = capacité utile au champ; DW = eau de drainage ou eau de gravitation ; θ_{WP} = teneur en eau au point de flétrissement ; θ_{FK} = teneur en eau à la capacité au champ ; θ_{sat} = teneur en eau à saturation ; $\Delta\theta$ = besoins en irrigation; HReduDry = valeur indicative de début de stress dû à la sécheresse ; TReduWet = valeur indicative de début de stress dû à l'engorgement (à cause d'une carence en oxygène).	8
Figure 2: Situation des zones d'étude en Suisse (tiré de Fuhrer & Jasper 2009).	9
Figure 3: Etat actuel du relevé des données pour la Statistique de la superficie 2004/09 (Source: Office fédéral de la statistique OFS, www.bfs.admin.ch).....	10
Figure 4: Situation et ID des régions délimitées et stations hygrométriques correspondantes (cercles)	13
Figure 5: Besoins annuels moyens en eau d'irrigation de l'agriculture suisse pour la période 1981 à 2010 (avec numérotation des régions).....	15
Figure 6: Besoins en eau d'irrigation de l'agriculture suisse pour l'année de sécheresse 2003 (avec numérotation des régions)	16
Figure 7: Valeurs mensuelles des besoins en eau d'irrigation et des ressources disponibles (débit) pour les régions choisies, pour la période de 1981 à 2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne).....	19
Figure 8: Rapport entre les besoins et les ressources (JJA) pour tous les bassins versants en moyenne (1981–2010) et pour 2003, classé selon le niveau du rapport moyen (numéros de bassins versants selon tab. 4).....	20
Figure 9: Répartition du rapport entre les besoins d'irrigation et les ressources disponibles (volume de débit) durant les mois d'été (JJA) de la période 1981 à 2010 (avec numérotation des régions)	21

Figure 10: Répartition régionale du rapport entre les besoins d'irrigation et les ressources disponibles (volume de débit) en été (JJA) de l'année 2003 (avec numérotation des régions).....	21
Figure 11: Répartition régionale des besoins d'irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse ; calculs effectués pour l'année de sécheresse 2003 (avec numérotation des régions).....	22
Figure 12: Situation géographique des zones sensibles sélectionnées ([18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birse)	23
Figure 13: Comparaison des débits observés et simulés dans les régions sélectionnées pendant les mois d'été (JJA)	25
Figure 14: Scénarios d'émissions liés au changement climatique en Suisse (CH2011 2011).....	26
Figure 15: Moyenne mensuelle de la variation de température attendue dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.	28
Figure 16: Moyenne mensuelle de la variation attendue des précipitations dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.	29
Figure 17: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue du rayonnement global dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.....	30
Figure 18: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue de la durée des phases de sécheresse dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.....	31
Figure 19: Moyenne mensuelle de la variation relative attendue de la durée des phases humides dans les régions sensibles pour la période 2036 à 2065 sur la base de deux scénarios climatiques.	32
Figure 20: Besoins moyens en eau d'irrigation en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points).	33
Figure 21: Ressources moyennes en eau d'irrigation (volume de débit) en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points).	35
Figure 22: Rapport entre les besoins et les ressources en eau d'irrigation en été (JJA) pour les surfaces agricoles utiles des régions sensibles; résultats de la période de référence 1981 à 2010 et de la période 2036 à 2065 avec l'aide des scénarios climatiques Sce_ETHZ et Sce_SMHI; la figure représente les médianes (quantile 50 %), les quantiles 25/75 % (box), les quantiles 10/90 % (moustaches), et les valeurs extrêmes (points). La section sur fond bleu marque la plage des valeurs inférieures à 100 %.....	36
Figure 23: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 1 à 8; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne).....	42
Figure 24: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 9 à 16; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)	43
Figure 25: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 17 à 24; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)	44
Figure 26: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 25 à 32; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)	45
Figure 27: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 33 à 39; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)	46

9.3. B1 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation

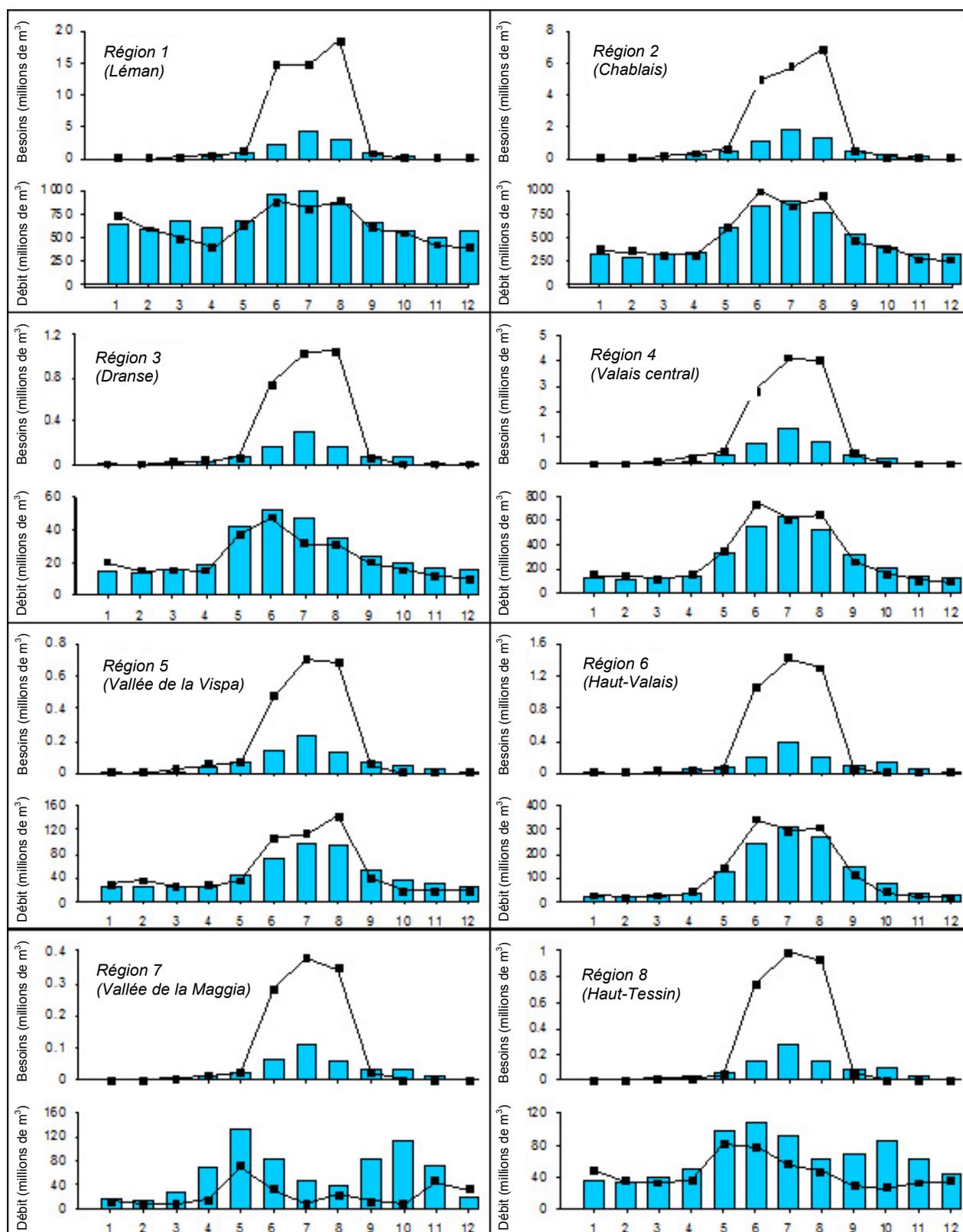


Figure 23: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 1 à 8; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)

9.4. B2 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation

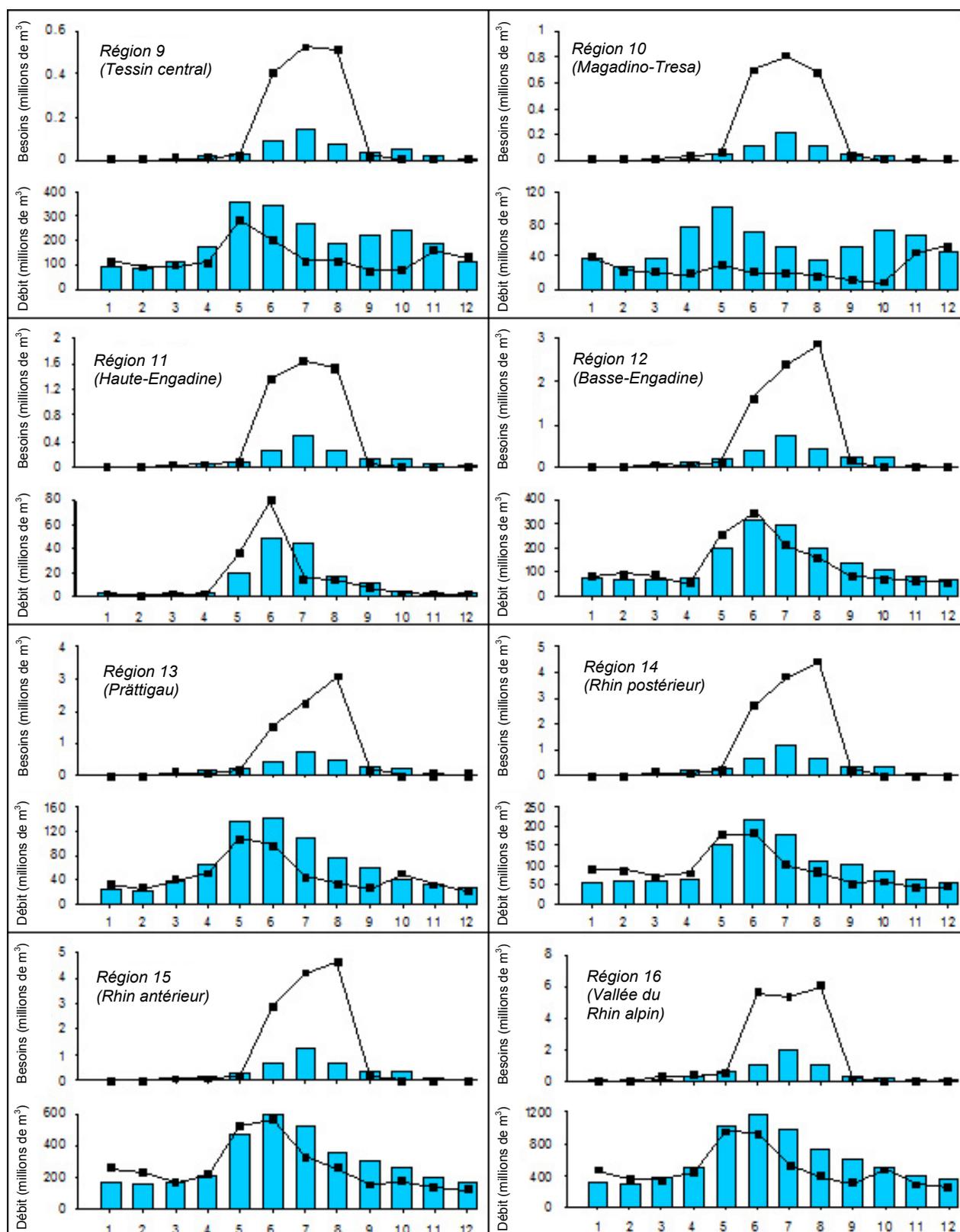


Figure 24: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 9 à 16; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)

9.5. B3 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation

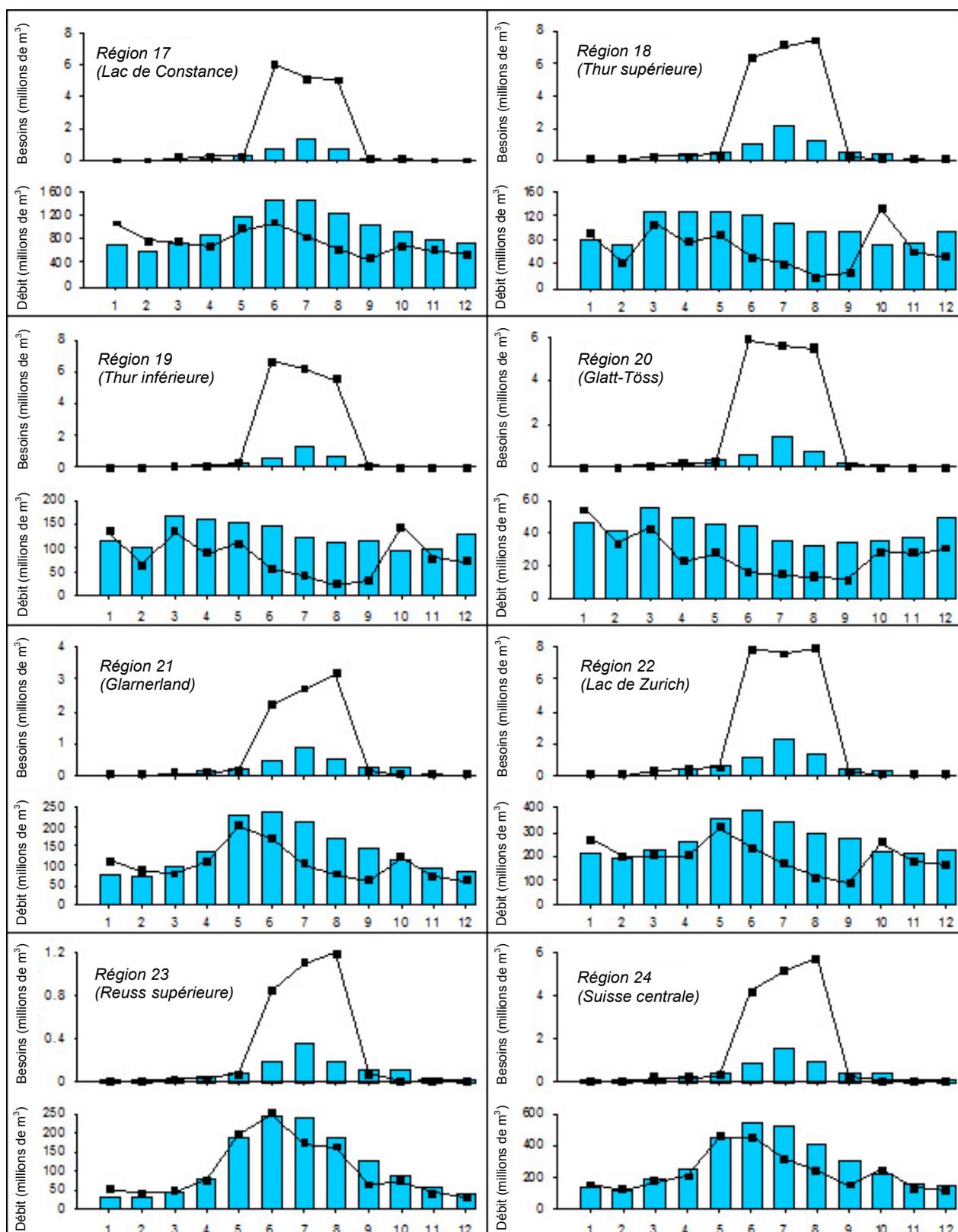


Figure 25: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 17 à 24; pour la période 1981–2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)

9.6. B4 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation

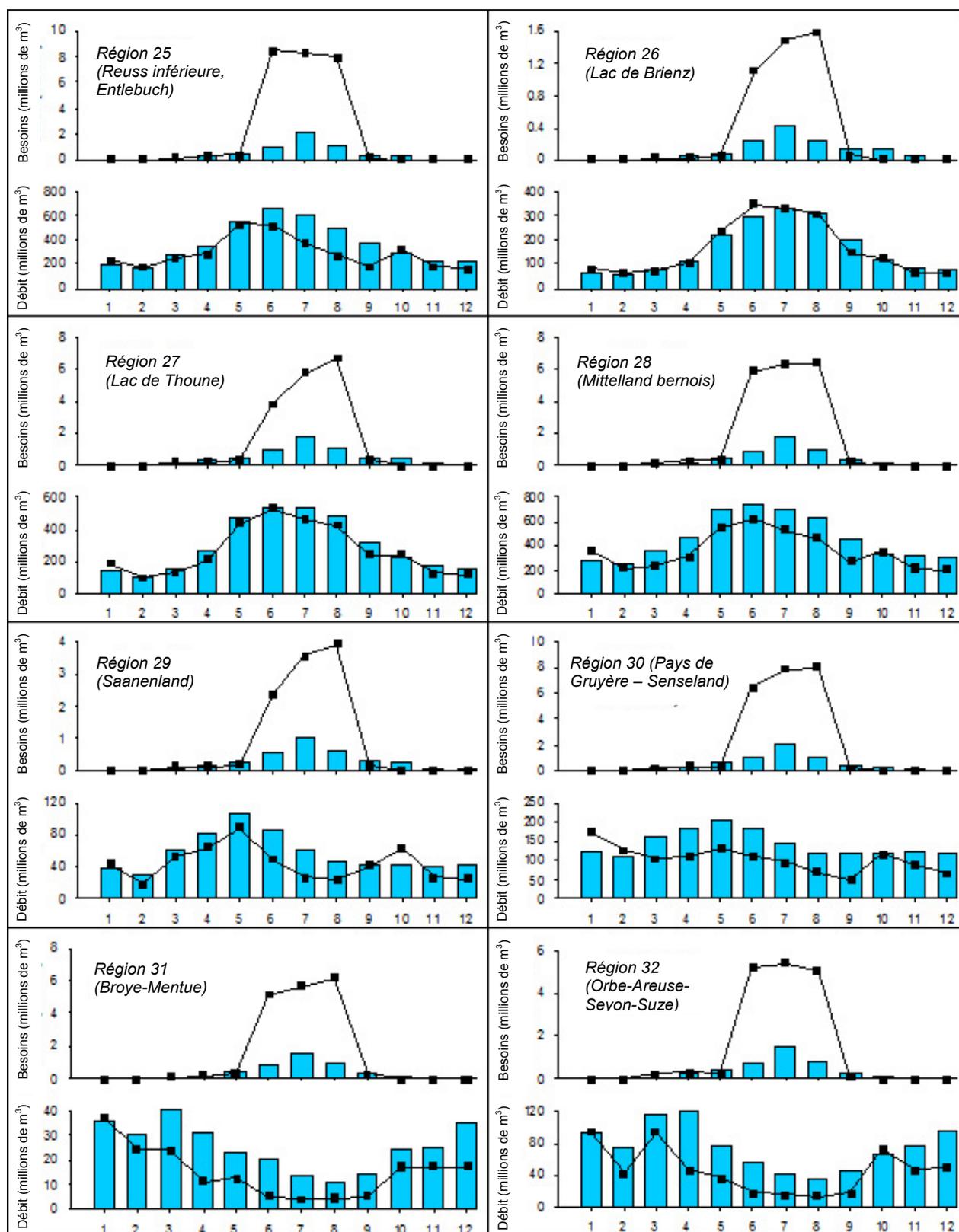


Figure 26: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 25 à 32; pour la période 1981-2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)

9.7. B5 – Comparaison régionale entre ressources et besoins en eau d'irrigation

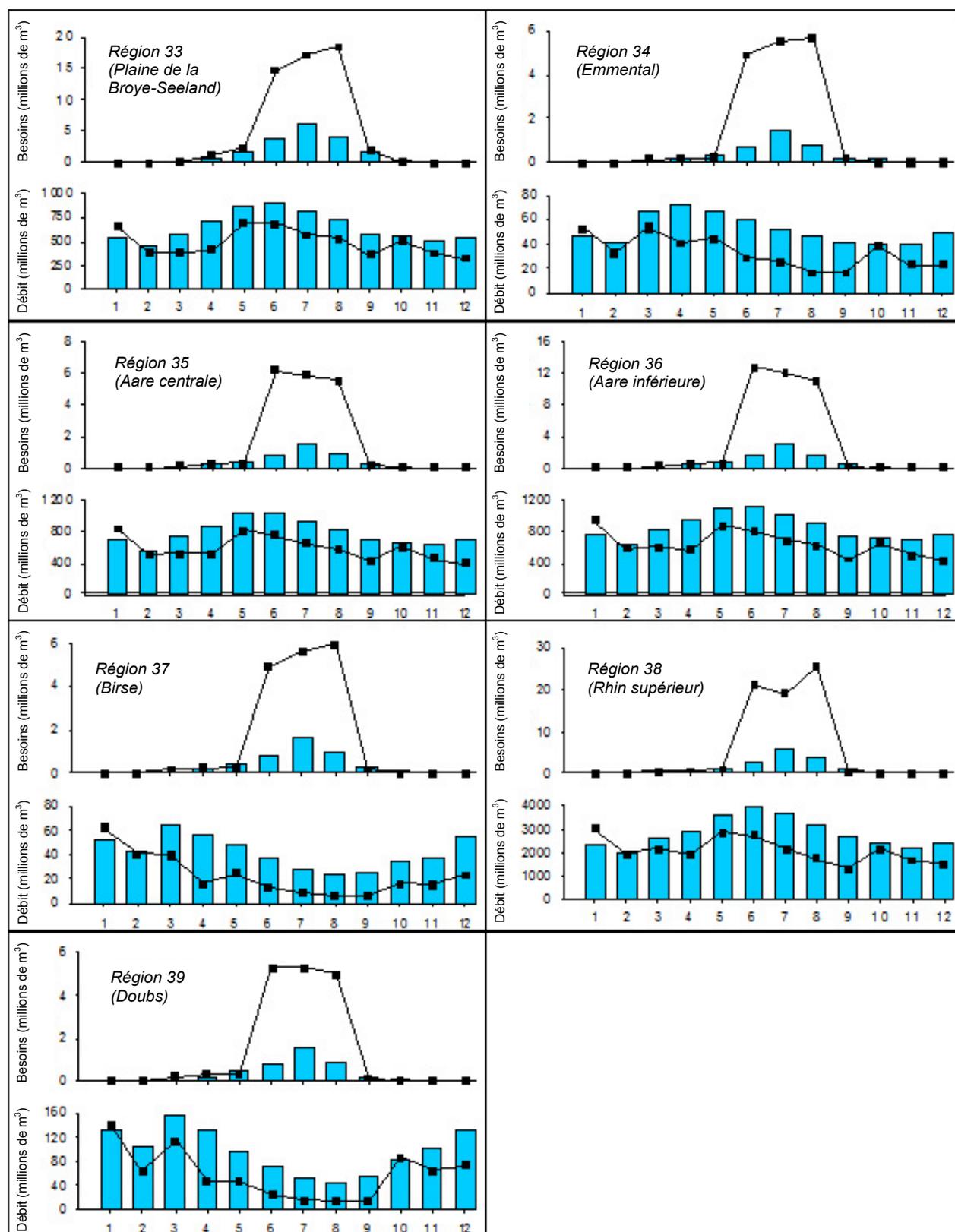


Figure 27: Valeurs mensuelles des besoins et des ressources en eau d'irrigation (débit) pour les régions 33 à 39; pour la période 1981-2010 (rectangles) et pour l'année de sécheresse 2003 (ligne)