



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie DFE

Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Groupe de recherche Hygiène de l'air/climat

Estimation des besoins en irrigation pour l'agriculture suisse

Jürg Fuhrer



**- Rapport final -
8 mars 2010**

Projet : Etude sur les besoins en irrigation en Suisse (BI-CH, partie 2)

Période rapportée : 01.10.2009 – 28.02.2010

Mandant : Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et les cantons BE, LU, FR, AG, VD, VS, GE et ZH représentés par Dr Fritz Zollinger, Office de l'agriculture, Zürich

Mandataire : Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)
Département de recherche Ressources environnementales et agriculture (31)
Groupe de recherche Hygiène de l'air/climat (31.1)

Personne de contact : Prof. Dr Jürg Fuhrer
Tél. : +41 (0)44 377 75 05
Fax : +41 (0)44 377 72 01
Courriel : juerg.fuhrer@art.admin.ch

Traduction : Dr. A. Rudaz, Lausanne

Contenu

	Page
1 Introduction	5
2 Méthodes de calcul.....	6
2.1 Irrigation selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP	6
2.2 Irrigation selon la méthode des valeurs limites du potentiel hydrique.....	8
2.3 Autres commentaires sur la méthodologie choisie	9
2.4 Influence du type de sol sur la quantité d'eau d'irrigation.....	10
3 Résultats pour les régions testées.....	12
4 Extrapolation des résultats spécifiques aux régions.....	16
5 Discussion et perspectives.....	21
6 Bibliographie	23
Annexes	25
A1 Répertoire des tableaux.....	25
A2 Répertoire des figures	25

Résumé

En raison du changement climatique, l'agriculture suisse est confrontée à une augmentation des besoins en irrigation. Seule une irrigation suffisante permet d'éviter les pertes de récolte. Cette situation exige des mesures d'irrigation à grande échelle ou plus intensives qui pourraient contribuer à la naissance ou au renforcement de conflits pour l'utilisation de l'eau. Il est donc primordial de mettre en place des bases et des critères objectifs pour évaluer les besoins en irrigation actuels et futurs de l'agriculture suisse. La présente étude a pour objectif d'améliorer l'état des connaissances en ce qui concerne l'irrigation des surfaces agricoles en Suisse. A cet effet, la Confédération et plusieurs cantons ont mandaté la station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART). Les données, outils, méthodes et résultats produits lors d'une étude précédente sur les besoins en irrigation en Suisse (Fuhrer & Jasper [2009]) apportent les bases nécessaires à l'accomplissement de ce mandat.

Une fois de plus, c'est à l'aide du modèle hydrologique WaSiM-ETH (<http://www.wasim.ch>) que les besoins saisonniers en irrigation ont pu être estimés selon une différenciation par surface. Grâce à ce modèle, des calculs continus et à long terme du régime hydrique des sols et des besoins correspondants en irrigation ont pu être établis. Finalement, l'utilisation de deux différents types de méthode a permis de définir la gestion de l'irrigation orientée vers les besoins. Dans un premier temps, les applications du modèle ont été effectuées sur six bassins versants agricoles de caractéristiques et de situations géographiques différentes. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus après différenciation par région ont été reportés à l'aide d'une méthode statistique à l'ensemble des surfaces agricoles suisses (selon les catégories d'utilisation du sol de la « Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 »). L'analyse de l'évolution des besoins en irrigation différenciés spatialement (résolution de 500 m x 500 m) a été réalisée pour les périodes de végétation allant de 1980 à 2006. Les résultats ont été calculés séparément pour les terres arables et pour les prairies (également pour l'arboriculture, mais sous une forme simplifiée).

Les résultats indiquent de grandes différences spatio-temporelles entre les quantités d'eau d'irrigation nécessaires. En omettant les pertes éventuelles (c.-à-d. 100 % d'efficacité), les besoins saisonniers moyens en irrigation de l'agriculture suisse sont d'environ 150 mio. de m³ pour la période allant de 1980 à 2006. Toutefois, les années de sécheresse pourraient encore multiplier cette valeur. Par comparaison avec les prairies et l'arboriculture, les besoins totaux des terres arables sont bien plus élevés. La répartition spatiale des besoins en irrigation indique des valeurs plus hautes pour certaines régions du Plateau, de Suisse occidentale et des différentes régions alpines soumises à une exploitation agricole (p. ex. les vallées du Rhône et du Rhin). Dans ces régions, les intensités d'irrigation saisonnières peuvent atteindre des valeurs supérieures à 1000 m³/ha pendant les années de sécheresse.

Pour la situation climatique actuelle, la présente étude illustre bien les besoins en irrigation de l'agriculture suisse. Mais du fait du changement climatique, il reste encore à déterminer pour le futur quel sera l'accroissement des superficies agricoles nécessitant une irrigation et quelle sera l'augmentation des quantités d'eau nécessaires.

1 Introduction

En considérant les besoins en irrigation d'une superficie de 55'000 ha durant une année de sécheresse moyenne (Weber & Schild [2007]), l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) estime que les besoins actuels en eau d'irrigation pour les sols agricoles suisses sont de 144 millions de mètres cube. Ces chiffres sont basés sur les relevés de données cantonales relatives à l'état des systèmes d'irrigation. En raison du réchauffement climatique actuel, l'OFAG prévoit pour les prochaines années un accroissement sensible des besoins en irrigation. En plus des effets négatifs sur l'économie et l'écologie, cette situation pourrait conduire à des conflits locaux et régionaux pour l'utilisation de l'eau.

Le sondage réalisé par l'OFAG a mis en évidence l'hétérogénéité de l'état des connaissances relatives à l'irrigation des terres agricoles en Suisse de même qu'un besoin général de la part des cantons pour la réalisation d'une étude à l'échelle nationale servant à estimer les besoins en irrigation. Les résultats provenant de l'étude précédente sont désormais disponibles (Fuhrer & Jasper [2009]). Ils fournissent des informations à grande échelle sur les tendances des besoins en irrigation au cours des trente dernières années. L'évapotranspiration relative calculée à l'échelle journalière comme quotient de l'évapotranspiration actuelle sur l'évaporation potentielle (ET/ETP) représente le paramètre sur lequel est basée l'estimation (différenciée par surface) des besoins en irrigation. Lorsque ce quotient est inférieur à 0.80, de nombreuses cultures sont soumises à un stress hydrique (sécheresse) et doivent être irriguées pour empêcher les pertes de récolte (Raes [2002], Dorenboos & Kassam [1979]). Les régions pour lesquelles ce stress prévaut pendant un tiers des années (33 %) sont considérées comme « étant dans le besoin » par rapport à l'eau.

Issue des résultats obtenus à partir des besoins dus à un manque en irrigation, la présente étude se concentre sur les *besoins en irrigation*. Ceux-ci sont établis avec la mise en place du modèle existant (Fuhrer & Jasper [2009]) à l'aide des simulations du régime hydrique réalisées avec une haute résolution sur plusieurs années. Les calculs réalisés à partir du modèle WaSiM-ETH (Schulla & Jasper [2007], voir aussi <http://www.wasim.ch>) relatif aux débits et au régime hydrique tiennent compte non seulement des aspects climatiques, topographiques et pédologiques, mais aussi des besoins de la végétation. En revanche, les pertes éventuelles dues à l'irrigation sont négligées. La période allant de 1980 à 2006 sert encore une fois de période référentielle pour les applications du modèle. Dans un premier temps, les simulations à l'échelle journalière et de résolution de 500 m x 500 m sont réalisées pour les six bassins versants suisses. Pour cela, deux méthodes de calcul différentes servent à estimer les besoins en irrigation (voir les détails au chapitre 2) :

- a) la méthode de la valeur seuil ET/ETP
- b) la méthode des valeurs limites du potentiel hydrique du sol (entrées : point de départ et point cible de l'irrigation)

Dans un deuxième temps, les résultats obtenus au préalable pour les bassins versants sont reportés à l'ensemble des surfaces agricoles utiles de la Suisse à l'aide d'une régression multiple puis calculés en termes de besoins d'irrigation différenciés par surface.

Tout comme dans les travaux précédents de Fuhrer & Jasper [2009], la dynamique de la période de végétation est intégrée à chaque fois dans tous les calculs. Les surfaces agricoles utiles sont analysées non seulement globalement, mais aussi séparément pour les prairies et les terres arables. Les catégories d'utilisation des sols de la « Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 » (OFS [2001]) servent de référence. Les terres arables – catégorie d'utilisation qui n'est pas traitée séparément dans la Statistique de la superficie – sont décomposées à l'aide des critères du système d'indicateur MONET (OFS et al. [2002]). Par manque de données, l'utilisation relative aux

cultures spécifiques n'a pas pu être prise en compte. Il s'ensuit que les besoins en irrigation sont calculés pour les terres arables à partir d'une valeur moyenne correspondant à une culture type, pour les prairies et, sous une forme simplifiée, aussi pour l'arboriculture.

Dans le présent rapport, les méthodes utilisées et les paramètres nécessaires à l'estimation des besoins en irrigation sont présentés au chapitre 2. Les résultats des calculs pour les bassins versants sont présentés au chapitre 3. Finalement, l'extrapolation des tendances des besoins à l'ensemble des surfaces agricoles suisses est décrite au chapitre 4. Une estimation des résultats recherchés se trouve au chapitre 5.

2 Méthodes de calcul

Le modèle hydrologique WaSiM-ETH appliqué aux bassins versants permet d'irriguer les cultures agricoles selon deux manières différentes :

- a) à partir de prescriptions précises sur le calendrier et les quantités d'eau d'irrigation
- b) à partir d'une irrigation gérée selon les besoins dans le cas d'un dépassement des valeurs seuils prescrites.

Dans le projet actuel, c'est le second procédé qui va servir à déterminer les besoins en irrigation. Pour cela, les méthodes de la « valeur seuil ET/ETP » et des « valeurs limites du potentiel matriciel (ou potentiel de succion matriciel) » sont appliquées. La première méthode correspond à la méthodologie décrite dans Fuhrer & Jasper [2009] pour évaluer les besoins en irrigation. Dans le cadre du projet actuel, cette méthode est utilisée comme méthode d'irrigation supplémentaire dans le modèle WaSiM-ETH. La seconde méthode correspond à une pratique très répandue pour estimer les besoins en eau dans le cadre des conseils agricoles prodigués pour l'irrigation par aspersion (p. ex. Lüttger et al. [2005], Mastel [2002]). Dans la présente étude, elle est utilisée comme méthode comparative pour le calcul des besoins en irrigation.

2.1 Irrigation selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP

Dans cette simulation d'irrigation gérée selon les besoins, ceux-ci sont déterminés au moyen de la réduction de l'évaporation modélisée. L'humidité moyenne du sol située dans la profondeur d'enracinement et le rapport actuel ET/ETP sont calculés en tenant compte de la différenciation par surface. Ensuite, pour chaque intervalle de temps nécessaire au calcul, ces valeurs sont introduites dans le module spécifique à l'irrigation du modèle WaSiM-ETH où elles sont calculées. Lorsqu'à un intervalle de temps, la valeur seuil ET/ETP prédéfinie est dépassée, l'irrigation est déclenchée. La quantité d'eau d'irrigation est évaluée en faisant la différence entre la valeur ciblée et la valeur actuelle de l'humidité moyenne du sol situé dans la profondeur d'enracinement.

Dans l'étude actuelle, une réduction de 20 % de la transpiration - paramètre dépendant de l'humidité du sol - agit comme déclencheur de l'irrigation ($ET/ETP = 0.80$). La valeur cible d'irrigation correspond à l'état d'humidité du sol à partir duquel débute la réduction de la transpiration actuelle 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 irrigation en cas de dépassement de la valeur seuil ET/ETP.

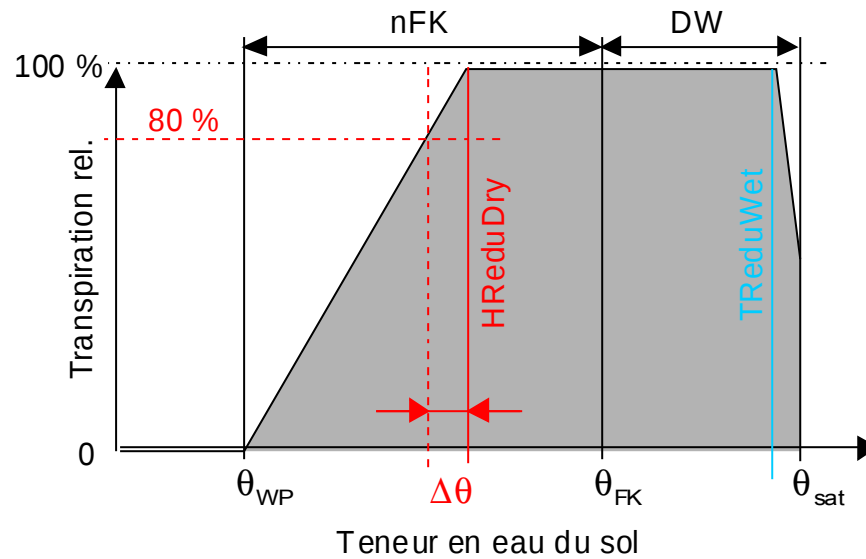


Figure 1: Définition de la quantité d'eau d'irrigation en fonction de la transpiration et de la teneur en eau du sol. nFK = capacité au champ utile ; DW = eau de drainage ou eau de gravitation ; θ_{WP} = teneur en eau au point de flétrissement ; θ_{FK} = teneur en eau à la capacité au champ ; θ_{sat} = 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 (provoquant une carence en oxygène).

Conformément à ce qui a été dit plus haut, le début du stress dû à la sécheresse sera géré dans le modèle WaSiM-ETH par le dépassement d'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 de manière unique à 350 hPa (exprimé aussi en cm, hauteur de la 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 2, les teneurs en eau dépendantes du type de sol qui correspondent au paramètre $HReduDry$ se situent chacune au-dessous de 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 toujours 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 pour des sols sableux à 320 hPa pour des sols argileux (= pF 1,8 – 2,5).

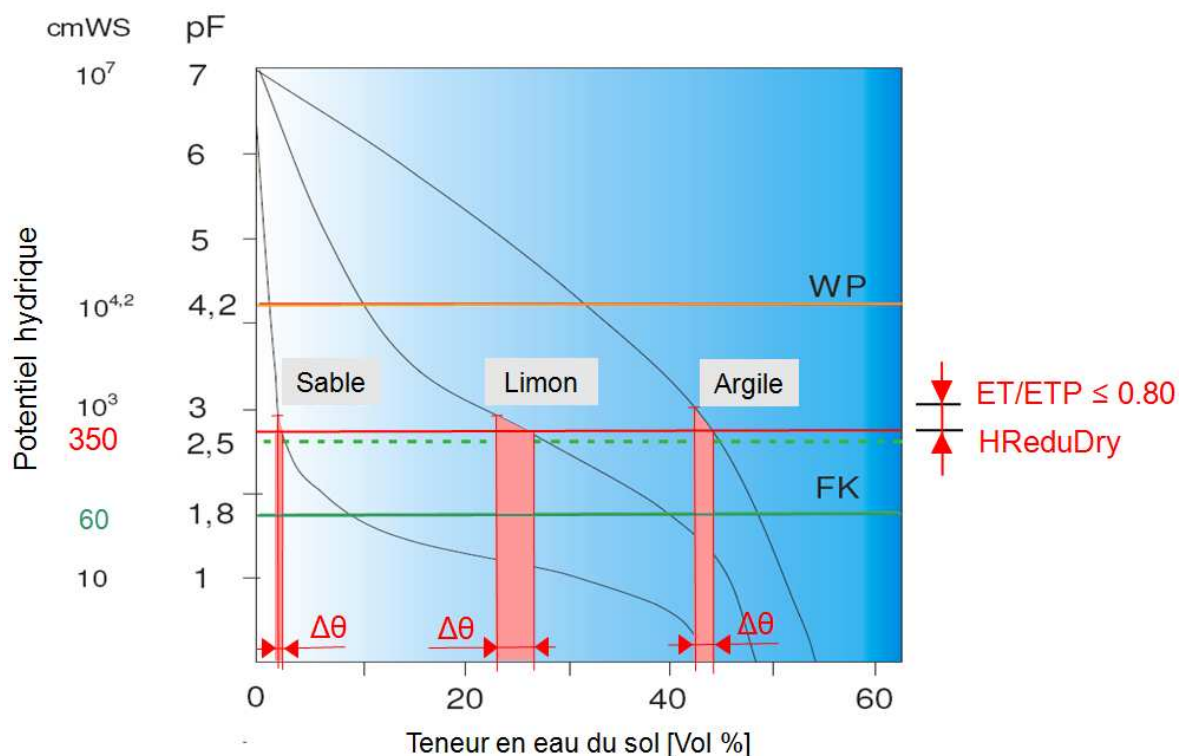


Figure 2: Relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau du sol (courbes pF) en fonction de différents types de sol et représentation des besoins en irrigation découlant de cette relation ; les besoins sont déterminés selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP. ET/ETP = évapotranspiration relative, HReduDry = valeur limite de début de stress hydrique, $\Delta\theta$ = besoins en irrigation, FK = capacité au champ, WP = point de flétrissement (figure modifiée selon Koll [2005]).

2.2 Irrigation selon la méthode des valeurs limites du potentiel hydrique

Cette variante de gestion de l'irrigation exige deux valeurs limites du potentiel hydrique : une valeur au-dessus de laquelle l'irrigation est déclenchée et une seconde valeur marquant l'arrêt de l'irrigation. Selon la littérature actuelle sur la gestion de l'irrigation par aspersion (p. ex. Mastel [2002], [2004], Lüttger et al. [2005], Bohne & Stüdemann [1973]), les valeurs limites sont fixées à un niveau d'humidité du sol de 50 % de la capacité au champ utile nFK (= début de l'irrigation) et à 80 % nFK (= fin de l'irrigation). En admettant que la capacité de rétention en eau maximale d'un sol (= FK) soit définie par un potentiel hydrique de 60 hPa (= pF 1,8), les valeurs de début et de fin d'irrigation sont de 1000 hPa (= pF 3,0) et de 200 hPa (= pF 2,3).

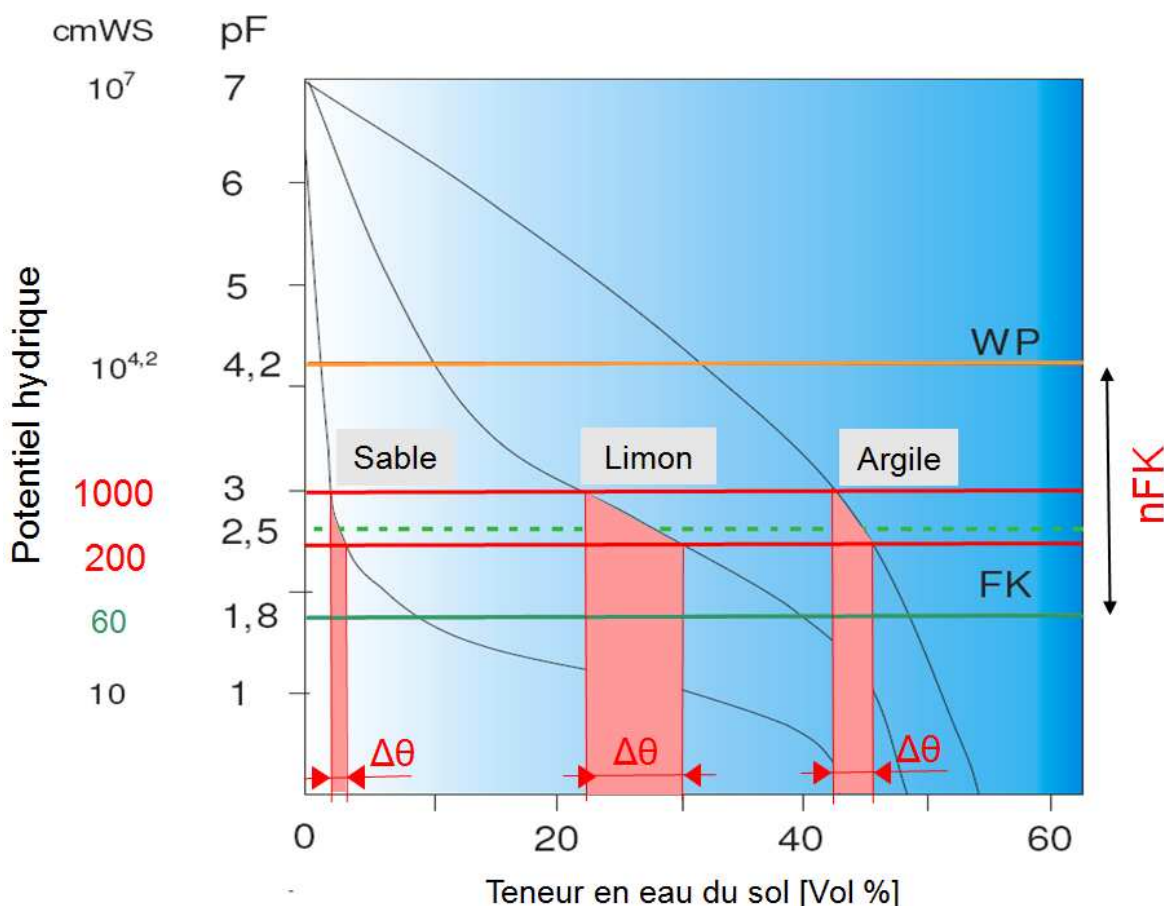


Figure 3: Relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau du sol (courbes pF) en fonction de différents types de sol et représentation des besoins en irrigation découlant de cette relation ; les besoins sont déterminés selon la méthode des «valeurs limites du potentiel hydrique». $\Delta\theta$ = besoins en irrigation, nFK = capacité au champ utile, FK = capacité au champ, WP = point de flétrissement (figure modifiée selon Koll [2005]).

2.3 Autres commentaires sur la méthodologie choisie

- Une limitation éventuelle de l'apport en eau n'a pas été prise en compte. Dans le présent projet, l'eau d'irrigation provenait de la nappe phréatique, mais le modèle WaSiM-ETH permet également la gestion du prélèvement de l'eau à partir du réseau fluvial ou des lacs à condition que ceux-ci puissent amener et contenir suffisamment d'eau. Pour cela, la quantité d'eau d'irrigation nécessaire évaluée peut être distribuée sur plusieurs intervalles de temps.
- En raison du manque de données, aucune valeur des paramètres spécifiques selon le type de culture n'a pu être utilisée pour le calcul du régime hydrique du sol et de la gestion d'irrigation. Au contraire, dans les deux variantes de calcul (voir les chapitres 2.1 et 2.2), il a fallu recourir à des valeurs moyennes pour décrire la croissance des cultures arables, des prairies et de l'arboriculture.
- En raison du manque de données, l'apport d'humidité dans le sol dû à l'épandage de lisier n'a pas été pris en compte dans les calculs de modélisation. Dans la pratique agricole, la contribution approximative de cet apport pourrait être de 30-60 m³/ha et avoir une influence locale sur le régime hydrique du sol.

- Les surfaces agricoles utiles ont été identifiées à partir des séries de données les plus récentes sur l'utilisation du sol fournies pour toute la Suisse par la Statistique de la superficie 1992/97 (OFS [2004]). Comme ces données ne présentent aucune délimitation séparée pour les terres arables, les surfaces ont dû être estimées sur la base d'autres jeux de données spatiales puis décomposées à l'aide du système d'indicateur de Monet (OFS et al. [2002]), (voir aussi Fuhrer & Jasper [2009]) selon une procédure fastidieuse. Malgré cette procédure de délimitation pointue, il est plus que probable que les surfaces ainsi évaluées s'écartent des surfaces réellement occupées par les terres arables. Par conséquent, il serait plus juste de considérer dans le présent projet les surfaces évaluées comme étant « potentiellement aptes aux terres arables ».
- D'autre part, les caractéristiques physiologiques des plantes, comme p. ex. la capacité de succion, ont été considérées dans les calculs comme étant indépendantes du type de sol et du stade de développement phénologique. Par ailleurs, les indications définies pour la gestion de l'irrigation (point de début et point d'arrêt de l'irrigation) ont été simplifiées et maintenues constantes durant toute la période de végétation. Or, dans la pratique agricole relative à l'aspersion, il existe des situations qui s'écartent de cette hypothèse. Par exemple, les variétés de pommes de terre précoces sont souvent irriguées à partir d'une capacité au champ utile nFK de 45 %, alors que les variétés tardives sont irriguées pendant la période allant de la tubérisation à la floraison déjà à partir d'une valeur de 35 % nFK (Lüttger et al. [2005]).
- Concernant la modélisation, il faut noter que l'effet d'hystérèse a été négligé lors de l'évaluation des courbes du potentiel hydrique (courbes pF) qui sont spécifiques aux différents types de sol : différence des courbes du potentiel hydrique d'un sol entre le drainage (désorption) d'un sol à saturation et l'humidification d'un sol sec (sorption).
- La simulation du régime hydrique du sol a été estimée à partir du modèle de van Genuchten [1980, 1991] et de la paramétrisation de Carsel & Parrish [1988]. Cependant, la littérature pédologique spécialisée cite un grand nombre de paramétrisations différentes pouvant servir à l'application du modèle de van Genuchten et elle ne donne aucune valeur qui soit appropriée pour les sols suisses. Le choix de la paramétrisation peut avoir une grande influence sur le tracé des courbes du potentiel hydrique (dépendantes du type de sol) qui en dépendent et par conséquent aussi sur le calcul de modélisation du régime hydrique du sol et des besoins en irrigation qui en résultent.

2.4 Influence du type de sol sur la quantité d'eau d'irrigation

Comme mentionné précédemment, les propriétés des sols ont une grande influence sur les quantités d'eau d'irrigation. Conformément à la mise en place choisie du modèle relatif à la gestion d'irrigation (voir chapitres 2.1 et 2.2), les sols lourds (limon, silt et argile) reçoivent plus d'eau d'irrigation pour atteindre les valeurs limites critiques d'humidité du sol (début de l'irrigation) que les sols légers (sable). Cependant, comme ces derniers ont une capacité de rétention plus faible, ils doivent être irrigués plus tôt et plus fréquemment que les sols lourds lors d'épisodes de sécheresse. Ce comportement ambivalent est représenté sous la forme d'un exemple à la figure 4. Cet exemple montre avec clarté que la totalité de la quantité d'eau d'irrigation accumulée durant la période de végétation est nettement plus élevée pour les sols limoneux que pour les sols sablo-limoneux.

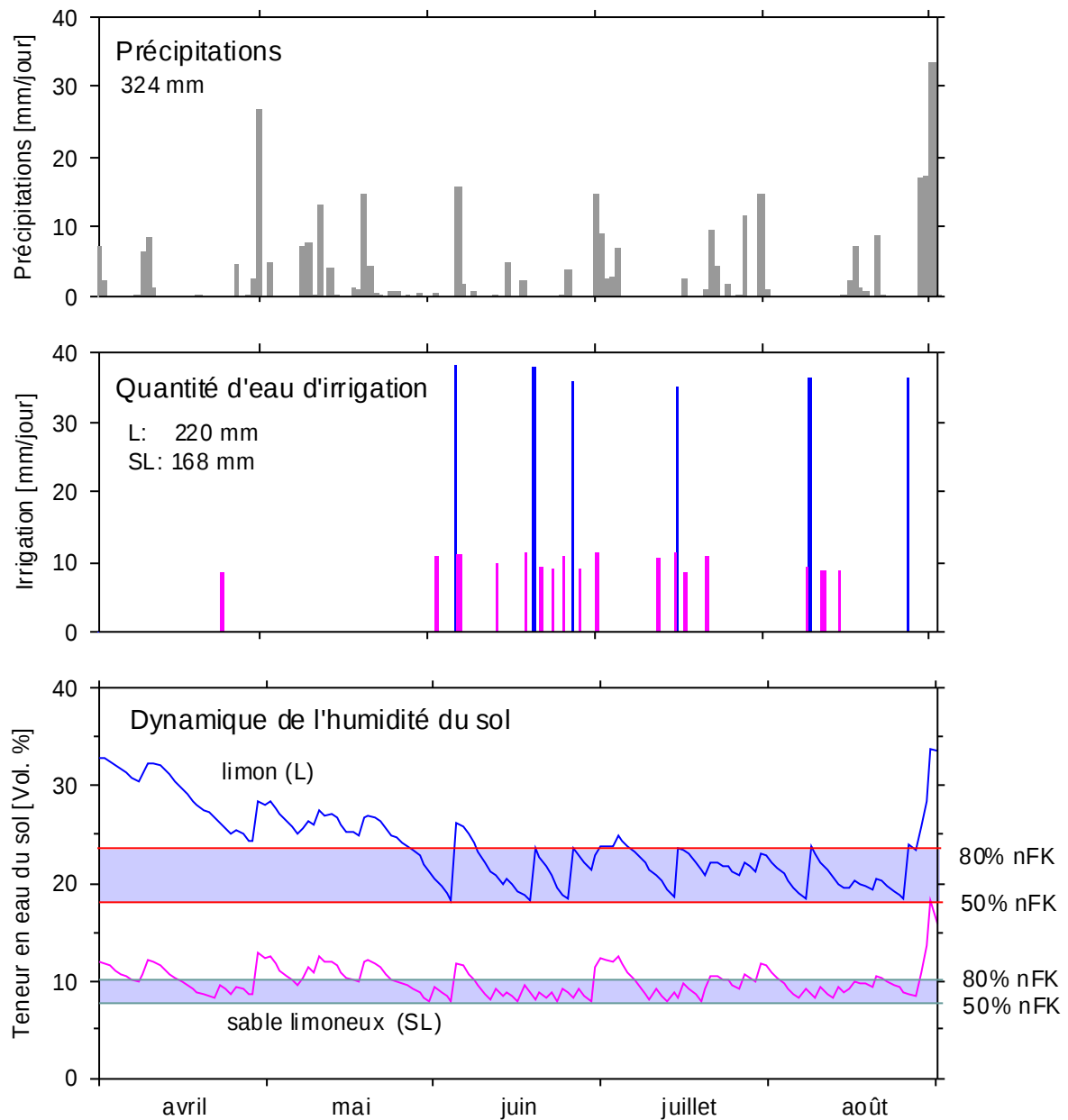


Figure 4: Influence du type de sol sur la quantité d'eau d'irrigation: simulation de la dynamique de l'humidité du sol et de la dynamique de l'irrigation selon la méthode de calcul des «valeurs limites fixes du potentiel hydrique» appliquée durant l'année de sécheresse 2003 à un site caractérisé par différents types de sol (région de la Broye, à proximité de Payerne).

3 Résultats pour les régions testées

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 servent de base pour établir les cartes des besoins en irrigation de l'agriculture suisse. Ces grands bassins versants dont la superficie peut aller jusqu'à 1700 km², illustrent bien par leur situation et leurs caractéristiques géographiques particulières les différentes conditions d'utilisation (climat, sol, relief, etc.) auxquelles sera confrontée l'agriculture suisse.

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 développée par Fuhrer & Jasper [2009]. Les calculs ont fourni des simulations journalières en continu avec une résolution de 500 m x 500 m pour la période 1980-2006.

Les résultats des simulations ont été calculés de manière ciblée pour les surfaces agricoles utiles et pour leurs composantes (terres arables et prairies). L'arboriculture, troisième composante, n'a pas été examinée séparément. L'évaluation a été réalisée de manière indirecte à partir de l'ensemble de la superficie agricole. La classification des besoins saisonniers moyens en irrigation, différenciés par région, est présentée dans le tableau 1. Les résultats figurent séparément pour chacune des deux méthodes de calcul utilisées (méthode de la valeur seuil ET/ETP ; méthode des « valeurs limites fixes du potentiel hydrique »).

Tableau 1: Besoins en irrigation différenciés selon les régions pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris les surfaces utilisées pour l'arboriculture) ; moyennes pour les périodes de végétation 1980-2006 (toutes les données sont en million de m³).

Utilisation des sols	Méthode	Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
Terres arables	ET/ETP	3,7	1,5	2,7	0,1	0	0
	Potentiel hydrique (nFK)	2,9	1,2	2,3	0,1	0	0
	Nombre de mailles	2438	1019	891	6	28	0
Prairies	ET/ETP	1,7	1,5	1,6	3,7	1,1	0
	Potentiel hydrique (nFK)	1,4	1,2	1,5	3,6	1,1	0
	Nombre de mailles	1274	902	109	1049	74,3	48
Surfaces agricoles (total)	ET/ETP	5,8	3,0	4,4	5,5	1,2	0
	Potentiel hydrique (nFK)	4,6	2,5	3,9	5,3	1,2	0
	Nombre de mailles	3914	1975	1022	1198	779	48

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

Les résultats présentés dans le tableau 1 indiquent des différences assez faibles entre les besoins en irrigation calculés selon les deux méthodes. De manière générale, les quantités d'eau d'irrigation obtenues à partir de la méthode des « valeurs limites fixes du potentiel hydrique » sont légèrement plus basses que celles qui sont calculées avec la méthode de la « valeur seuil ET/ETP ».

Les besoins en irrigation (1980-2006) des régions de la Thur et du Rhône présentent les valeurs saisonnières moyennes les plus hautes avec tout juste 6 mio. de m³. Il est surprenant de noter les grandes différences entre les besoins spécifiques dépendant de l'utilisation des sols qui existent dans ces deux régions. Alors que dans la région de la Thur, les besoins en irrigation se font surtout

sentir pour les terres arables, la région du Rhône indique au contraire que ce sont les prairies qui sont les plus exigeantes en eau d'irrigation. Toutefois, ce constat n'est pas surprenant, compte tenu de la composition des surfaces qui occupent les superficies agricoles des deux régions.

Globalement, les calculs saisonniers des besoins en irrigation varient beaucoup entre les régions et entre les années d'observation. Cette situation est bien visible dans les deux tableaux ci-dessous. Dans la région de la Thur, les besoins saisonniers en eau d'irrigation pour l'agriculture varient entre moins d'un million de mètres cubes à plus de 30 millions de mètres cubes pendant la période d'observation (figure 5). Ces variations interannuelles sont également valables pour les terres arables et les prairies qui ont été examinées plus en détail (figure 6).

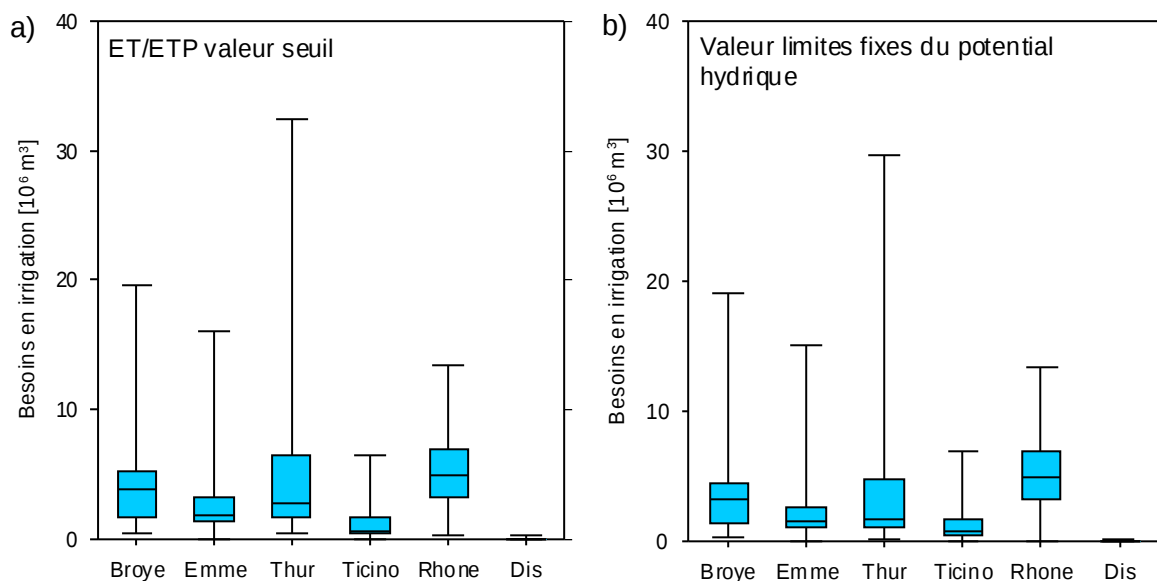


Figure 5: Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (étendue, médiane, quantiles 1 et 3) pour l'ensemble des terres agricoles (1980-2006) obtenus selon a) la méthode de la valeur seuil ET/ETP et b) la méthode des valeurs limites fixes du potentiel hydrique.

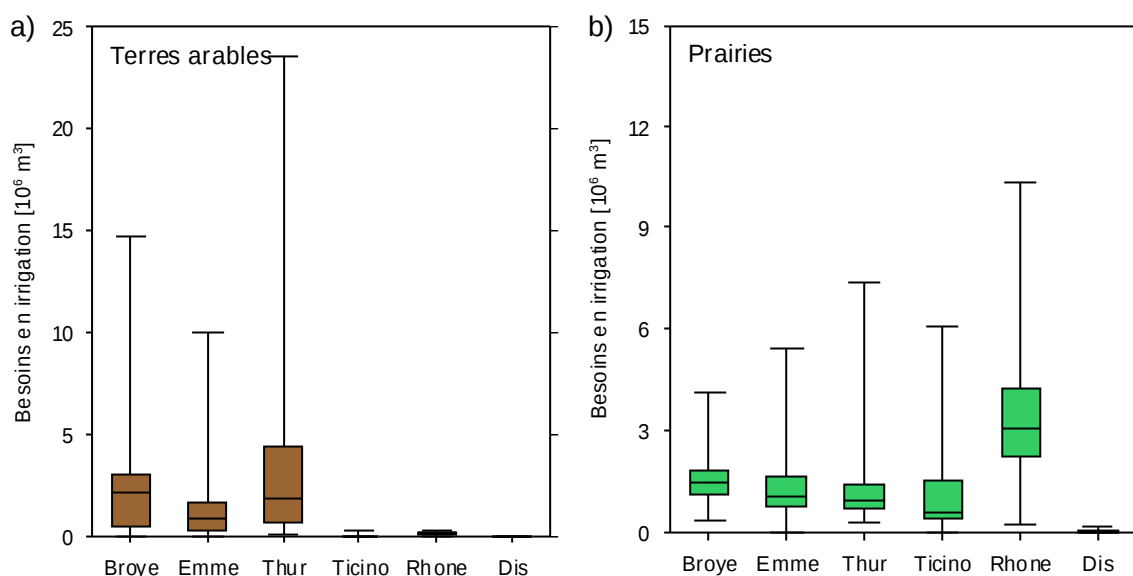


Figure 6: Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (étendue, médiane, quantiles 1 et 3) pour les terres arables et les prairies (1980-2006) obtenus selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP (attention aux échelles différentes des axes y).

Si on se limite à l'évaluation quantitative des besoins saisonniers en irrigation des années caractérisées par les besoins en eau les plus élevés (années de sécheresse), les moyennes indiquées dans le tableau 1 sont souvent largement dépassées, en particulier pour l'année de sécheresse 2003 (voir tableau 2).

Tableau 2: Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (amplitude, médiane, quantiles 1 et 3) pour l'ensemble des terres agricoles (1980-2006) obtenus chaque fois selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP pour les années de sécheresse de la période 1980-2006 (toutes les données en million de m³).

Méthode (années choisies)	Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
ET/ETP (33 %)*	12,0	4,9	6,4	6,4	2,3	0,0
ET/ETP (10 %)*	23,4	7,4	9,9	8,1	3,8	0,1
ET/ETP (2003)	30,8	16,0	19,6	13,4	6,5	0,1

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

* Pourcentages des années dont les besoins en eau sont les plus élevés (correspond chaque fois à une moyenne)

Il ressort du tableau 2 que les régions caractérisées en majorité par des surfaces arables (Thur, Broye, Emme) présentent pendant les années de sécheresse des besoins en irrigation croissants, plus élevés que ceux des régions qui sont occupées principalement par des prairies (Rhône, Tessin, Dischma).

Les différences annuelles entre les quantités d'eau d'irrigation nécessaires sont liées à la fois aux différentes étendues des surfaces à irriguer (voir tableau 3) et aux différentes quantités d'eau d'irrigation (m³/ha par saison). L'exemple de la Thur indique que pour cette région seulement, la superficie évaluée qui nécessite une irrigation pendant les années de sécheresse peut grimper à plus de 700 km² (ou 70'000 ha). Par ailleurs, il faut s'attendre à des quantités d'irrigation plus élevées pendant ces années. Les figures 7 à 9 présentent les estimations annuelles des superficies effectives à irriguer ainsi que les quantités d'eau nécessaires à leur irrigation (m³/ha par saison).

Tableau 3: Superficies effectives nécessitant une irrigation (%) en tenant compte des variations annuelles ; les surfaces agricoles utiles des régions testées pour 1980-2006 sont évaluées chaque fois au moyen de la méthode de la valeur seuil ET/ETP.

	Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
Superficie agricole [ha]	97'800	49'400	25'600	30'000	19'500	1'200
Superficie irriguée [%]						
- moyenne (1980-2006)	19	21	39	53	31	21
- pour 33 % des années *	38	38	62	68	48	29
- pour 10 % des années *	61	47	78	72	64	60
- pour l'année de sécheresse 2003	63	66	95	82	82	88

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

* Avec les besoins en eau les plus élevés (correspond chaque fois à une moyenne)

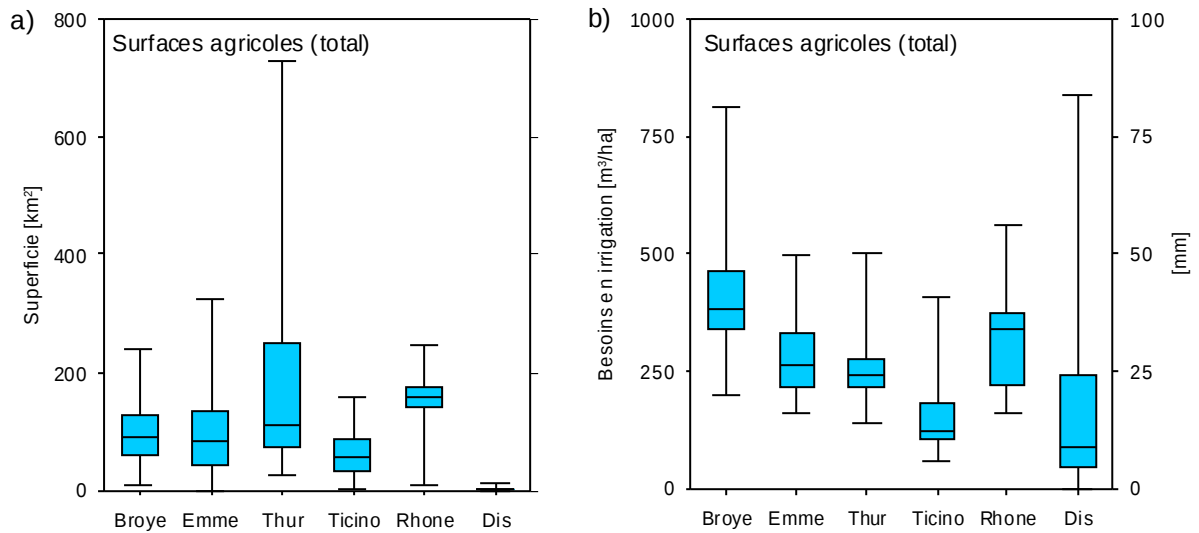


Figure 7: Surfaces nécessitant une irrigation saisonnière (gauche) et besoins respectifs en irrigation par ha (droite) différenciés par région pour l'ensemble des terres agricoles utiles (dans les deux cas pour les périodes de végétation 1980-2006), évaluation selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quartiles 1 et 3).

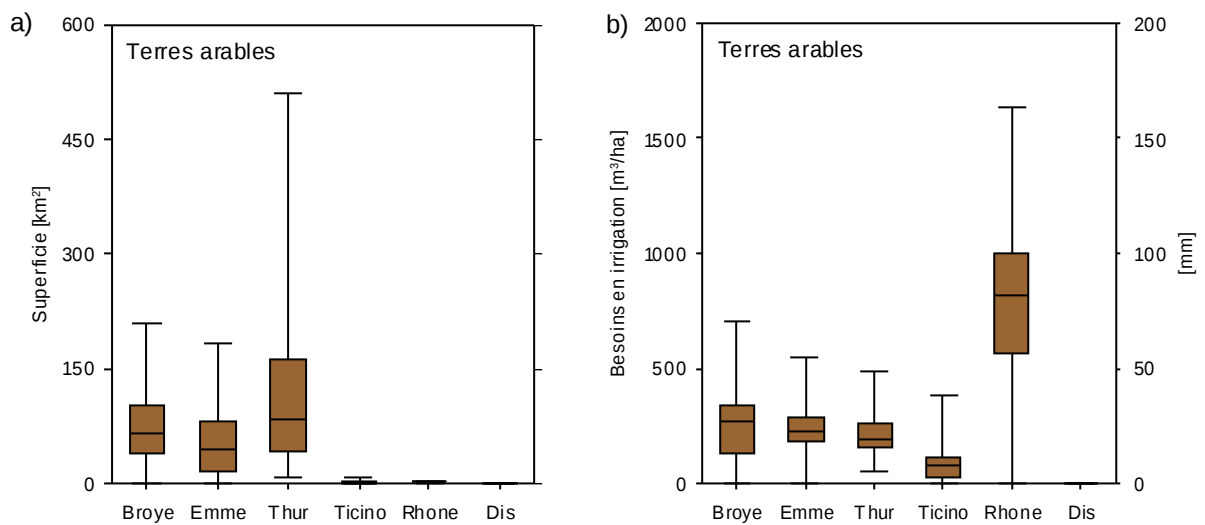


Figure 8: Variations saisonnières des surfaces à irriguer (gauche) et de leurs besoins respectifs en irrigation par ha (droite) pour les terres agricoles utiles (dans les deux cas pour les périodes de végétation allant de 1980 à 2006), différenciés par région et évalués à partir de la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quartiles 1 et 3).

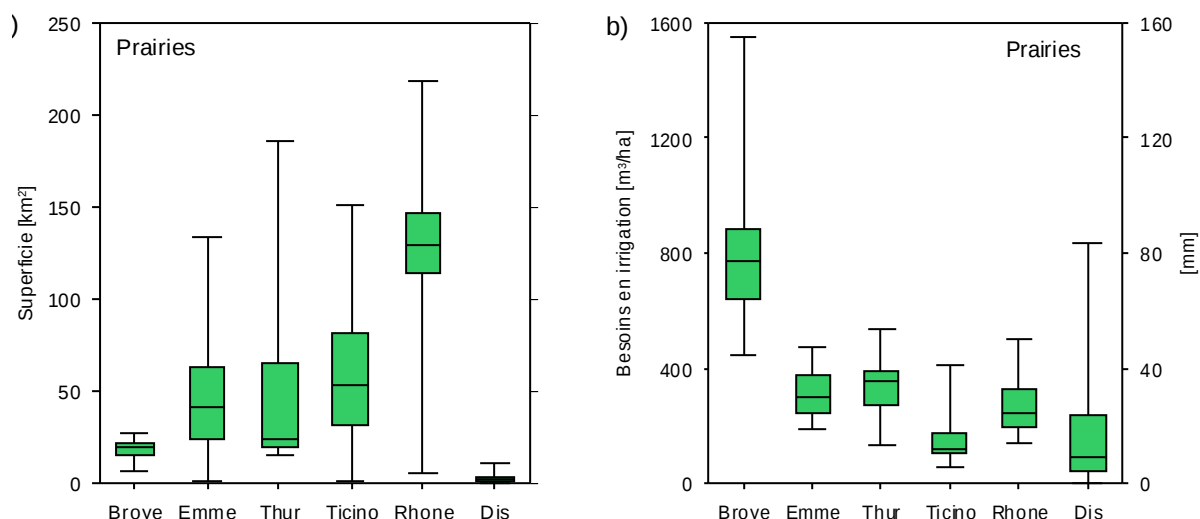


Figure 9: Variations saisonnières des superficies à irriguer (gauche) et de leurs besoins respectifs en irrigation par ha (droite) pour les prairies (dans les deux cas pour les périodes de végétation allant de 1980 à 2006), différenciés par région et évalués à partir de la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quartiles 1 et 3).

4 Extrapolation des résultats spécifiques aux régions

L'extrapolation des besoins en irrigation spécifiques aux régions à l'ensemble de la superficie agricole suisse a été réalisée à l'aide d'une régression multiple en tenant compte de la dépendance des besoins en eau vis-à-vis des conditions climatiques, topographiques et pédologiques. Les relations statistiques reliant les modèles de répartition spatiale des quantités d'eau d'irrigation aux caractéristiques spécifiques des régions sont quantifiées dans le tableau 4. Les quantités d'eau d'irrigation évaluées pour les années de sécheresse de la période 1980-2006 ont servi de base pour réaliser les analyses de corrélation différenciées selon les surfaces (moyenne de 33 % des années ayant les besoins en eau les plus élevés).

Tableau 4: Relation entre les besoins en irrigation calculés et les différentes caractéristiques régionales (toutes les données se rapportent à la superficie agricole totale des régions testées).

Caractéristique	Coefficient de corrélation
Relation entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations (ETP/N) ^a	0,60
Altitude du terrain ^b	0,21
Pente ^c	0,46
Perméabilité du sol ^d	0,64
Profondeur du sol ^d	0,15
Capacité de rétention du sol ^d	0,19
Squelette du sol ^d	0,12

^a Moyenne sur plusieurs années pour la période de végétation (1980-2006) ; N représente les précipitations

^b 100 m, altitude choisie comme critère de répartition des classes

^c Répartition des classes sur la base d'échelons de 5°

^d Répartition des classes selon la carte d'aptitude des sols suisses BEK200 (OFS [2004])

Les résultats des analyses indiquent que les coefficients de corrélation entre les besoins en irrigation et les caractéristiques des sols sont nettement plus faibles que ceux qui avaient été obtenus lors des travaux précédents (voir Fuhrer & Jasper [2009]). Il faut considérer ici que les besoins en irrigation ont été établis à partir d'un tableau de classification réduit à 27 classes au lieu des 81 classes (combinaison de 3 caractéristiques, de 3 classes chacune). C'est au moyen de ce tableau que les modèles de superficie relatifs aux besoins en irrigation des régions testées ont été extrapolés à l'ensemble des surfaces agricoles suisses. Les classes des caractéristiques utilisées sont définies dans le tableau 5. Les domaines des classes ont été choisis de façon à ce que chaque classe soit justifiée par un nombre suffisant de mailles de la grille.

Tableau 5: Caractéristiques et classes sélectionnées pour réaliser l'extrapolation des besoins en irrigation (les données relatives se rapportant à la superficie sont chaque fois extrapolées à l'ensemble des surfaces agricoles des régions testées).

Caractéristique	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	Intervalle de valeurs	Superficie (%)	Intervalle de valeurs	Superficie (%)	Intervalle de valeurs	Superficie (%)
ETP / N ^a	< 0,5	33	0,5 – 0,8	37	> 0,8	30
Classe perméabilité ^b	2 - 3	17	4	39	5-6	44
Pente [degré]	< 5	37	5 - 15	36	> 15	27

^a Rapport entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations (N) comme moyenne de plusieurs années sur la période de végétation 1980-2006

^b Avec une répartition des classes selon la carte d'aptitude des sols suisses BEK200 (OFS [2004])

Ce sont au total 15,7 % (ou 2'233 km²) des surfaces agricoles utiles qui sont ainsi représentées, ce qui correspond à 19,3 % des terres arables et à 13,8 % des prairies. Les données des superficies relatives, rapportées au tableau 5, en fonction des caractéristiques, se situent dans un ordre de grandeur qui est proche de celui qui prévaut pour l'ensemble de l'agriculture suisse.

L'extrapolation des besoins en irrigation à l'ensemble de la superficie agricole suisse exige que la classification de la région ciblée soit calquée sur les données décrites dans le tableau 5. Deux des trois caractéristiques régionales ont été obtenues à partir de jeux de données de base existants ; la perméabilité du sol à partir de la *Carte digitale des aptitudes des sols de la Suisse* (BEK200) OFS [2004]) et la pente à partir du *Modèle d'altitude RIMINI* (swisstopo [2004]). Par contre, l'indicateur ETP/N se rapportant à la période de végétation a été déterminé à partir des calculs de modélisation (voir Fuhrer & Jasper [2009]).

Les résultats des extrapolations sont représentés dans le tableau 6 et dans les figures 10-12. Sur la base des moyennes de plusieurs années (1980-2006) et selon la méthode de calcul utilisée, les besoins en eau d'irrigation s'élèvent à respectivement 136 mio. de m³ et 154 mio. de m³ pour l'agriculture suisse. Lors d'années de sécheresse, ces besoins peuvent augmenter fortement. Par comparaison avec les prairies et l'arboriculture, les besoins totaux des terres arables sont les plus élevés. Une comparaison directe entre les intensités (m³/ha) est partiellement possible, mais n'est pas prise en compte ici, car les surfaces irriguées ne se situent pas au même endroit et sont donc exposées à des conditions pédologiques et climatiques différentes.

La répartition spatiale des besoins en irrigation indique des valeurs plus élevées pour de vastes parties du Plateau, pour la région autour du lac Léman ainsi que pour différentes vallées alpines (p. ex. vallées du Rhône et du Rhin). Durant les années de sécheresse, les quantités d'eau d'irrigation saisonnières peuvent atteindre plus de 1000 m³/ha dans certaines régions isolées (avec des valeurs maximales pouvant dépasser 2000 m³/ha).

Tableau 6: Extrapolation à l'ensemble des surfaces agricoles utiles en Suisse des quantités d'eau d'irrigation saisonnières spécifiques aux régions (toutes les quantités sont données en million de m³ et se rapportent à la période 1980-2006).

Méthode	Terres arables	Prairies	Arboriculture	Surface agricole (total)
ET/ETP (moyenne)	79	61	14	154
Potentiel hydrique nFK (moyenne)	70	53	13	136
ET/ETP (33 %)*	124	100	20	244
ET/ETP (10 %)*	205	152	29	386
ET/ETP (2003)	355	222	61	638
Superficie (totale) [ha]	615'950	744'925	58'700	1'419'575

* Pourcentages des années caractérisées par les besoins en eau les plus élevés (correspond chaque fois à une moyenne)

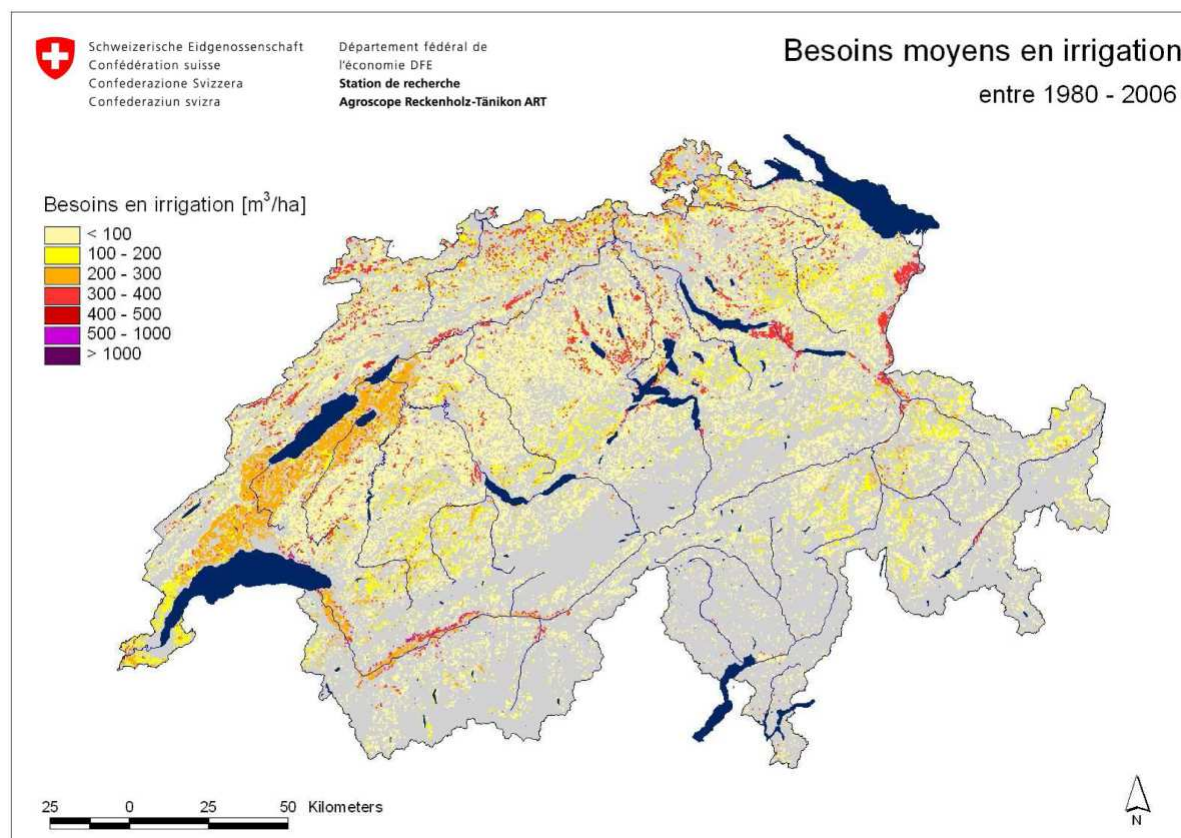


Figure 10: Répartition spatiale des besoins moyens en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse ; calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006, résolution de 500 m x 500 m.

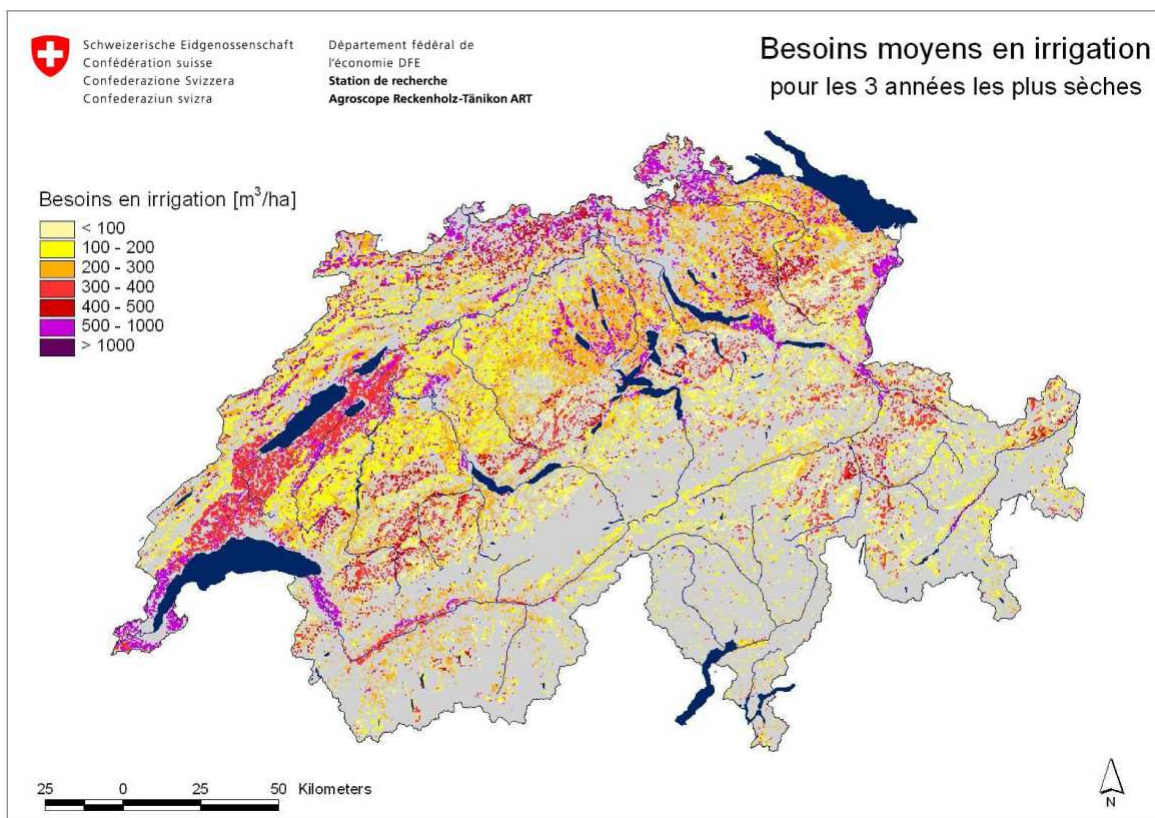


Figure 11: Répartition spatiale des besoins moyens en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse; calcul pour les périodes de végétation des 3 années les plus sèches comprises entre 1980 à 2006, résolution de 500 m x 500 m.

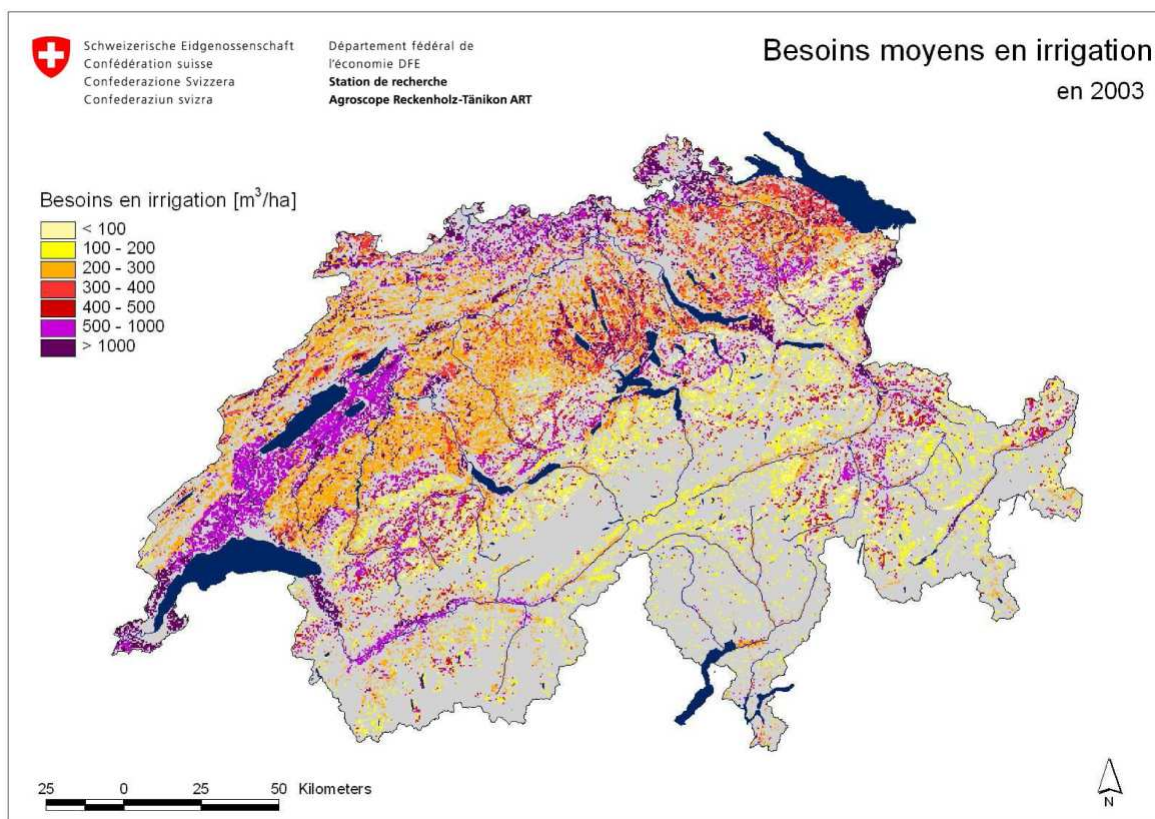


Figure 12: Répartition des besoins en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse: calcul pour la période de végétation de l'année de sécheresse 2003, résolution de 500 m x 500 m.

Une estimation des besoins moyens en irrigation répartis selon les surfaces est donnée dans le tableau 7 pour chaque canton. Il en ressort que les cantons de Berne, Vaud et Grisons sont classés parmi les cantons qui ont les besoins en irrigation les plus élevés. Toutefois, il faut noter que ces cantons possèdent également les plus grandes surfaces agricoles.

Tableau 7: Besoins en irrigation évalués pour chaque canton selon la méthode ET/ETP (toutes les valeurs sont données en million de m³ et se rapportent à la période 1980-2006).

	Canton	Surface agricole [ha]	Besoins (moyenne)	Besoins (33 %)*	Besoins (10 %)*	Besoins (2003)
AG	Argovie	61250	8,3	13,2	22,4	38,7
AI	Appenzell Rhodes- Intérieures	8975	0,8	1,2	1,8	2,7
AR	Appenzell Rhodes- Extérieures	13425	0,7	1,3	2,1	3,1
BE	Berne	248850	22,0	36,6	57,7	92,4
BL	Bâle-Campagne	20750	4,0	6,0	9,8	17,2
BS	Bâle-Ville	250	0,1	0,1	0,2	0,4
FR	Fribourg	95325	10,4	15,7	23,8	40,6
GE	Genève	10825	1,9	3,7	6,6	13,0
GL	Glaris	18475	1,5	2,4	3,6	5,2
GR	Grisons	175075	13,8	22,7	33,5	48,0
JU	Jura	39600	5,3	8,1	13,1	21,2
LU	Lucerne	79575	7,5	12,9	22,4	35,8
NE	Neuchâtel	33350	3,9	6,1	10,0	16,7
NW	Nidwald	9975	0,7	1,3	1,9	2,9
OW	Obwald	17350	1,5	2,4	3,6	5,3
SG	St-Gall	92800	10,9	16,8	27,3	42,2
SH	Schaffhouse	12500	2,7	4,5	7,4	14,2
SO	Soleure	32900	4,0	6,1	9,8	16,2
SZ	Schwyz	35825	3,7	5,6	8,8	13,7
TG	Thurgovie	51500	4,8	9,0	17,2	29,8
TI	Tessin	30375	1,8	3,0	4,4	6,7
UR	Uri	20600	1,4	2,4	3,5	5,0
VD	Vaud	136500	22,6	32,5	47,1	85,0
VS	Valais	88025	10,4	14,4	20,3	34,6
ZG	Zoug	10625	1,0	1,7	3,0	4,8
ZH	Zurich	73250	8,1	13,9	24,8	42,7
total		1417950	154	243	386	638

* Pourcentages des années caractérisées par les besoins en irrigation les plus élevés (correspond chaque fois à la moyenne)

5 Discussion et perspectives

Dans la présente étude, des outils et des méthodes modernes ainsi qu'une banque de données complète ont été utilisés pour évaluer les besoins saisonniers en eau d'irrigation (différenciés par surface) dans l'agriculture suisse. Les résultats et les cartes présentés donnent un aperçu de la répartition à grande échelle des besoins en irrigation moyens et en particulier ceux des années de sécheresse choisies pour la période 1980-2006. De plus, ils permettent d'identifier les régions caractérisées par d'importants besoins en irrigation. Les résultats ne donnent aucune information sur la consommation actuelle en eau d'irrigation, mais ils fournissent par contre des données sur les besoins potentiels moyens pour les terres arables, les prairies et l'arboriculture en tenant compte des conditions climatiques et spatiales.

En comparant les besoins moyens établis dans la présente étude avec ceux qui sont donnés dans le rapport du sondage relatif à l'état de l'irrigation dans l'agriculture suisse (Weber & Schild [2007]), il en ressort des parallèles étonnants. Par rapport aux besoins saisonniers en eau, estimés à 144 mio. de m³ (état 2006) dans le sondage, les besoins moyens calculés à l'aide du modèle de la présente étude s'élèvent à 154 mio. de m³. Une observation plus approfondie montre toutefois que la comparaison de ces chiffres n'est pas judicieuse. Les raisons en sont multiples. Alors que les données de l'étude de Weber & Schild [2007] découlent uniquement des relevés cantonaux (avec l'utilisation des surfaces et des techniques d'irrigation actuelles), les résultats de la présente étude reposent sur l'hypothèse que la gestion d'irrigation dépendante de l'humidité du sol est optimale et que, par conséquent, l'efficacité de l'irrigation ainsi supposée est de 100 % (aucune perte technique). Or, dans la pratique actuelle une si haute efficacité n'existe que rarement. De manière générale, l'efficacité de l'irrigation par aspersion a des valeurs qui se situent entre 50 et 70 % (à l'exception de l'irrigation par goutte à goutte) en fonction de la technique d'irrigation utilisée. En Valais, l'irrigation par les bisses pratiquée dans de nombreux endroits doit être considérée comme étant particulièrement inefficace. Il est donc étonnant de constater qu'environ 60 % de la totalité des quantités d'eau d'irrigation estimées sont appliquées selon cette technique. Dans les conditions réelles, les quantités qui correspondent aux pertes à combler pourraient être bien plus élevées que celles qui sont calculées ici.

En résumé, ces données indiquent que les surfaces à irriguer calculées dans la présente étude sont nettement plus grandes et qu'elles s'étendent à de plus larges régions par rapport aux conclusions présentées dans le rapport relatif au sondage. De ce dernier, il ressort que les surfaces utiles à irriguer en Suisse représentent pour une année de sécheresse moyenne seulement 55'000 ha dont 21'000 ha situés uniquement dans la région du Rhône. Sur la base de ces résultats, les quantités saisonnières moyennes d'eau d'irrigation sont d'environ 2'600 m³/ha. Ces importantes valeurs ne sont jamais atteintes dans nos calculs de modélisation, même pas pour les années de sécheresse extrême. En effet, pour l'année de sécheresse 2003, les quantités d'eau d'irrigation moyennes atteignaient 450 m³/ha (cf. figure 12).

L'interprétation appropriée de la carte qui a été dressée pour les besoins en irrigation exige une bonne connaissance des données de base employées. Les jeux de données relatifs aux besoins en irrigation préparés dans l'étude précédente (Führer & Jasper [2009]) servent de base à la présente étude. Cependant, la superficie des terres arables utilisée doit être considérée comme étant la superficie des terres arables potentielles puisqu'à partir de la délimitation établie par la Statistique de la superficie 1992/97 (OFS [2004]), aucune donnée directe n'est disponible pour les terres arables (voir aussi le chapitre 2.3). Aussi, en raison de la plus petite superficie « actuelle » des terres arables, les besoins totaux nécessaires aux surfaces arables établis à partir des présents calculs sont probablement surestimés, bien qu'il faille aussi tenir compte du fait que les valeurs obtenues sont valables pour la période de temps à partir de 1980. En plus, les résultats des

calculs de modélisation sont associés à des incertitudes, lesquelles sont définies par les valeurs utilisées pour les paramètres du modèle. De faibles changements de ces valeurs peuvent conduire par effet d'addition à des différences significatives des besoins annuels.

Pour l'instant, la Statistique de la superficie fournit des données actualisées, mais uniquement pour 50 % de la superficie suisse. Dans la nouvelle base de données provenant de la Statistique de la superficie 2004/09, les terres arables sont définies pour la première fois comme classe séparée d'utilisation des sols. En conséquence, il est recommandé de réaliser les prochaines études de modélisation sur les besoins en irrigation en respectant les conditions actuelles et en employant les données d'utilisation des sols actualisées.

Les études régionales à venir devraient pouvoir bénéficier de cartes plus détaillées avec une résolution plus faible. Ces cartes qui existent déjà pour de nombreuses régions suisses pourraient remplacer au moins régionalement la carte d'aptitude des sols en Suisse (assez grossière) qui est utilisée dans la présente étude (OFS [2004]).

Le modèle utilisé dans le présent projet s'est révélé être un outil approprié pour définir de façon ciblée les besoins en irrigation. Ce modèle permet à l'utilisateur de définir les besoins en irrigation différenciés par type de culture selon le type de surface (terres arables, prairies) tant pour des périodes passées que pour des périodes futures. En conclusion, l'application de la méthode utilisée dans cette étude peut être considérée comme un outil de planification et de décision efficace applicable à l'échelle locale ou régionale.

6 Bibliographie

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2001): Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik), BAFU (Bundesamt für Umwelt), ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (Hrsg.) (2002): Nachhaltige Entwicklung messen: Einblick in MONET – das Schweizer Monitoringsystem. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004): Die Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz. Überarbeitung 2000. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik), BAFU (Bundesamt für Umwelt), ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (Hrsg.) (2002): Nachhaltige Entwicklung messen: Einblick in MONET – das Schweizer Monitoringsystem. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004): Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz. Neuchâtel
- Bohne, K. & Stüdemann, O. (1973): Ein Beitrag zur Bestimmung der Beregnungsbedürftigkeit. Arch. Acker- und Pflanzenbau 17, S. 29-43
- CARSEL, R.F. & PARRISH, R.S. (1988): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. – Water Resour. Res. 24: S. 755-769
- DOORENBOES, J. & KASSAM, A.H. (1979): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N°56. Rome, Italy, 193 pp.
- FUHRER, J. & JASPER, K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz. Schlussbericht, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 74 S.
http://www.blw.admin.ch/dokumentation/00018/00112/00504/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEdIR5Wym162epYbg2c_JKbNoKS6A--.
- KOLL, J. (2005): Bodenkundliche Grundlagen von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten. IUP Ingenieure GmbH, Braunschweig
- LÜTTGER, A., DITTMANN, B. & SOURELL, H. (2005): Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Bd. 6, Heft IV, Potsdam
- MASTEL, K. (2002): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 24, Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Rheinstetten, Baden-Württemberg
- MASTEL, K. (2004): Beregnungssteuerung mit Internet. Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Rheinstetten, Baden-Württemberg
- Raes, D. (2002): Yield response to water. Report KuLeuven, Leuven, Belgium, 17 pp.
- 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. & JASPER, K. (2007): Model description WaSiM-ETH [verfügbarer Download unter: http://www.wasim.ch/wasim/products/wasim_description.htm]
- swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004) RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz. Wabern
- 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
- VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ F. J. & YATES S.R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils; EPA-Report 600/2-91/065, U. S. Environmental Protection Agency; ADA, Oklahoma
- WEBER, M. & A. SCHILD (2007): Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bericht zur Umfrage 2006. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, 17 S.

Annexes

A1 Répertoire des tableaux

	Page
Tableau 1: Besoins en irrigation différenciés selon les régions pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris les surfaces utilisées pour l'arboriculture) ; moyennes pour les périodes de végétation 1980-2006 (toutes les données sont en million de m ³).	12
Tableau 2: Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (amplitude, médiane, quantiles 1 et 3) pour l'ensemble des terres agricoles (1980-2006) obtenus chaque fois selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP pour les années de sécheresse de la période 1980-2006 (toutes les données en million de m ³).	14
Tableau 3: Superficies effectives nécessitant une irrigation (%) en tenant compte des variations annuelles ; les surfaces agricoles utiles des régions testées pour 1980-2006 sont évaluées chaque fois au moyen de la méthode de la valeur seuil ET/ETP.	14
Tableau 4: Relation entre les besoins en irrigation calculés et les différentes caractéristiques régionales (toutes les données se rapportent à la superficie agricole totale des régions testées).	16
Tableau 5: Caractéristiques et classes sélectionnées pour réaliser l'extrapolation des besoins en irrigation (les données relatives se rapportant à la superficie sont chaque fois extrapolées à l'ensemble des surfaces agricoles des régions testées).	17
Tableau 6: Extrapolation à l'ensemble des surfaces agricoles utiles en Suisse des quantités d'eau d'irrigation saisonnières spécifiques aux régions (toutes les quantités sont données en million de m ³ et se rapportent à la période 1980-2006).	18
Tableau 7: Besoins en irrigation évalués pour chaque canton selon la méthode ET/ETP (toutes les valeurs sont données en million de m ³ et se rapportent à la période 1980-2006).	20

A2 Répertoire des 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. n_{FK} = capacité au champ utile ; 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 (provoquant une carence en oxygène).	7
Figure 2: Relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau du sol (courbes pF) en fonction de différents types de sol et représentation des besoins en irrigation découlant de cette relation ; les besoins sont déterminés selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP. ET/ETP = évapotranspiration relative, HReduDry = valeur limite de début de stress hydrique, $\Delta\theta$ = besoins en irrigation, FK = capacité au champ, WP = point de flétrissement (figure modifiée selon Koll [2005]).	8
Figure 3: Relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau du sol (courbes pF) en fonction de différents types de sol et représentation des besoins en irrigation	

	découlant de cette relation ; les besoins sont déterminés selon la méthode des «valeurs limites du potentiel hydrique». $\Delta\theta$ = besoins en irrigation, nFK = capacité au champ utile, FK = capacité au champ, WP = point de flétrissement (figure modifiée selon Koll [2005]).9
Figure 4:	Influence du type de sol sur la quantité d'eau d'irrigation: simulation de la dynamique de l'humidité du sol et de la dynamique de l'irrigation selon la méthode de calcul des «valeurs limites fixes du potentiel hydrique» appliquée durant l'année de sécheresse 2003 à un site caractérisé par différents types de sol (région de la Broye, à proximité de Payerne).11
Figure 5:	Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (étendue, médiane, quantiles 1 et 3) pour l'ensemble des terres agricoles (1980-2006) obtenus selon a) la méthode de la valeur seuil ET/ETP et b) la méthode des valeurs limites fixes du potentiel hydrique.13
Figure 6:	Besoins saisonniers en irrigation différenciés par région (étendue, médiane, quantiles 1 et 3) pour les terres arables et les prairies (1980-2006) obtenus selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP (attention aux échelles différentes des axes y).13
Figure 7:	Superficies nécessitant une irrigation saisonnière (gauche) et besoins respectifs en irrigation par ha (droite) différenciés par région pour l'ensemble des terres agricoles utiles (dans les deux cas pour les périodes de végétation 1980-2006), évaluation selon la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quantiles 1 et 3).15
Figure 8:	Variations saisonnières des superficies à irriguer (gauche) et de leurs besoins respectifs en irrigation par ha (droite) pour les terres agricoles utiles (dans les deux cas pour les périodes de végétation allant de 1980 à 2006), différenciés par région et évalués à partir de la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quantiles 1 et 3).15
Figure 9:	Variations saisonnières des superficies à irriguer (gauche) et de leurs besoins respectifs en irrigation par ha (droite) pour les prairies (dans les deux cas pour les périodes de végétation allant de 1980 à 2006), différenciés par région et évalués à partir de la méthode de la valeur seuil ET/ETP (étendue, médiane, quantiles 1 et 3).16
Figure 10:	Répartition spatiale des besoins moyens en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse ; calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006, résolution de 500 m x 500 m.18
Figure 11:	Répartition spatiale des besoins moyens en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse ; calcul pour les périodes de végétation des 3 années les plus sèches comprises entre 1980 à 2006, résolution de 500 m x 500 m.19
Figure 12:	Répartition des besoins en irrigation pour les surfaces agricoles utiles en Suisse : calcul pour la période de végétation de l'année de sécheresse 2003, résolution de 500 m x 500 m.19