



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

Besoins en irrigation en Suisse

Jürg Fuhrer, Karsten Jasper



- Rapport final -
31 mai 2009

Projet: Etude « Besoins en irrigation en Suisse (BI-CH) »

Période rapportée: 01.09.2008 – 31.05.2009

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/dimat (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

Table des matières

	Page
Résumé.....	5
1 Mandat et démarche	7
2 Brève présentation des régions tests	9
2.1 Généralités.....	9
2.2 Le bassin versant de la Thur.....	11
2.3 Le bassin versant de l'Emme.....	11
2.4 Le bassin versant de la Broye	12
2.5 Le bassin versant du Rhône moyen.....	13
2.6 Le bassin versant du Tessin.....	13
2.7 Le bassin versant de la Dischma.....	14
3 Données d'entrée pour l'application du modèle	15
3.1 Séries chronologiques des données	15
3.1.1 Séries chronologiques des données météorologiques.....	15
3.1.2 Séries chronologiques hydrologiques.....	16
3.2 Séries des données de superficie sous forme de grille.....	16
3.2.1 Séries des données de base.....	16
3.2.2 Analyse topographique du modèle d'altitude.....	16
3.2.3 Reclassification des données d'utilisation des sols.....	19
3.2.4 Classification des sols.....	22
3.2.5 Grille des données et grille du modèle.....	25
4 Simulation dans les régions tests	26
4.1 Mise en place des calculs de modélisation.....	26
4.2 Calibration du modèle.....	28
4.2.1 Démarche.....	28
4.2.2 Résultats pour les régions tests	29
4.3 Résultats de la validation du modèle et de la simulation à long terme.....	30
4.3.1 Démarche.....	30
4.3.2 Résultats pour les régions tests	31
5 Evaluation des besoins en irrigation différenciés par surface.....	33
5.1 Extrapolation des résultats de simulation spécifiques aux régions.....	33
5.2 Analyses des tendances à la sécheresse	38
6 Evaluation	42
7 Bibliographie.....	44
8 Annexes.....	46
A: Glossaire.....	47
B: Stations de débit utilisées pour la calibration du modèle.....	49
C1: Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 - Nomendature.....	50
C2: Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 - Reclassification.....	51
D: Définition des unités cartographiques selon les BEK200.....	53
E1: Moyenne de ET/ETP pour des terres arables.....	58

E3: Quantile de ET/ETP pour les terres arables.....	60
E4: Quantile de ET/ETP pour les prairies.....	61
E5: Quantile 20% de ET/ETP pour les terres arables.....	62
E6: Quantile 20% de ET/ETP pour les prairies.....	63
E7: Quantile 25% de ET/ETP pour les terres arables.....	64
E8: Quantile 25% de ET/ETP pour les prairies.....	65
E9: Quantile 33% de ET/ETP pour les terres arables.....	66
E10: Quantile 33% de ET/ETP pour les prairies.....	67
E11: Quantile 50% de ET/ETP pour les terres arables.....	68
E12: Quantile 50% de ET/ETP pour les prairies.....	69
E13: Durée maximal des périodes de sécheresse dans les terres arables.....	70
E14: Durées maximales des périodes de sécheresse dans les prairies.....	71
F: Répertoire des tableaux.....	72
G: Répertoire des Figures.....	73

Résumé

La demande en irrigation augmente et augmentera encore à l'avenir, en raison du changement climatique. Pour la planification, il est indispensable de disposer de données sur cette évolution. À l'aide d'un modèle de calcul hydrologique, des données ont été établies pour la période 1980 – 2006 sur toute la Suisse. Combinées à différents indicateurs de sécheresse, des cartes sous forme de grille de 500 m x 500 m indiquent les risques liés aux pertes de rendement pour les terres arables et pour les prairies.

Pour assurer les rendements des récoltes en Suisse, 38'000 hectares de terres agricoles utiles sont aujourd'hui déjà irrigués régulièrement et 12-17'000 hectares le sont occasionnellement. À l'avenir, cette situation pourrait changer. En raison du changement climatique, de nombreux agriculteurs pourraient voir accroître leurs besoins en irrigation. Sur la base des scénarios climatiques établis pour la Suisse, les précipitations estivales devraient diminuer en moyenne de 20 % jusqu'en 2050. En même temps, l'élévation de la température de plusieurs degrés et l'augmentation du rayonnement devraient favoriser l'évapotranspiration potentielle. En interaction avec cette évolution, les déficits croissants d'eau vont avoir des effets négatifs sur les rendements des plantes cultivées sensibles. Sous les conditions climatiques qui ont prévalu en 2003, souvent considérées comme représentatives de ce qui devrait se passer vers la fin du siècle, les pertes de rendement ont avoisiné en moyenne les 20% et même les 50 % dans les situations extrêmes.

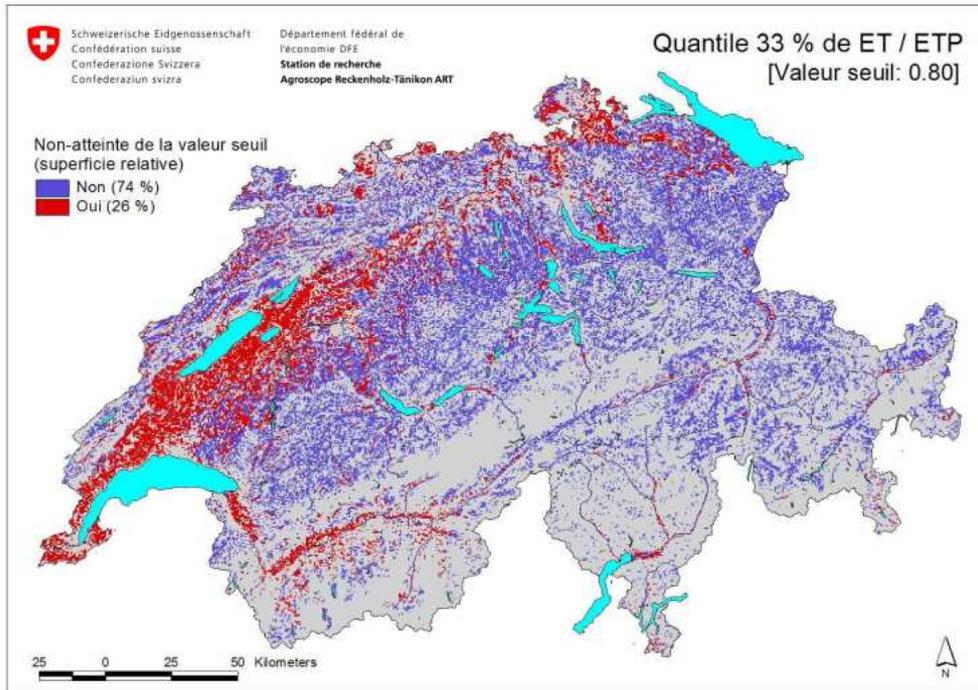
L'accroissement de ces nouveaux besoins pourrait générer des problèmes d'ordre économique et écologique et, par ailleurs, l'utilisation de l'eau pourrait constituer un potentiel accru de conflit entre l'économie et la société. D'où l'importance de développer des bases et des critères objectifs pour évaluer les besoins actuels et futurs en irrigation de l'agriculture suisse. C'est pour cette raison que la Station de recherche Agrocospe Reckenholz-Tänikon ART a été mandatée par la Confédération et par plusieurs cantons pour réaliser une première étude, visant à analyser et calculer les besoins actuels en irrigation de plusieurs régions agricoles. Cette étude a pris en compte les données climatiques interpolées spatialement, les propriétés topographiques et pédologiques, ainsi que les exigences liées aux grandes cultures et aux prairies (et sous une forme simplifiée l'arboriculture).

À l'aide du modèle hydrologique WaSiM-ETH¹ orienté vers une différenciation par surface, il a été effectué des calculs au pas de temps journalier et de résolution de 500 m x 500 m. Ce modèle reflète l'état actuel des connaissances dans la modélisation hydrologique des bassins versants. À l'aide de ses composantes physiques, il génère des calculs spatio-temporels détaillés de tous les cours d'eau d'importance hydrologique, avec en particulier une illustration proche de la réalité de la dynamique de l'eau et du régime hydrique des sols. Cette étude a été réalisée à l'échelle suisse selon une démarche en deux temps. Dans un premier temps, le modèle a été calibré puis testé à partir de données de débit et d'humidité du sol observées dans six régions de caractéristiques et d'emplacement différents. Dans un deuxième temps, les résultats de la calibration obtenus au niveau régional ont été reportés à l'ensemble de la Suisse à l'aide d'une méthode statistique, puis utilisés pour calculer le régime hydrique couvrant l'ensemble du territoire.

Le rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle (ET/ETP) a été choisi comme unité de calcul pour représenter le degré de sécheresse, paramètre déterminant du rendement. Cette unité intègre également les conditions climatiques d'évapotranspiration et l'influence de la disponibilité de l'eau du sol pendant la période de végétation. Par ailleurs, il existe une relation directe entre ce rapport et la baisse de rendement. Plus le rapport est faible, plus le rendement risque de diminuer, en raison de l'insuffisance de l'approvisionnement en eau. Finalement, un compromis a été trouvé avec le mandant pour fixer à 0.8 la valeur seuil du rapport ET/ETP.

¹ <http://www.wasim.ch>

La carte ci-après représente les régions agricoles qui se situent au-dessous du seuil critique de 0.8 pendant la période de végétation au cours d'un tiers des 27 années examinées (quantile 33%), ce qui équivaut aux régions connaissant une baisse de rendement une année sur trois. La superficie touchée représente 26% de l'ensemble de la surface utilisée, dont la plus grande partie se situe dans les régions recouvertes par les terres arables de l'ouest du Plateau, dans le Valais ainsi que dans des petites vallées intra-alpines.



Carte des besoins en irrigation de la Suisse sur la base de la non-atteinte de la valeur seuil pour le rapport ET/ETP pendant un tiers des années 1980-2006 (quantile 33%)

La différenciation régionale des besoins en irrigation reflète la distribution des conditions climatiques et des propriétés des sols ainsi que la hauteur de l'emplacement et la répartition variable des terres arables et des prairies. A partir de ces données, il a été établi un modèle à grande échelle illustrant l'évolution chronologique des besoins en irrigation pendant les dernières 27 années. Cependant, pour l'analyse détaillée d'un site ou d'une culture en particulier, il est indispensable d'effectuer des calculs supplémentaires intégrant les données locales.

Il est intéressant de prendre en considération non seulement la fréquence de la non-atteinte du seuil du rapport ET/ETP, mais aussi sa durée, c'est-à-dire la longueur et l'intensité d'une période de sécheresse. Pour cette raison, mais aussi pour définir des comportements (tendances), il a été réalisé des analyses, différenciées par surface, de la durée de la non-atteinte du seuil ET/ETP. Les calculs sur la période de sécheresse c'est-à-dire la longueur de la période pendant laquelle on observe une non-atteinte durable de la valeur du seuil critique de 0.8 pour les terres arables, indiquent que, sans irrigation supplémentaire, de nombreuses superficies de terres arables sont aujourd'hui déjà régulièrement au-dessous du seuil critique de sécheresse, pendant plusieurs semaines consécutives, voire pendant des mois. Supérieures en moyenne à 60 jours, les plus longues périodes de sécheresse ont été mises en évidence dans le Seeland et en Suisse occidentale. Dans ces régions, les longueurs maximales se situent entre 150 et 200 jours.

Les données existantes indiquent que, dans de nombreuses régions, l'irrigation est aujourd'hui déjà nécessaire, pour éviter de fréquentes pertes de récolte, particulièrement dans les terres arables. Du fait du changement climatique, les surfaces touchées devraient encore augmenter ces prochaines décennies, entraînant du même coup une augmentation de la demande en irrigation.

1 Mandat et démarche

Du fait du changement climatique, l'agriculture suisse sera confrontée à l'avenir à des besoins accrus en irrigation. Outre les problèmes d'ordre économique et écologique, cette situation devrait également générer un plus fort potentiel de conflit concernant l'utilisation de l'eau. Il est donc primordial de trouver des bases et des critères objectifs pour procéder à l'évaluation des besoins en irrigation actuels et futurs des cultures agricoles.

Le mandat relatif à la présente étude portait sur l'établissement de bases de décision solides pour évaluer les besoins en irrigation de l'agriculture suisse. A cet effet, il s'agissait d'analyser et d'évaluer dans les grandes lignes les régions affectées à l'agriculture en Suisse, à l'aide de données, d'outils et de méthodes appropriées, en vue de connaître leurs besoins en irrigation. Les travaux devaient prendre en compte les aspects (données) climatologiques, topographiques et pédologiques, ainsi que les exigences de la végétation (terres arables et prairies).

Les modèles hydrologiques orientés vers la modélisation différenciée par surface ont offert une approche intéressante pour résoudre la problématique posée. Ainsi le modèle WaSiM-ETH se rapportant au débit et au régime hydrique (Schulla [1997], Schulla & Jasper [2007], cf. également www.wasim.ch) a logiquement été utilisé dans le cadre de cette étude. D'une grande flexibilité d'utilisation, ce modèle reflète l'état actuel des connaissances en matière de modélisation hydrologique orientée processus des bassins versants. Ce modèle à base physique permet une simulation spatio-temporelle détaillée de tous les flux d'eau d'importance hydrologique. La simulation proche de la réalité de la dynamique de l'eau et du régime hydrique des sols rend ce modèle particulièrement intéressant. Cet avantage associé au nombre relativement faible des données qu'il exige font que le modèle WaSiM-ETH était prédestiné à être utilisé dans ce projet. Atout supplémentaire, le mandataire avait accumulé une vaste expérience dans l'utilisation de ce modèle - au cours d'études réalisées sur les effets du changement climatique en Suisse (Jasper et al. [2004], [2006]).

Les travaux de modélisation liés aux exigences du mandat avaient pour objectif la simulation à long terme et continue des régimes hydriques de l'ensemble de la Suisse. Les analyses de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration actuelle (ET) différenciées par surface étaient les valeurs choisies pour cette étude. Le rapport de ces deux valeurs - ET/ETP ou évapotranspiration relative pour la période de végétation - est un indicateur approprié qui est souvent utilisé pour évaluer les diminutions de récolte dues à la sécheresse (FAO Irrigation and Drainage Paper No 33). Il se trouve en relation directe avec le rapport entre la récolte actuelle et la récolte potentielle (Y_{actuel}/Y_{max}) des cultures agricoles (Raes [2002]) et avec le facteur de proportionnalité K_y , spécifique à chaque culture (Dorenboos & Kassam [1979]).

$$1 - \frac{Y_{actuel}}{Y_{max}} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ETP} \right)$$

Cette équation permet d'estimer le paramètre « besoin en irrigation » en utilisant le critère de la « baisse de rendement » (Cf. figure 1). Le rapport intègre d'une part les conditions climatiques qui influent sur l'évapotranspiration et d'autre part les facteurs locaux qui peuvent réduire la capacité de transpiration des végétaux, en particulier la teneur en eau disponible du sol.

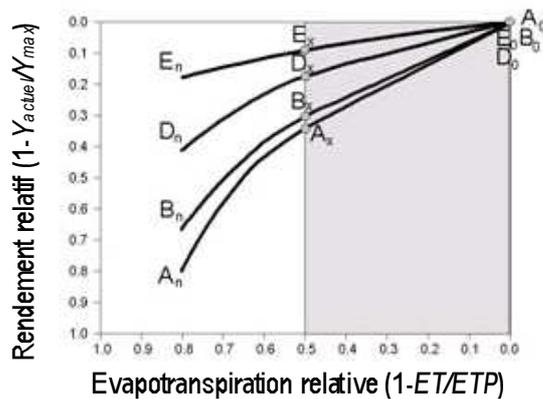


Figure 1: Relation entre l'évapotranspiration relative (ET/ETP) et le rendement relatif des cultures agricoles (Y_{actuel}/Y_{max}). Les situations A_n et E_n représentent différentes conditions environnementales : d'optimales (A_n) à mauvaises E_n . Ces relations sont considérées comme étant linéaires jusqu'à ce que le rapport (ET/ETP) atteigne la valeur de 0.5 (Raes [2002]).

En accord avec le mandat, la valeur critique de 0.8 a été choisie comme critère ET/ETP pour estimer les besoins en irrigation de la plupart des terres arables et des prairies. Il a en outre été adopté un critère de sécheresse, défini par la durée (nombre de jours, moyenne et valeur maximale) de la non-atteinte de la valeur critique de 0.8, avec tolérance d'une période d'interruption maximale de 2 jours.

Pour réaliser une simulation au pas de temps journalier, de résolution spatiale de 500 m x 500 m, la période 1980 - 2006 a été choisie comme référence. Comme la modélisation du régime hydrique de la Suisse nécessiterait un très gros investissement du fait de cette haute résolution et des détails planifiés, une démarche en deux temps a été choisie, en accord avec le mandat.

Dans la 1^{ère} étape, le modèle a été calibré pour 6 bassins versants suisses ayant des caractéristiques et des emplacements différents, ensuite il a été validé avec des données indépendantes, puis le modèle a été utilisé pour calculer les valeurs ET/ETP de chaque maille de la grille. Dans la 2^e étape, les indicateurs ET/ETP obtenus pour les bassins versants sont reportés à l'aide d'une régression multiple sur l'ensemble de la surface cultivable suisse, puis ils sont utilisés pour effectuer les analyses différenciées par surface des besoins en irrigation et des risques de sécheresse.

Les applications du modèle ont été faites à l'échelle de 500 m, au pas de temps journalier et de façon continue durant une période de 27 ans. Dans le cadre de cette étude, l'évaluation des données statistiques a été réalisée sur la base de la période de végétation (le début de la végétation était dépendant de la température). Les terres cultivables agricoles ont été analysées à la fois dans leur ensemble et séparément pour les terres arables et les prairies.

Le présent rapport documente tout d'abord l'utilisation du modèle WaSiM-ETH (version 8.3.2, selon Richard) pour les bassins versants choisis (Thur, Emme, Broye, Rhône moyen, Tessin et Dischma). Après la présentation des régions testées au chapitre 2, le chapitre 3 décrit le tri et la préparation des bases de données existantes conformément aux besoins du modèle. La documentation de la configuration, la calibration et la validation du modèle pour les régions testées sont présentées au chapitre 4. Le chapitre 5 traite de l'extrapolation à l'ensemble des surfaces agricoles suisses des modèles ET/ETP calculés au niveau régional. Enfin, le chapitre 6 présente un résumé et l'évaluation des résultats de l'étude.

2 Brève présentation des régions tests

2.1 Généralités

En raison de leur situation géographique spécifique, les bassins versants choisis (Cf. figure 2) pour l'utilisation du modèle se distinguent par leurs propriétés régionales et par là même par leurs utilisations agricoles. Ils reflètent fidèlement les différentes conditions auxquelles l'agriculture suisse est soumise. Les conditions sont ainsi réunies pour appliquer leurs résultats à l'ensemble de l'agriculture suisse.

Les régions tests couvrent une superficie allant de 43 à 1700 km² (Cf. tableau 1). La fourchette d'altitude varie entre 220 et 4435 m s. m. Les bassins versants sur le côté sud des Alpes (Rhône, Tessin, Dischma) s'élèvent en moyenne à plus de 1000 m au-dessus de celles qui prévalent dans la région du Plateau (Thur, Emme, Broye). Ils sont donc caractérisés par un relief plus accentué que celui des bassins versants situés au nord des Alpes.

La partie des surfaces cultivables représente 13 à 64% de l'ensemble de la superficie de ces régions. Dans les bassins versants du Sud de la Suisse situés sur les collines mollassiques, l'agriculture est caractérisée surtout par les prairies, alors que dans le versant nord des Alpes, le Plateau est recouvert principalement de terres arables. Le domaine de la Broye offre le plus grand pourcentage (57%) de surfaces affectées en terres arables.

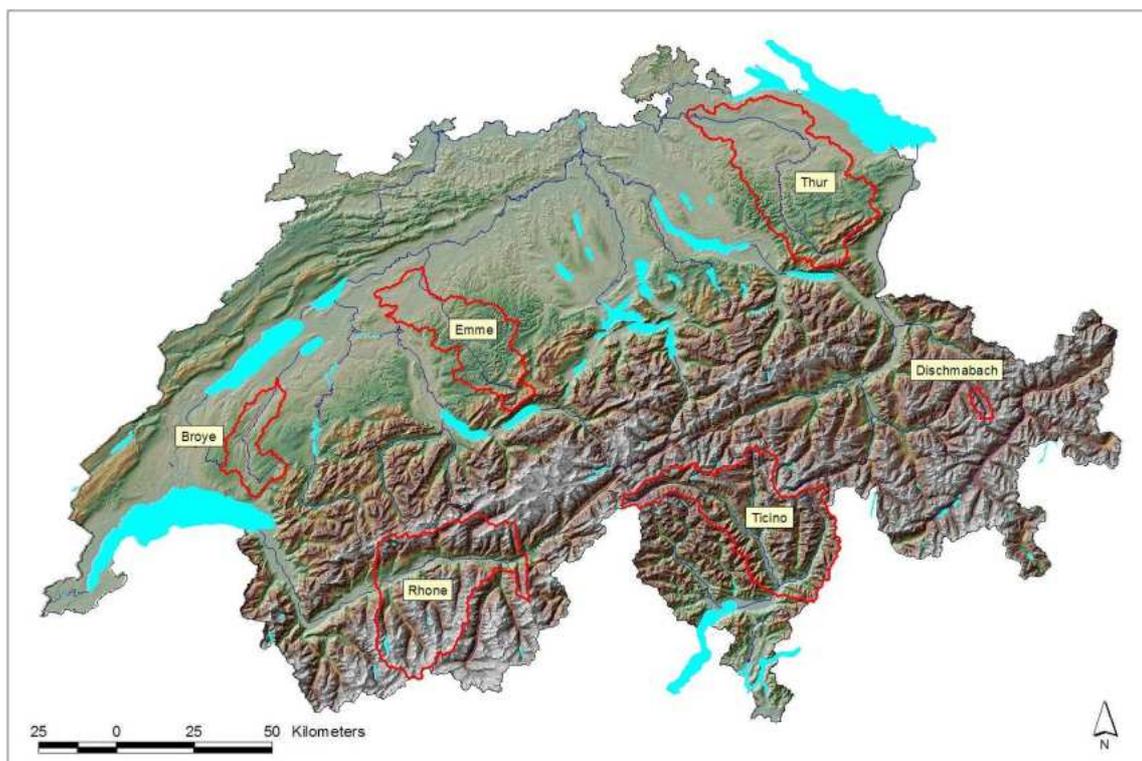


Figure 2: Emplacement des régions tests en Suisse

Tableau 1: Brève caractérisation des régions tests

Bassin versant		Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
Station de jaugeage		Andelfingen	Wiler	Payerne	Sion	Bellinzona	Kriegsmatte
Topographie							
Superficie	(km ²)	1696	939	392	1574	1515	43.3
Point le plus haut	(m s. m.)	2504	2221	1504	4435	3402	3146
Point le plus bas	(m s. m.)	356	458	441	484	220	1668
Altitude moyenne	(m s. m.)	770	860	710	2066	1680	2372
Pente moyenne	(degré)	9.5	10.1	5.6	24.3	27.9	24.6
Utilisation du sol^b							
Bâti	(%)	9.0	6.8	6.8	3.5	2.6	0.6
Forêt	(%)	26.9	35.3	25.5	23.9	37.8	3.9
Terre arable	(%)	36.4	27.4	57.1	0.2	0.5	-
Prairie	(%)	18.8	24.1	7.0	16.7	12.4	27.1
Rocher	(%)	1.1	0.8	-	29.2	18.9	41.2
Glacier	(%)	-	-	-	8.4	0.7	2.1
Débit^c							
Minimum	(m ³ s ⁻¹)	2.24	2.26	0.11	17.1	10.6	0.08
Moyen	(m ³ s ⁻¹)	47.0	19.3	7.8	112	67.7	1.7
Maximum	(m ³ s ⁻¹)	1130	663	415	910	1500	19.1
Climat^d							
Précipitations annuelles	(mm)	1564	1402	1300	1200	1959	1324
Température moyenne annuelle	(°C)	7.6	7.2	8.4	2.1	4.3	-0.4

^a Bases de données du modèle RIMINI (swisstopo [2004]; Cf. aussi chapitre 3.2.2)

^b Bases de données des statistiques de la superficie 1992/97 (OFS [2001]; Cf. aussi chapitre 3.2.3)

^c Données de l'Annuaire hydrologique de la Suisse 2007 (OFEV [2008])

^d Moyenne calculée pour la période de simulation 1980 – 2006

^e Extrait entre Brigue et Sion (sans les régions latérales des affluents Vispa-Viège et Lonza-Blatten)

2.2 Le bassin versant de la Thur

Principalement recouvert de terres agricoles, le bassin versant de la Thur se situe au nord-est de la Suisse entre le lac Walensee au sud, la vallée de l'Alpenrhein à l'est, le lac de Constance au nord et les chaînes de montagne du Toggenbourg à l'ouest (Cf. figure 3). Jusqu'à la station de jaugeage d'Andelfingen, la région de la Thur a une superficie de 1700 km². Du nord au sud, le caractère montagneux s'intensifie. Les régions inférieure et moyenne appartiennent au Plateau, alors que la partie supérieure présente un caractère alpin. 81% de la superficie de ce bassin versant se trouvent au-dessous de 1000 m s. m. Une superficie de 10 km² se trouve au-dessus de 2000 m s. m. ce qui correspond à 0.6% de la surface totale du bassin versant. A cette altitude, la pente peut atteindre des valeurs proches de 60°. L'ensemble du bassin est caractérisé par une pente moyenne de 9.5° ou 17%.

La Thur a une longueur d'environ 127 km. Au-dessous du lac de Constance, c'est l'affluent le plus important du Rhin. La partie alpine du sud-ouest est géologiquement caractérisée par des calcaires et des couches de sols plats. Du fait de leur forte dénivellation, ces sols plats, peu perméables à l'eau et à faible capacité de rétention d'eau, déclenchent de rapides réactions d'écoulement, lors de fortes précipitations. Ces réactions sont atténuées en temps et en quantité par les étendues de karsts (Cf. détails dans Schulla [1997]).

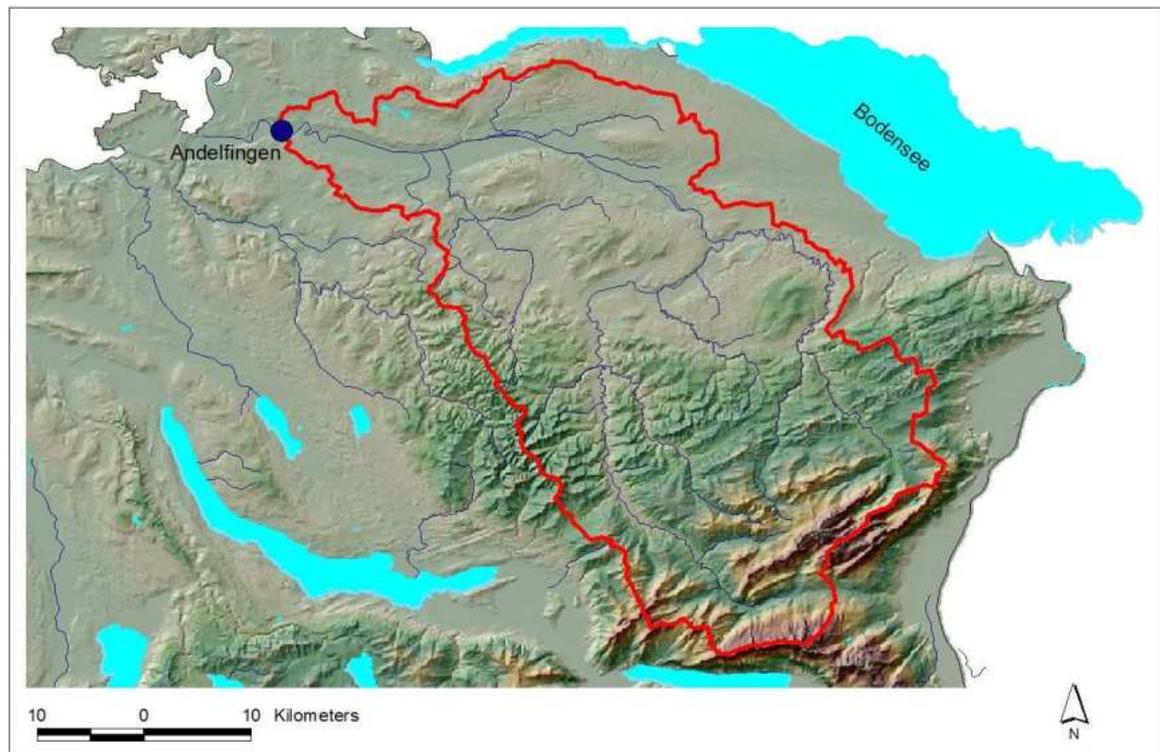


Figure 3: Région de la Thur jusqu'à la station de jaugeage d'Andelfingen

2.3 Le bassin versant de l'Emme

L'Emme prend sa source à Hohgant en bordure des Alpes, puis coule dans l'Emmental et traverse une partie du Plateau. Après un parcours proche de 80 km, elle se jette dans l'Aare au-dessous de Soleure. L'Emme présente les caractéristiques d'un cours d'eau préalpin ; les sections situées dans les emplacements les plus hauts ont un comportement analogue à des torrents. La superficie du bassin versant de l'Emme située à une altitude inférieure à 1000 m s. m. est de 74%. Les régions situées à basse altitude sont recouvertes principalement de terres ouvertes.

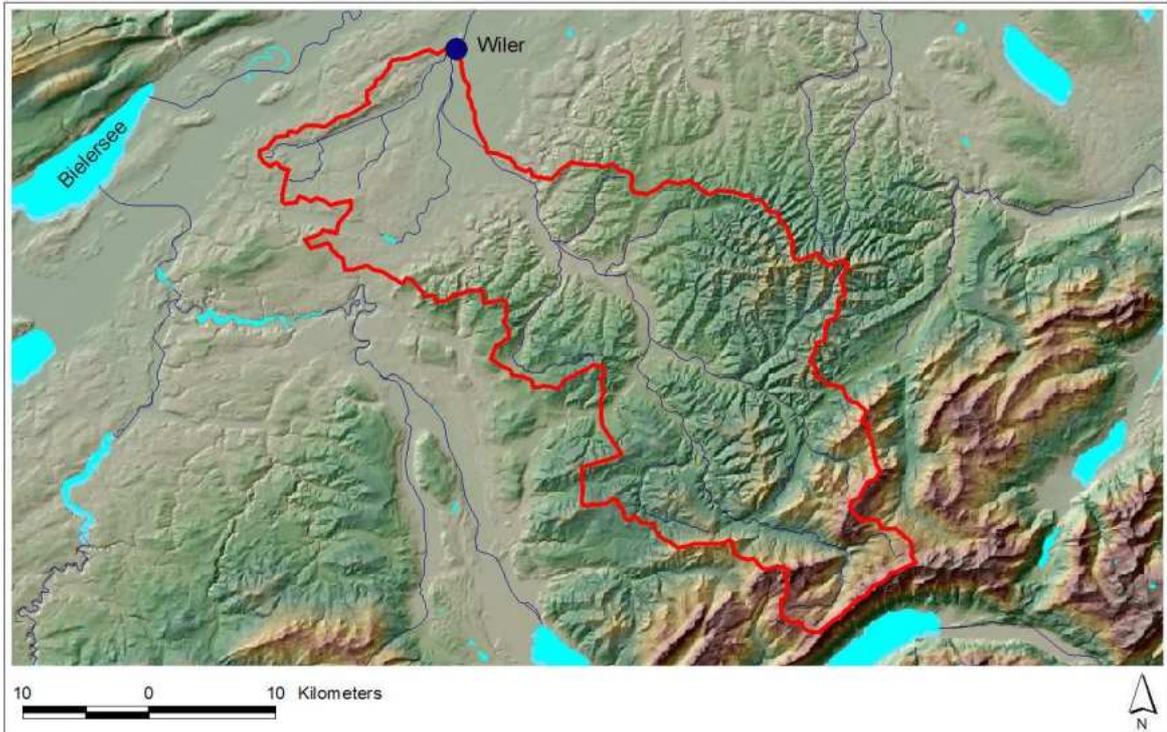


Figure 4: Région de l'Emme jusqu'à la station de jaugeage de Wiler

2.4 Le bassin versant de la Broye

La Broye est une rivière de 79 km de long, située dans la partie ouest du Plateau suisse. Elle prend sa source dans les Préalpes fribourgeoises, puis elle entre dans le fond de vallée à Moudon et coule en direction nord-est jusqu'au lac de Morat. Au-dessus du lac de Morat, le bassin couvre une surface d'environ 570 km²; jusqu'à la station de jaugeage de Payerne la superficie en amont est de 392 km². Comme la région de l'Emme, la région de la Broye est recouverte principalement de surfaces agricoles. Au-dessus de Payerne, elles occupent une superficie de 66% dont 87% sont affectées aux terres arables.

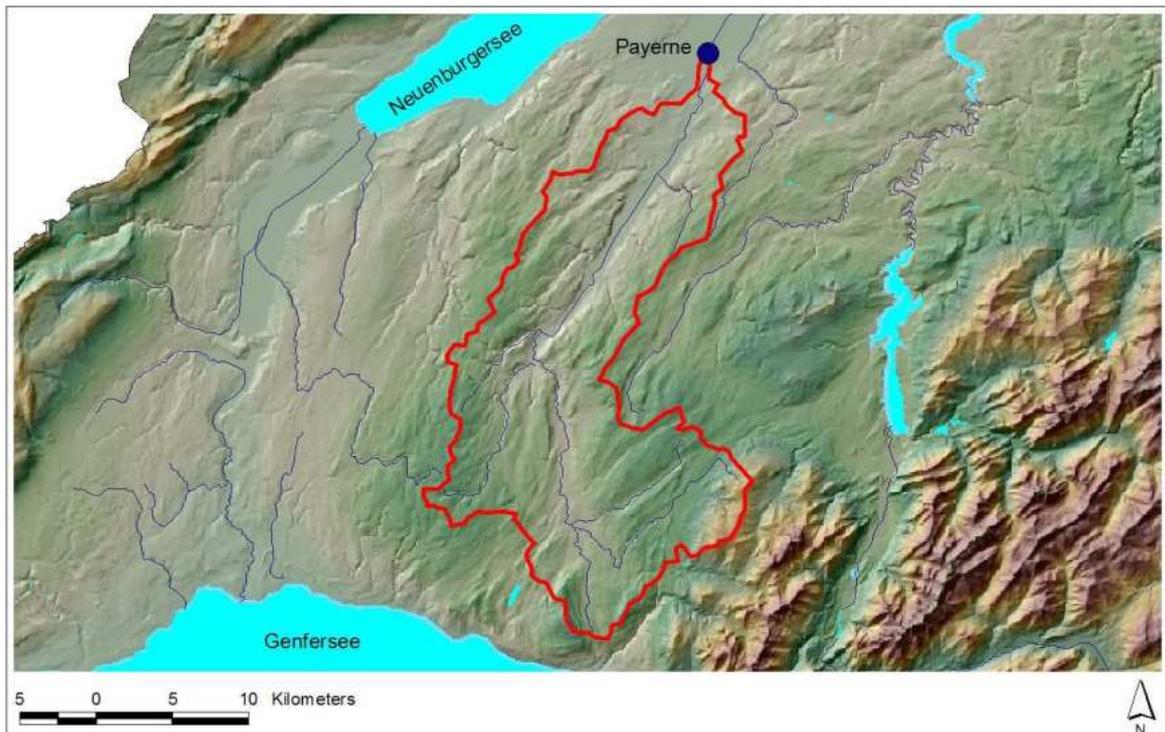


Figure 5: Région de la Broye jusqu'à la station de jaugeage de Payerne

2.5 Le bassin versant du Rhône moyen

La section testée du bassin du Rhône (section entre Brigue et Sion) couvre une superficie de 1574 km² (sans les régions de haute montagne des affluents de Vispa-Viège et Lonza-Blatten). Elle se caractérise par des conditions topographiques extrêmes. On mesure des différences d'altitude jusqu'à 4000 m entre le fond de la vallée et le sommet des frontières délimitées par les régions de haute montagne.

Le taux de couverture glaciaire est de 8% dans cette section. Il est très inférieur à celui qui s'observe en amont de Sion. La couverture glaciaire de l'ensemble du bassin versant du Rhône (3373 km²) excède 18% (données de l'OFEV [2008]).

Les surfaces agricoles cultivables se trouvent principalement dans les vallées. Cependant, du fait des risques d'inondation, les sols profonds ou de profondeur moyenne de cette région sont peu utilisés comme terres arables. Ils sont majoritairement affectés à des prairies et à l'arboriculture. En dehors des vallées, l'exploitation agricole n'est encore que partiellement possible, en raison du relief et des sols peu développés. Dans la région du Rhône, la viticulture tire profit de conditions climatiques favorables caractérisées par un rayonnement supérieur à la moyenne.

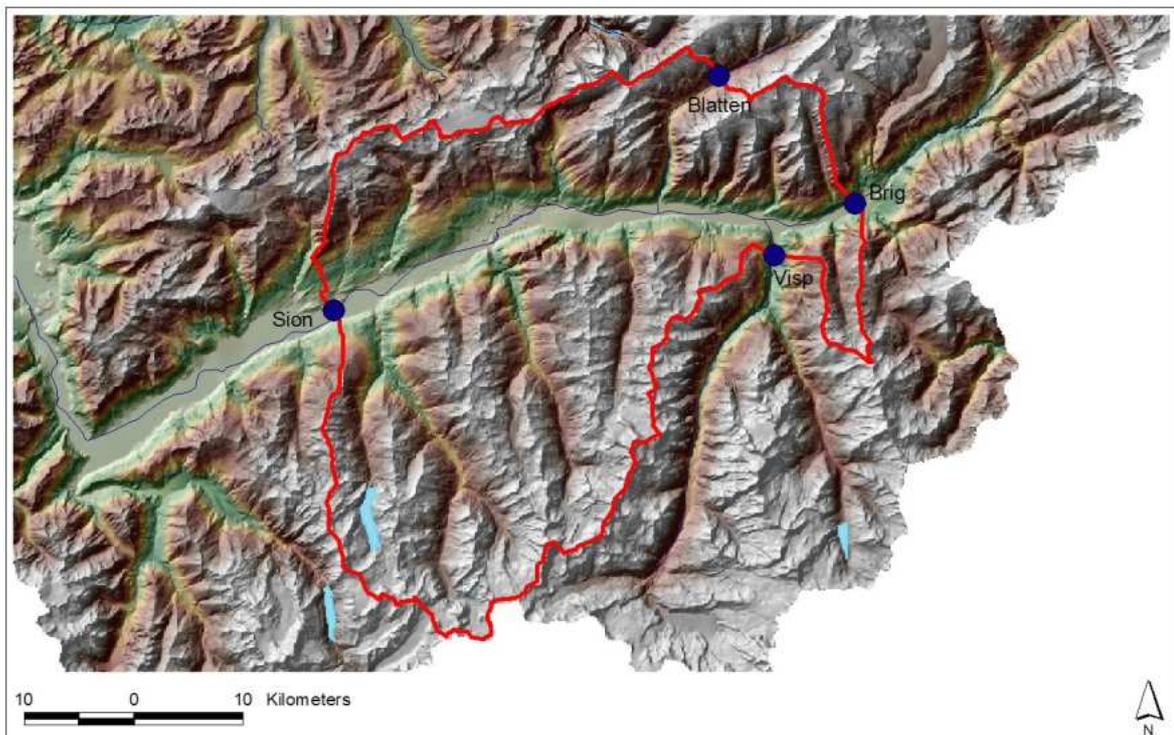


Figure 6: Région du Rhône moyen avec emplacement des stations de jaugeage utilisées

2.6 Le bassin versant du Tessin

S'étendant sur 1515 km², le domaine du Tessin se situe sur le versant sud des Alpes. De par cette situation particulière, il est caractérisé par de fortes variations climatiques et hydrologiques. Les conditions climatiques se définissent par de très fortes précipitations et de longues périodes de sécheresse.

La région est caractérisée par une topographie marquée: des différences d'altitude de plus de 3000 m et une pente moyenne d'environ 28°. Près de 80% de cette région se situent au-dessus de 1000 m s. m. Les sols sont principalement légers et sablo-limoneux. La forêt représente la principale exploitation du sol (38%). Les surfaces agricoles sont surtout couvertes de prairies qui occupent 12% de la superficie totale.

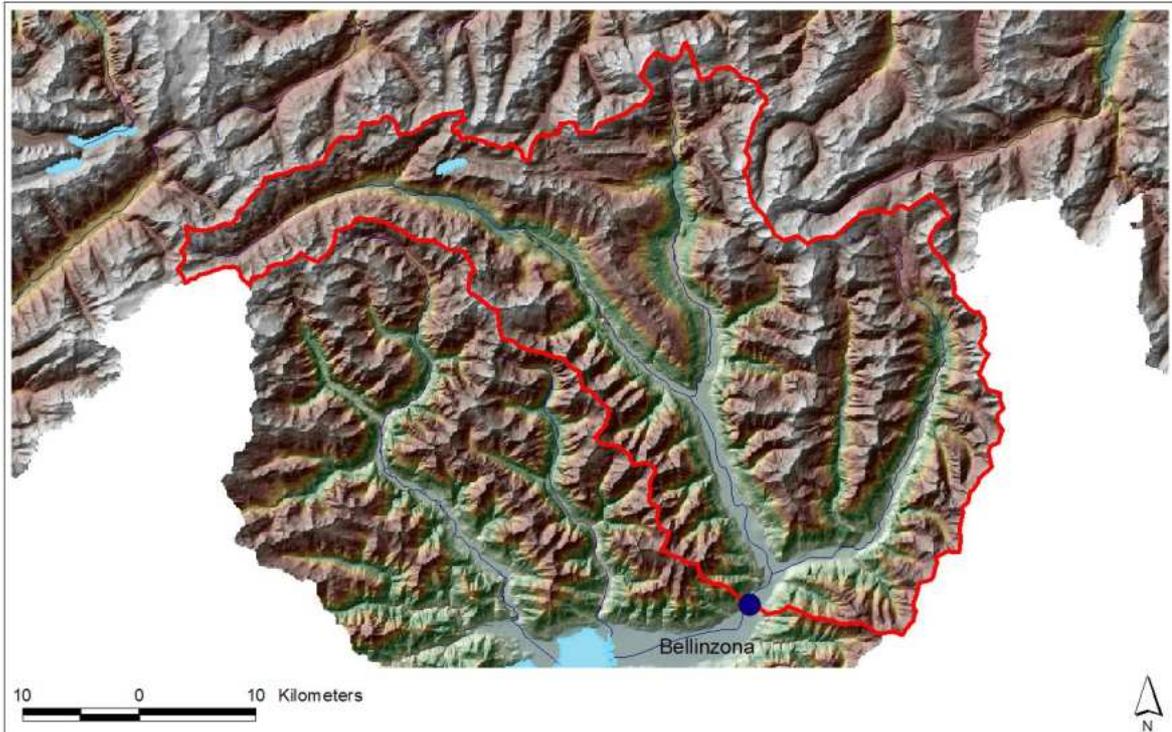


Figure 7: Région du Tessin jusqu'à la station de jaugeage de Bellinzona

2.7 Le bassin versant de la Dischma

Le Dischmabach est un affluent du Rhin de quelque 15km de long. Il draine la haute vallée de la Dischma. Jusqu'à la station de jaugeage de Kriegsmatte, le bassin versant de la Dischma a une superficie proche de 43 km². La vallée de la Dischma se trouve dans une région intermédiaire, située entre les versants nord humides et les versants sud secs des Alpes (Gurtz *et al.* [2003]). Sa principale vallée s'étend du SSO vers le NNO. La région de la Dischma a une altitude moyenne de 2372 m s. m. et une couverture glaciaire de 2.1%. C'est le bassin versant le plus élevé des versants testés.

Les sols de la vallée de la Dischma sont peu développés et se caractérisent principalement par une profondeur égale et inférieure à 50 cm. Les nappes phréatiques se trouvent uniquement à proximité immédiate de la Dischma. La prairie est la forme de végétation qui domine dans la région de la Dischma.

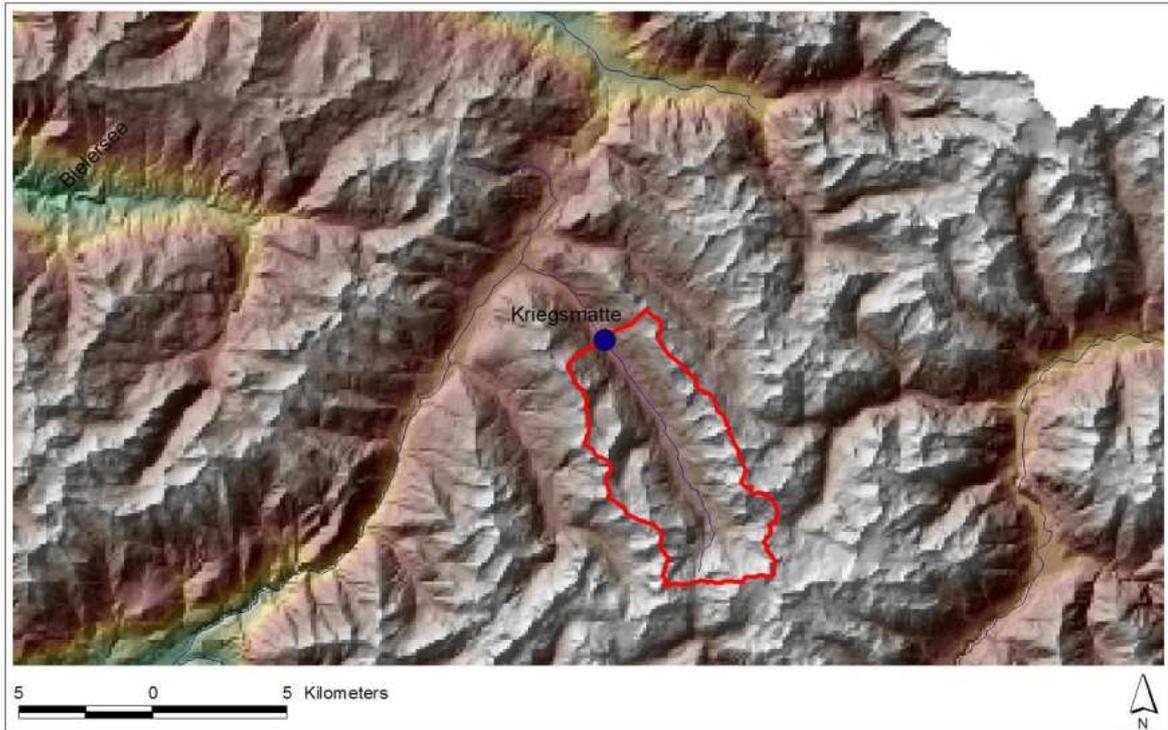


Figure 8: Région de la Dischma jusqu'à la station de jaugeage de Davos-Kriegsmatte

3 Données d'entrée pour l'application du modèle

3.1 Séries chronologiques des données

3.1.1 Séries chronologiques des données météorologiques

Pour appliquer le modèle, les séries des observations météorologiques effectuées sur plusieurs années dans les différents réseaux de stations de mesure au sol de MétéoSuisse (Office fédéral de la météorologie et de la climatologie) ont été réunies dans la banque de données CLIMAP-net et ont été transformées. Elles avaient été récoltées à partir des réseaux de mesure automatiques (ANETZ, KLIMA, ENET) et du réseau plus dense des stations pluviométriques (NIME). Il est résulté des travaux de préparation des données des tableaux, qui réunissent à l'échelle suisse les valeurs journalières des paramètres météorologiques suivants: précipitations (428 stations), température de l'air (84), vitesse du vent (100), tension de vapeur (61), humidité relative de l'air (86), rayonnement solaire global (68) et durée d'ensoleillement relatif (68). Les séries de données transformées couvrent la période allant du 1^{er} janvier 1980 au 31 décembre 2006. On a déploré l'absence de données, surtout, en ce qui concerne les deux variables «rayonnement global» et «durée d'ensoleillement relatif».

Tableau 2: Nombre des stations disponibles pour l'application du modèle

	CH	Thur	Emme	Broye	Rhône	Tessin	Dischma
Précipitations	428	61	40	21	29	24	3
Température de l'air	84	12	11	11	12	12	2
Vitesse du vent	100	16	17	14	12	14	2
Tension de vapeur	-	11	10	10	-	7	2
Humidité de l'air	86	-	-	-	14	-	-
Rayonnement global	68	11	10	10	8	12	2
Durée d'ensoleillement relatif	68	12	10	10	8	12	2

Les stations d'observation météorologiques enregistrent des mesures à des altitudes situées entre 203 et 3580 m s. m. La plupart étaient situées au-dessous de 1000 m s. m. (69% des stations pluviométriques). Au-dessus de 2000 m s. m. (environ 24% de la superficie de la Suisse), il n'y avait que 2% des stations pluviométriques et environ 10 à 20% des stations climatiques à disposition.

Dans le cadre des analyses chronologiques, la dépendance à l'altitude des variables météorologiques utilisées était plus ou moins marquée (10 à 90%). Par conséquent, l'interpolation spatiale des données mesurées sur la grille du modèle a été réalisée au moyen d'une combinaison pondérée d'une régression dépendant de l'altitude et d'une interpolation pondérée par l'inverse de la distance (Cf. aussi chapitre 4.1). Ces deux transformations sont décrites en détail dans Schulla [1997] et Schulla & Jasper [2007]. Les analyses de régression liées à l'altitude ont été réalisées pour chacune des régions sur la base des grandes régions climatiques de Suisse (Müller [1980]).

3.1.2 Séries chronologiques hydrologiques

Pour le calibrage et la validation du modèle hydrologique, les moyennes journalières de débit (en m³/sec) provenant des séries de mesures continues (1980 - 2006) de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) ont été converties en tableaux de format compatible au modèle WaSiM. Pour l'application du modèle, 26 stations hydrométriques ont été choisies pour la récolte des données de débit : Thur (12 stations), Emme (4), Broye (1), Rhône (4), Tessin (4), Dischma (1). Ces stations sont présentées à l'annexe B.

3.2 Séries des données de superficie sous forme de grille

3.2.1 Séries des données de base

Les données spatiales nécessaires à l'application du modèle de simulation proviennent des séries de données de la superficie de la Suisse de maille 100 m x 100 m suivantes:

- données d'altitude interpolées à partir du modèle RIMINI (de maille originale 250 m x 250 m) (swisstopo [2004])
- catégories d'utilisation du sol provenant de la « Statistique suisse de la superficie 1992/1997 » (OFS [2001])
- classifications des données pédologiques de la « Carte digitale des aptitudes des sols de la Suisse » (OFS [2004]).

3.2.2 Analyse topographique du modèle d'altitude

Dans le cadre de la préparation des données, une analyse topographique rigoureuse du modèle d'altitude RIMINI existant à l'échelle nationale a été faite à l'aide de l'outil WaSiM *TANALYS* (Topographique *ANALYS*e) (Schulla [1997]). Cet outil génère le calcul et la correction automatique des séries de données matricielles nécessaires au modèle (p. ex. indinaison, exposition, accumulation de flux et temps de passage) ainsi que les structures spatiales (données de la géométrie des cours d'eau avec profondeur, largeur, longueur et dénivellation des bassins ainsi que données de rétention). Après définition des stations de jaugeage (voir annexe B), la structure des bassins versants et celle de leur section pourront être générées à partir des données du modèle d'altitude. Puis ces structures pourront, à leur tour, être classées en produits d'analyse différenciés par surface (p. ex. sommes des temps de passage spécifique à une sous-région, pentes des bassins par rapport aux différentes classes d'altitude) et en structures de routage (p. ex. les paramètres du bassin par rapport aux sections des cours d'eau et les relations entre les trajets de routage).

Les travaux d'analyse topographique se sont déroulés à l'échelle de l'ensemble de la Suisse ainsi qu'à celle de chacune des régions tests. Les résultats présentés ci-après pour la région de la Thur en sont une illustration.

Dans l'utilisation actuelle du modèle, la superficie de la région de la Thur est délimitée par la station d'Andelfingen qui représente le site de mesure du débit de la Thur situé le plus en amont du fleuve avant son embouchure dans le Rhin. Les résultats de l'analyse topographique réalisée sur la région de la Thur-Andelfingen génèrent un bassin versant d'une superficie de 1699 km². Comparée avec les données de l'Annuaire hydrologique de la Suisse (OFEV, 2008), cette superficie présente un écart de seulement 0.2%, ce qui correspond au seuil de tolérance d'erreur le plus bas.

Le modèle d'altitude dérivé de la Thur est représenté à la figure 9. Il indique une altitude moyenne de 769 m et une fourchette d'altitudes allant de 361 m à 2458 m (Cf. figure 10). La pente moyenne calculée est de 9.5° (Cf. figure 11).

La région de la Thur comprend 12 stations de mesures de débit en continu. Ces stations, plus une station virtuelle (ajoutée artificiellement), servent à découper la région de la Thur en 13 sous-bassins versants (Cf. figure 12). Un de ces sous-bassins (10) représente la région de recherche bien connue de Rietholzbach. Les superficies des sous-bassins se situent entre 3.3 et 318 km² (Cf. tableau 3).

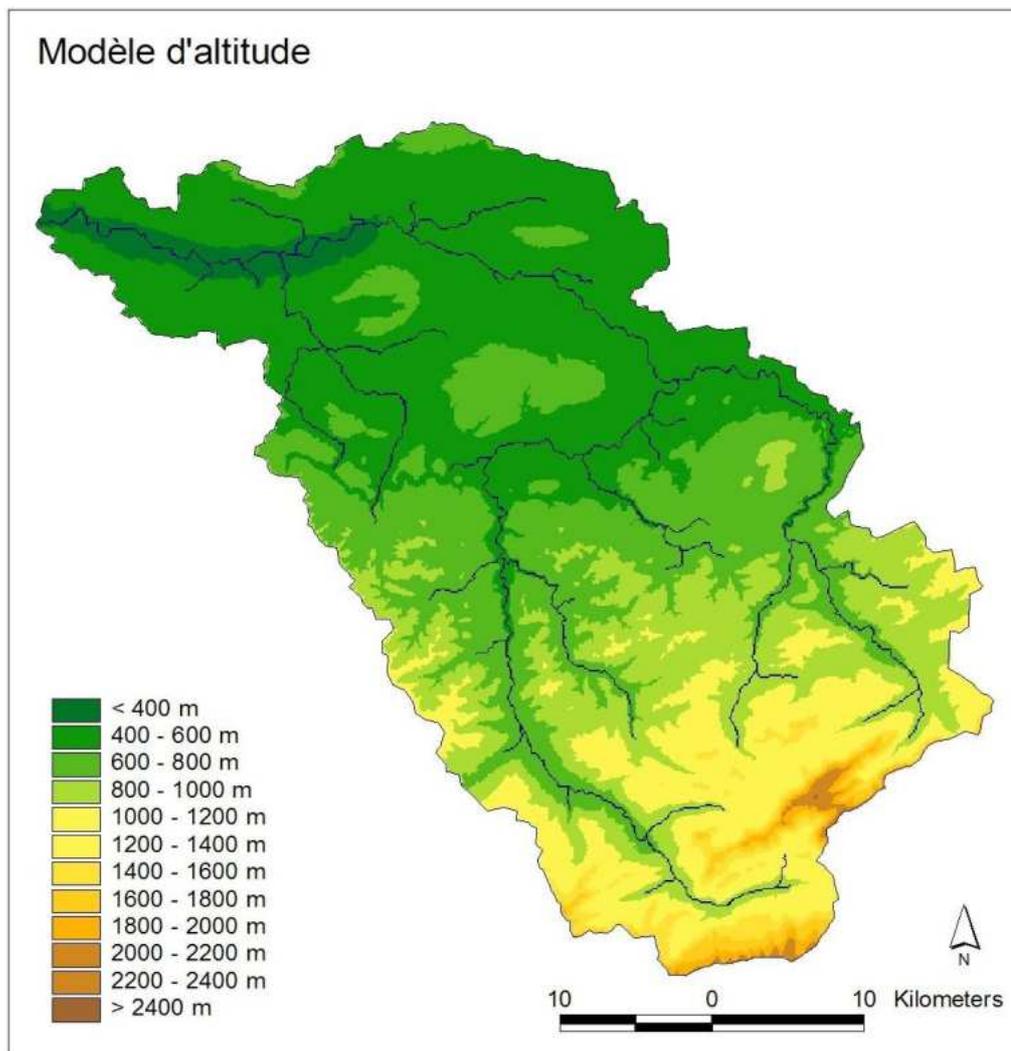


Figure 9: Modèle d'altitude (DHM100) pour la région de la Thur, avec réseau fluvial

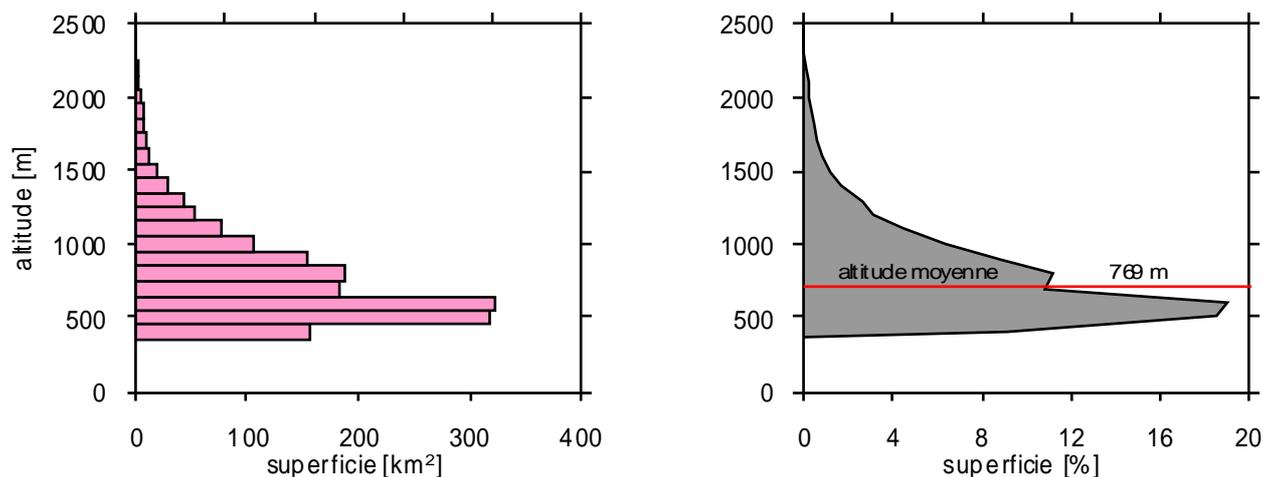


Figure 10: Statistique de la superficie avec répartition des surfaces en fonction de l'altitude dans la région de la Thur

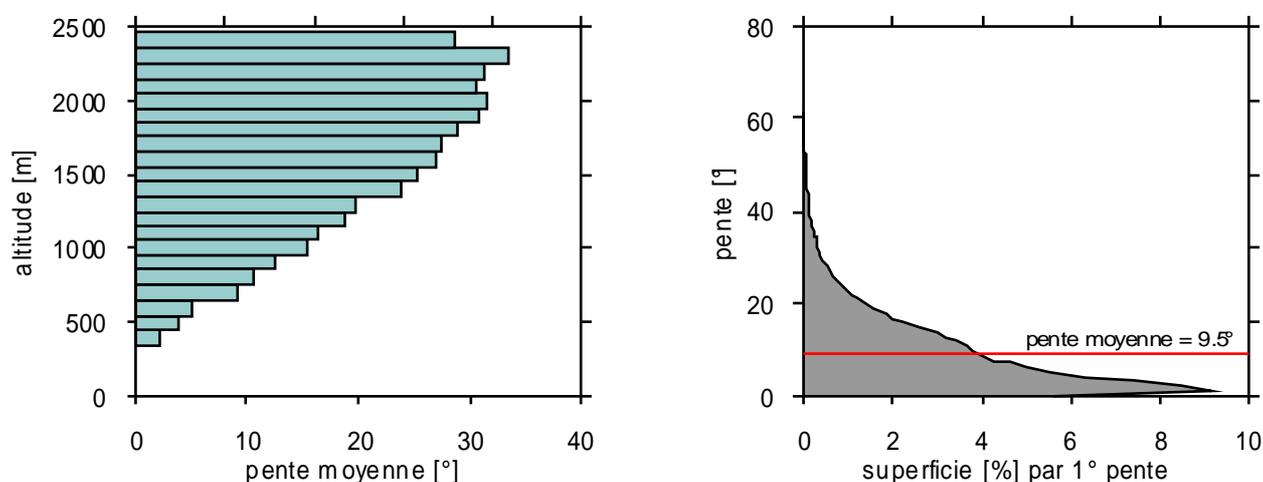


Figure 11: Statistique de la superficie avec répartition des pentes (HN) en fonction de l'altitude dans la région de la Thur

Tableau 3: Sous-bassins versants dérivés pour la Thur (AE₀: superficie en surface du bassin versant; calc.: calculé; gris: sous-région; jaune: tête de bassin)

Station	No. station	Zone	Accès à la zone	AE ₀ de SB (calc.) [km ²]	AE ₀ accum. (calc.) [km ²]	AE ₀ accum. (OFEV) [km ²]
Andelfingen	2044	1		102.6	1698.9	1696.0
Virtuelle	xxxx	13	1	299.7	1596.3	Xxx
Halden	2181	4	13	316.9	1090.0	1085.0
Jonschwil	2303	9	4	318.4	492.4	493.0
St. Gall	2468	5	4	126.3	264.0	261.0
Frauenfeld	2386	2	13	135.6	206.6	212.0
Mogelsberg	2374	11	9	88.7	88.7	88.2
Stein	2331	12	9	82.0	82.0	84.0
Wängi	2126	7	5	71.0	71.0	78.9
Appenzell	2112	3	2	73.4	73.4	74.2
Hundwil	2313	6	5	64.4	64.4	64.5
Herisau	2305	8	4	16.6	16.6	16.2
Mosnang	2414	10	9	3.3	3.3	3.3
Somme				1698.9		

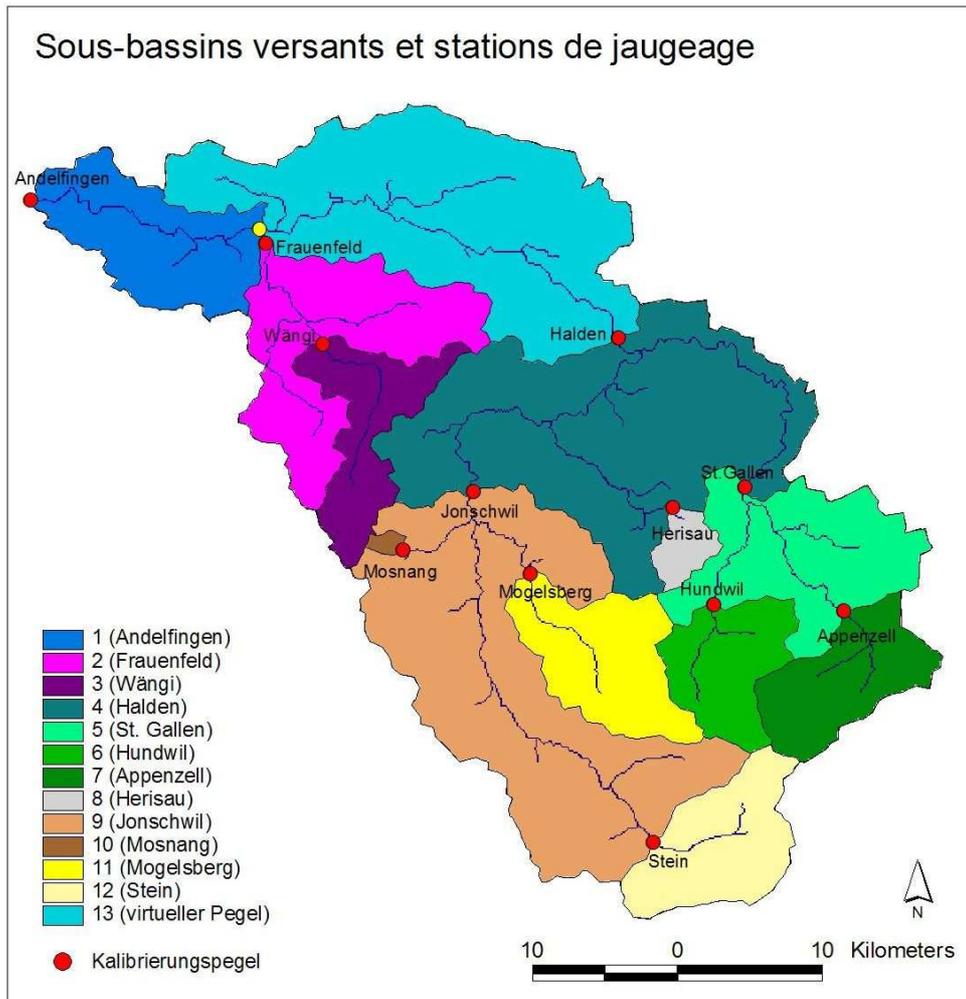


Figure 12: Sous-bassins versants dérivés pour la Thur (symbole circulaire jaune: station virtuelle de mesure de débit)

3.2.3 Reclassification des données d'utilisation des sols

Les données de base pour l'utilisation des sols proviennent de *l'Annuaire de la superficie de la Suisse 1992/97* (AS97) (OFS, [2001]). Ces jeux de données pour l'ensemble de la Suisse représentent l'état d'utilisation des sols au milieu des années 90². Le modèle digital de terrain MNT25 et les photographies aériennes des années 1992 - 1997 de l'Office fédéral pour la topographie (swisstopo) ont servi à établir AS97. Celui-ci comprend 74 catégories de base réparties dans les principaux domaines (Cf. Annexe C1) :

- Surfaces d'habitat et d'infrastructure: aires de bâtiments, aires industrielles, surfaces de transport, lieux de détente, extraction de matériaux, décharges, chantiers
- Surfaces boisées: forêt, forêt buissonnante, autres surfaces boisées
- Surfaces agricoles: arboriculture, viticulture, horticulture, pâturages locaux, alpages
- Surfaces improductives: eaux, végétation improductive, surfaces sans végétation

² Une version actualisée de données sur l'utilisation des sols (Statistique de la superficie 2004/09) sera disponible prochainement (selon les informations présentes sur le site internet de l'OFS)

La répartition en pourcentage des principales utilisations est présentée à la figure 13. L'agriculture représente 36.9% de la superficie totale des terres.

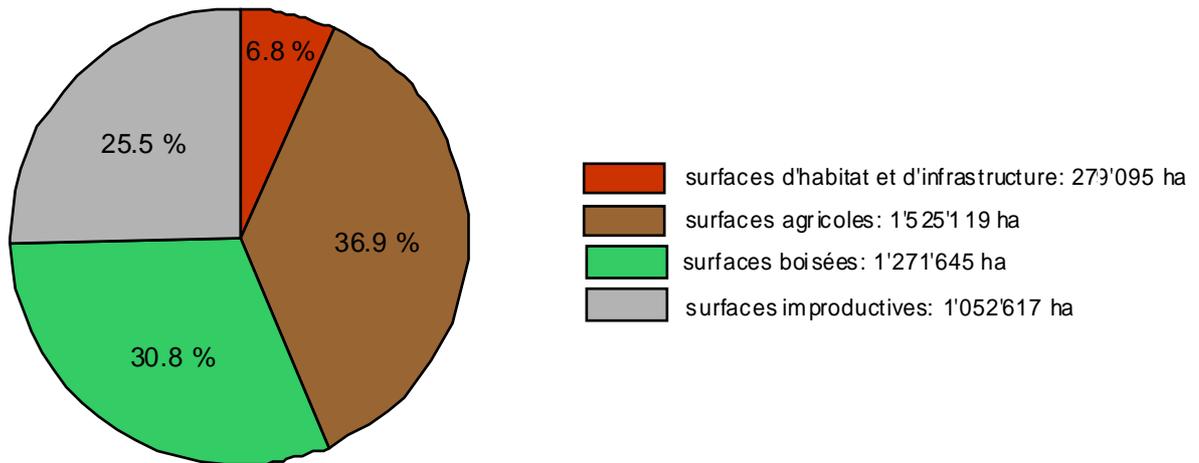


Figure 13: Répartition en pourcentage des principales utilisations en Suisse selon la Statistique de la superficie 1992/97

Pour les applications d'un modèle hydrologique, les 74 catégories d'utilisation du sol selon AS97 ne sont pas adaptées à la paramétrisation. Elles doivent donc être redassées en classes d'utilisation du sol d'importance hydrologique. Après reclassement, le nombre de classes diminue fortement, passant de 74 à 16. Elles sont présentées à l'annexe C2 et figurent comme exemple pour la région de Thur (Cf. figure 14).

Les terres arables – catégorie d'utilisation qui n'est pas sous-divisée dans AS97 – sont décomposées à l'aide des critères du système d'indicateur MONET (OFS et al. [2002]). Par ailleurs, « selon la statistique de la superficie, les sols comprennent les prés et les terres arables favorables, les autres prés et les terres arables ainsi que les pâturages locaux. Ils doivent se situer au-dessous de 900 m s. m. et présenter une dénivellation de moins de 20% ». Il s'ensuit que la délimitation des « sols aptes à devenir des terres arables » doit se baser à la fois sur les conditions climatiques existantes et sur les aptitudes des sols (aptitudes climatiques et pédologiques).

Par conséquent, les surfaces agricoles « aptes aux terres arables » (terres arables potentielles) ont été délimitées selon les critères qualitatifs et quantitatifs suivants (Cf. aussi le tableau 4) :

- appartenance aux catégories 81, 82 et 83 de la statistique de la superficie
- altitude inférieure ou égale à 900 m s. m. et dénivellation inférieure à 20% (raisons: mécanisation réduite de l'exploitation et sensibilité accrue à l'érosion des fortes pentes)
- aptitude très bonne à bonne pour l'exploitation des grandes cultures (cultures céréalières, prairies et cultures sarclées) selon les critères mentionnés dans la *Carte digitale des aptitudes des sols de la Suisse* (OFS [2004]).

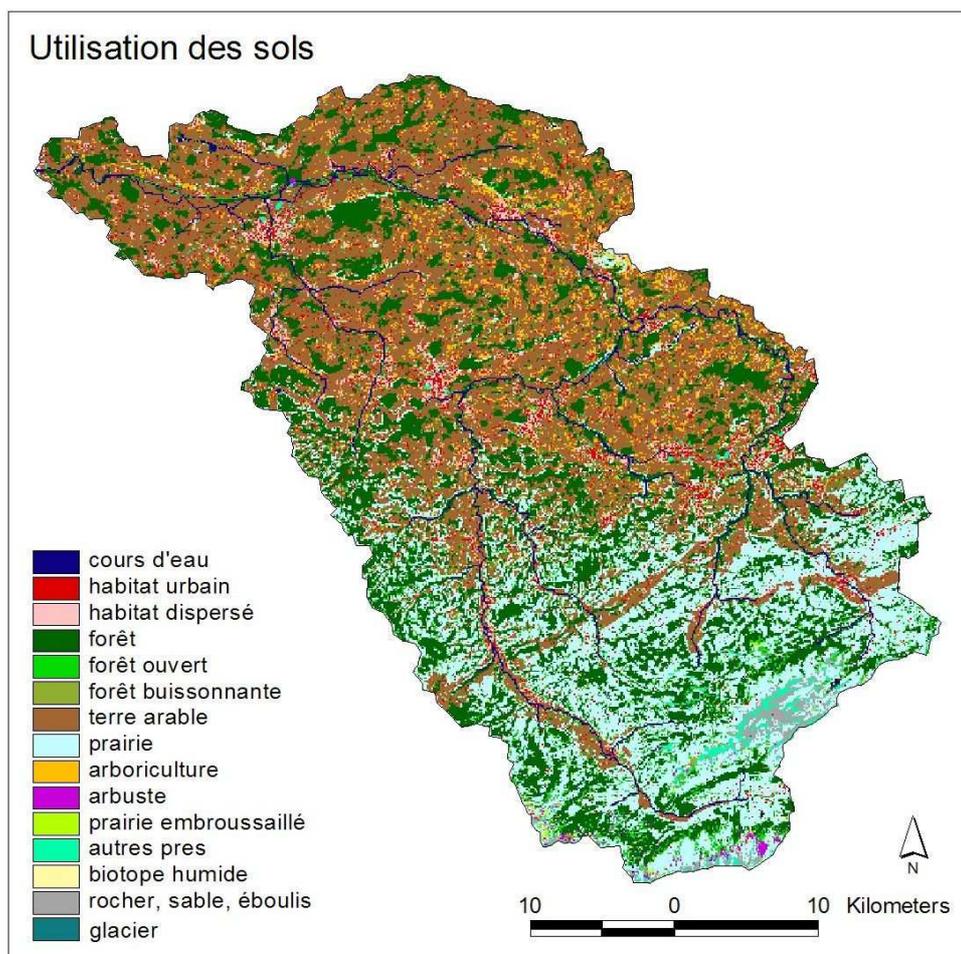


Figure 14: Répartition spatiale de l'utilisation des sols reclassée dans la région de la Thur

Tableau 4: Décomposition des «terres arables» selon le système d'indicateur de MONET

Critère de choix	Surface des terres arables (potentielle) [ha]
Catégorie AS97 (81, 82, 83)	924'431
→ d'altitude ≤ 900 m s. m.	764'202
→ avec une pente ≤ 20%	674'246
→ avec une aptitude pour les céréales, les cultures sarclées et fourragères	629'146

Après reclassification, les données AS97 correspondent à une superficie des terres agricoles de 34.9% (par rapport aux catégories WaSiM: terres arables, prairies et arboriculture) pour l'ensemble de la Suisse. Cette superficie ne comprend pas les catégories AS97 : 84 (prés et pâturages locaux embroussaillés), 86 (alpages embroussaillés des Alpes et du Jura) et 89 (alpages rocaillieux des Alpes et du Jura) étant donné leur faible importance pour la présente étude (annexe C2).

La reclassification des surfaces agricoles suisses est subdivisée comme suit: 44% de terres arables, 52% de prairies et 4% d'arboriculture. Leur répartition géographique est illustrée à la figure 15. Le modèle de répartition spatiale des utilisations indique que la plus grande superficie des terres arables est située dans le Plateau inférieur. Par contre, les prairies sont surtout présentes dans les régions alpines. Cette répartition est également validée par la répartition spatiale des utilisations agricoles dans les régions tests (Cf. aussi le chapitre 2.1).

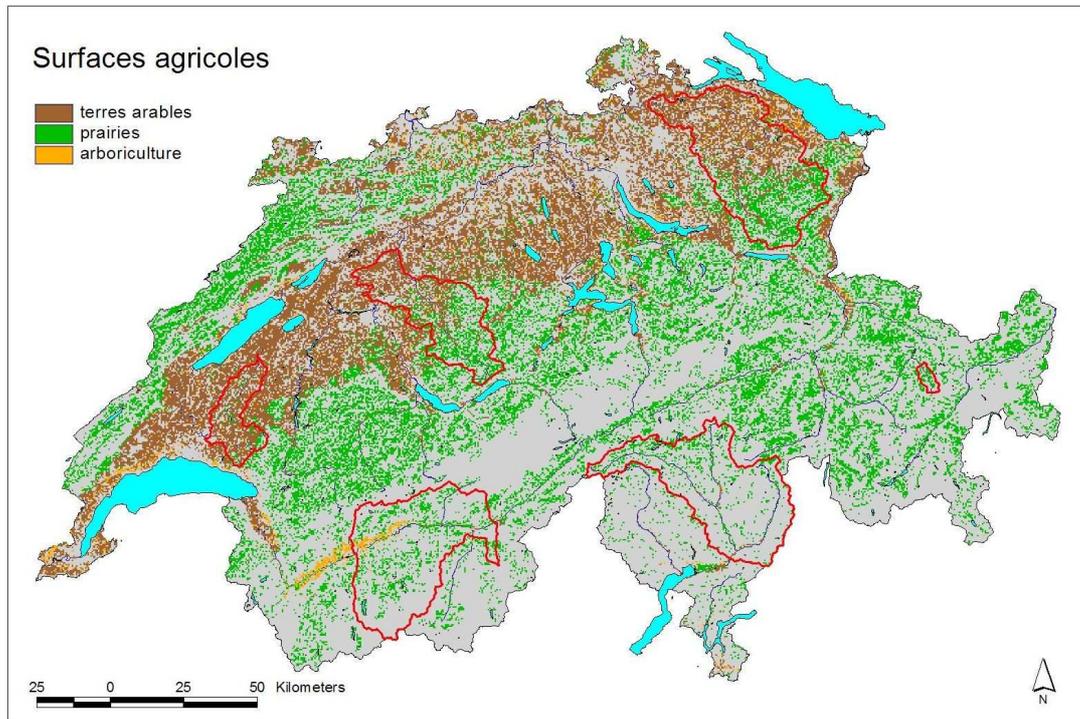


Figure 15: Répartition spatiale des surfaces agricoles en Suisse après reclassification avec emplacement des régions tests

3.2.4 Classification des sols

Les données révisées de la « Carte digitale des aptitudes des sols de la Suisse » 1:200'000 (BEK200) servent à la génération des jeux de paramètres pédologiques qui sont nécessaires au modèle. En raison de leur manque de précision par rapport aux données détaillées des cartes des sols (échelle 1 :50'000 ou inférieure), les BEK200 présentent certains inconvénients d'ordre qualitatif et informatif. Toutefois, ils ont l'avantage décisif d'être disponibles sous la forme de données digitales de résolution de 100 m x 100 m pour l'ensemble du territoire suisse, ce qui représente une base d'utilisation suprarégionale commode pour les analyses de planification spatiale.

Globalement, les BEK200 représentent 143 unités cartographiques (UC) distinctes, réparties en environ 11'000 polygones (OFS [2004]). Les UC sont catégorisées selon leurs aptitudes agricoles et forestières (4 catégories : (a) très bonne, (b) bonne ; (c) moyenne ; (d) mauvaise). Par ailleurs, elles contiennent des indications sur les types de sol les plus représentés ainsi que leurs propriétés hydrauliques :

- profondeur physiologique (profondeur d'enracinement)
- squelette (dans les couches du profil de sol au-dessus de 50 cm)
- capacité de rétention moyenne de l'eau disponible pour les plantes dans la couche d'enracinement (pF compris entre 2 et 3; sans la partie du squelette ni celle des gros vides)
- perméabilité ou conductivité hydraulique à saturation (dans l'horizon supérieur au-dessus de 50 cm caractérisé par une mauvaise conductivité)
- engorgement (avec emplacement de l'horizon caractérisé par des pores toujours saturés, en profondeur par rapport au bord supérieur du terrain)

Les BEK200 fournissent des informations sur les sols de 78.9% de la superficie suisse. Mais aucune information n'est donnée sur les sols des lacs, des régions marécageuses et des surfaces recouvertes par des rochers ou des infrastructures. La répartition des superficies correspondant aux propriétés hydrauliques susmentionnées des sols (Cf. figure 16 et tableau 5) présente l'ensemble des surfaces agricoles suisses après reclassification (Cf. figure 15).

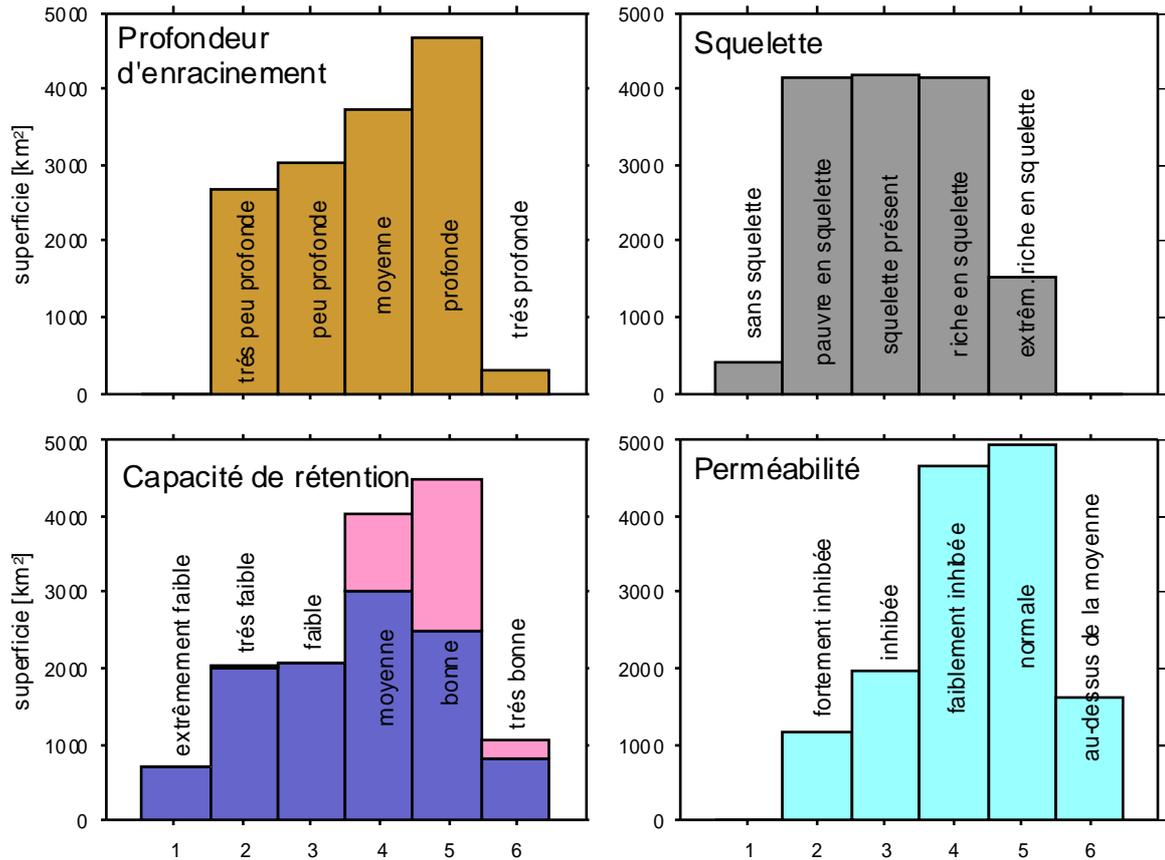


Figure 16: Répartition de la superficie correspondant aux propriétés des sols selon les BEK200 par rapport à l'ensemble de la superficie des sols agricoles suisses après reclassification (remarque: les superficies avec des sols imbibés d'eau se trouvent en rose sous « Capacité de rétention »).

A la différence des cartes détaillées des sols, les BEK200 ne donnent aucune information directe sur la granulométrie (texture du sol). Pour une première approximation, ces données nécessaires à l'application du modèle peuvent être générées à partir de la propriété « perméabilité ». La figure 17 indique la distribution spatiale de ce paramètre pour la région de la Thur.

Pour l'application du modèle choisi, les informations sur les sols fournies par les BEK200 ont été reprises de la façon la plus complète. En conséquence, il a été attribué à chaque UC un profil de sol spécifique dont les données hydrauliques de chaque horizon sont définies.

De cette manière, un nombre important de profils de sol correspondant à chaque unité cartographique a pu être obtenu pour faire la modélisation des régions tests : Thur (50 profils), Emme (46), Broye (22), Rhône (39), Tessin (41) et Dischma (9).

Tableau 5: Définition et répartition des propriétés des sols selon les BEK200 en fonction de la superficie des terres agricoles de la Suisse

Code	Propriétés	Catégorie	Superficie [ha]
Profondeur d'enracinement			
1	Extrêmement peu profonde	< 10 cm	-
2	Très peu profonde	10 - 30 cm	268' 784
3	Peu profonde	30 - 60 cm	302' 639
4	Moyenne	60 - 90 cm	372' 668
5	Profonde	90 - 120 cm	466' 887
6	Très profonde	120 - 150 cm	28' 159
7	Extrêmement profonde	> 150 cm	-
<i>Total</i>			<i>1'439'137</i>
Squelette			
1	Sans squelette	jusqu'à 5 Vol-%	40' 043
2	Pauvre en squelette	jusqu'à 10 Vol-%	412' 471
3	Squelette présent	jusqu'à 20 Vol-%	418' 284
4	Riche en squelette	jusqu'à 50 Vol-%	413' 660
5	Extrêmement riche en squelette	supérieur 50 Vol-%	154' 679
<i>Total</i>			<i>1'439'137</i>
Capacité de rétention de l'eau³			
1	Extrêmement faible	< 15 mm	72' 443
2	Très faible	15 - 30 mm	201' 359
3	Faible	30 - 45 mm	206' 125
4	Moyenne	45 - 60 mm	300' 523
5	Bonne	60 - 100 mm	250' 846
6	Très bonne	> 100 mm	80' 943
-1	Extrêmement faible	< 15 mm	-
-2	Très faible	15 - 30 mm	2' 404
-3	Faible	30 - 45 mm	-
-4	Moyenne	45 - 60 mm	101' 074
-5	Bonne	60 - 100 mm	197' 910
-6	Très bonne	> 100 mm	25' 510
<i>Total</i>			<i>1'439'137</i>
Rétention			
1	Imperméable	< 10 ⁻⁶ cm/s	-
2	Fortement inhibée	jusqu'à 10 ⁻⁶ cm/s	118' 258
3	Inhibée	jusqu'à 10 ⁻⁵ cm/s	197' 201
4	Faiblement inhibée	jusqu'à 10 ⁻⁴ cm/s	467' 979
5	Normale	jusqu'à 10 ⁻³ cm/s	494' 183
6	Au-dessus de la moyenne	jusqu'à 10 ⁻² cm/s	161' 516
7	Extrême	10 ⁻¹ cm/s	-
<i>Total</i>			<i>1'439'137</i>
Engorgement			
1	Pas d'engorgement	-	844' 764
2	Sol humide	> 90 cm	264' 704
3	Faiblement engorgé	60 - 90 cm	200' 310
4	Moyennement engorgé	45 - 60 cm	129' 359
5	Passablement engorgé	30 - 45 cm	-
6	Fortement engorgé	< 30 cm	-
<i>Total</i>			<i>1'439'137</i>

³ Les codes négatifs représentent les capacités de rétention d'eau, qui en raison de l'engorgement ne sont pas limitées.

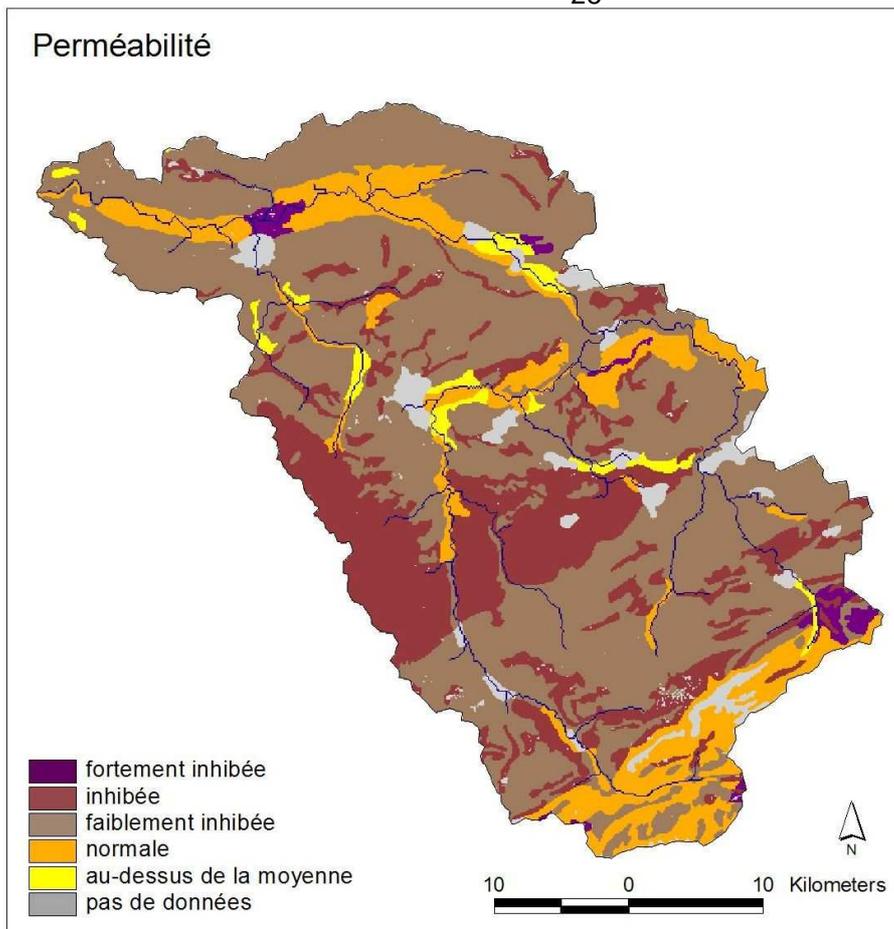


Figure 17: Distribution spatiale de la perméabilité dans la région de la Thur d'après les BEK200

3.2.5 Grille des données et grille du modèle

Lors de la préparation des données, la grille de données à haute résolution de 100 m x 100 m a été transférée sur la grille du modèle 500 m x 500 m. Ce changement d'échelle a été possible grâce à l'outil 'Moving-Windows': production de moyennes pour les données mesurées en continu (p. ex. pour les altitudes de terrain) et prélèvement d'échantillons pour les données catégorisées (p. ex. pour les classes d'utilisation des sols).

Comme attendu, les résultats de la transposition de la grille des données sur la grille du modèle n'indiquent aucun changement statistique des jeux de données de base pour l'utilisation des sols. La superficie des terres arables et celle des prairies n'ont augmenté que de 0.2% pour toute la Suisse. Pour les unités de sol plus structurées spatialement (143 unité cartographique pour les catégories d'utilisation terres arables et prairies), les différences entre la grille de données et la grille du modèle étaient plus grandes. Pour les principales unités de sol des surfaces agricoles délimitées (UC des collines morainiques inférieures avec une couverture partielle de moraines, cf. annexe D), des changements de superficie proches de 2% ont été observés après transposition.

Comme prévu, le changement d'échelle lié à l'altitude du terrain a donné une très légère modification avec la surface au sol du terrain. Pour l'ensemble des surfaces agricoles, la catégorie d'altitude moyenne est passée de 1020 à 1022 m s. m. alors que les catégories d'altitudes sont passées de 189 et 3090 m à 195 - 2988 m. Pour ces dernières, la pente maximale est passée de 76° à 61°. Par contre, la pente moyenne de toutes les terres agricoles est restée constante, elle est de 10.8°, correspondant à 19%.

4 Simulation dans les régions tests

4.1 Mise en place des calculs de modélisation

Conformément au mandat reçu, toutes les simulations ont été réalisées au pas de jour, à l'échelle de résolution de 500 m x 500 m pour la période 1980 - 2006. Pour simuler la dynamique de l'eau en continu sur plusieurs années, les données d'entrée décrites au chapitre 3 ont servi de base au modèle WaSiM-ETH (version 8.3.2, selon Richard). La configuration de base du modèle intègre les composantes mentionnées au tableau 6.

Tableau 6: Configuration du modèle pour la simulation des régions tests

	Composantes	Evaluation
1	Correction des précipitations	Correction séparée des précipitations liquides et solides
2	Interpolation des données météo	Méthode de combinaison de la régression dépendant de l'altitude et de l'interpolation selon l'inverse de la distance pondérée (IDW)»
3	Correction du rayonnement	Corrections selon la dénivellation et l'exposition (aussi pour la température de l'air)
4	Modèle d'évapotranspiration	Méthode de Penman-Monteith avec intégration de la dynamique de la phénologie pour les terres arables et les prairies
5	Modèle d'enneigement	Méthode de l'indice température-vent
6	Modèle d'interception	Modèle de stockage
7	Modèle du sol	Selon Richard
8	Modèle des eaux souterraines	Méthode des différences finies
9	Modèle de routage	Méthode de translation et rétention

Explications sur la configuration du modèle

Correction des précipitations: Les mesures des précipitations sont affectées par des erreurs systématiques (erreurs dues au vent, aux pertes d'eau ou à l'évapotranspiration). En conséquence, le modèle WaSiM a apporté aux données des précipitations non corrigées (Sevruk [1986]) les corrections liées à la température et au vent. La correction de la température a été faite séparément pour la neige et pour la pluie selon les méthodes décrites par Schulla [1997] et Schulla & Jasper [2007]. Les valeurs des facteurs de correction ont été établies séparément pour chaque région testée. Cette réalisation a eu lieu à l'aide des valeurs obtenues par expérience à partir d'anciennes modélisations effectuées sur les bassins versants suisses.

Interpolation des données d'entrée météorologiques: L'analyse statistique des données météorologiques indique une dépendance plus ou moins marquée de toutes les variables utilisées à l'altitude. En conséquence, toutes les séries chronologiques météorologiques se rapportant aux stations de mesure ont été interpolées sur la grille du modèle par une combinaison pondérée différente de la régression dépendant de l'altitude et de la méthode IDW. La fixation de la répartition de la pondération entre l'interpolation IDW et la régression dépendant de l'altitude a été réalisée séparément pour chaque région testée et pour chaque variable météorologique.

Correction de la température et du rayonnement: L'influence de la topographie (exposition, pente) sur la température et le rayonnement interpolés a été corrigée par l'activation du modèle de correction adapté de WaSiM-ETH.

Modèle d'évapotranspiration: La modélisation de l'évapotranspiration (y compris l'évapotranspiration provenant du stockage lié à l'interception et à la neige) repose principalement sur l'équation de Penman-Monteith (Monteith & Unsworth [1990]). Les paramètres de végétation nécessaires (indice de surface foliaire, taux de couverture végétale, résistance à l'évapotranspiration, profondeur de l'espace racinaire) ont été préparés à l'aide de tableaux multicouches d'utilisation des sols. Dans ces tableaux, une année détaillée prédéfinie a été attribuée aux paramètres de tous les types d'utilisation du sol.

Pour les types d'utilisation agricoles - terres arables et prairies - les courbes phénologiques statiques ont été transformées par calcul en courbes dynamiques. Le modèle phénologique utilisé, qui est basé sur le « Thermal Time Model », exploite l'évolution actuelle des températures pour générer les phases phénologiques (Schulla & Jasper [2007]). La paramétrisation de ce modèle est basée sur les études de Pöhler et al. [2007].

Par contre, il n'a pas été effectué de calculs pour simuler la dynamique des phases de développement phénologique pour l'arboriculture, troisième type d'utilisation des sols. Dans ce cas, en raison de l'incertitude de la paramétrisation du modèle, la phénologie a été simplifiée et a utilisé des courbes annuelles prédéfinies, en tenant compte de l'altitude (Schulla [1997]).

Remarque: Dans ce projet, les surfaces agricoles ont été définies selon trois types d'utilisation des sols: terres arables, prairies et arboriculture (Cf. figure 14). Les résultats présentés plus loin à la rubrique « surfaces agricoles » - doivent être interprétés comme concernant une combinaison des trois utilisations.

Modèle d'enneigement: Le calcul de la fonte des neiges a utilisé la méthode de l'indice température - vent et non la méthode plus simple de l'indice température.

Modèle d'interception: La capacité de stockage par interception a été définie séparément pour chaque utilisation de sol. La phase de vidage du stockage par interception a lieu par évapotranspiration d'après la formule de Penman-Monteith.

Modèle de la zone non saturée du sol (modèle sol): La paramétrisation du modèle du sol découle de l'utilisation de la banque des données pédologiques existante (unité cartographique BEK200 avec les données correspondantes de profondeur d'enracinement, de squelette et de porosité). A partir de ces données, 143 profils de sol ont été définis. Les horizons de chaque profil ont été caractérisés du point de vue hydrologique. La paramétrisation a été réalisée à l'aide des fonctions de pédotransfert de van-Genuchten [1980]. Le modèle des macropores intégré au modèle WaSiM-ETH a été activé pour chaque profil de sol, en particulier pour les régions alpines (p. ex. pour les sols peu évolués et les sols bruns calcaires/podzols). Cette mesure conceptionnelle a permis, dans une certaine mesure, de tenir compte de l'influence de la formation de karst sur le comportement du débit.

Modèle des eaux souterraines: Ce sous-modèle a été utilisé uniquement pour la région testée du Plateau. Il a été désactivé pour les régions essentiellement alpines sans grand aquifère. En raison du manque de données pour le sous-sol, ce modèle a été simplifié et activé seulement avec un aquifère libre. Certains des paramètres utilisés (colmatage du lit des cours d'eau) ont été calculés à partir de la calibration du modèle.

Modèle de routage: Ce sous-modèle utilise une méthode hydraulique pour calculer la vitesse de translation dans les cours d'eau. Ces calculs nécessitent des données sur la géométrie du bassin (largeur et profondeur du fleuve, rugosité, pente, largeur de la rive, longueur des sections de ruissellement dans la sous-région) ainsi que les données sur la rétention dans le bassin principal et dans le terrain avoisinant. Comme ces données n'existaient pas pour les régions sélectionnées pour les tests, elles ont été évaluées à l'aide du programme d'analyse TANALYS (Cf. chapitre 3.2.2).

4.2 Calibration du modèle

4.2.1 Démarche

Pour les sous-modèles peu sensibles, la calibration du modèle prévoit de reprendre les paramètres des régions hydrologiques similaires déjà modélisées. La calibration se fait donc uniquement avec les sous-modèles dont les paramètres sont fortement influencés par les propriétés de la région testée.

Pour des raisons de disponibilité des données, la calibration du modèle se concentre essentiellement sur la comparaison des séries chronologiques des débits mesurés avec celles qui sont simulées. L'efficacité de l'adéquation a été déterminée visuellement et par calcul. Le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe a été choisi comme critère de qualité mathématique (Nash & Sutcliffe [1970]). Très sensible, cet indicateur est souvent utilisé en hydrologie pour mesurer la qualité de la reproduction des débits. Les valeurs d'efficacité situées dans une fourchette de 0.7 à 1.0 correspondent le plus souvent à une application réussie du modèle (pour des bassins versants «non problématiques»). En plus de l'évaluation qualitative et quantitative de la reproduction des débits modélisés, une attention particulière a été portée à la plausibilité des bilans d'eau simulés.

La calibration du modèle a été faite manuellement pour les régions tests, c'est-à-dire sans l'aide de programmes d'optimisation automatisée des paramètres. Les principaux paramètres de calibration des sous-régions étaient: la densité de drainage et de vidange, la conductivité hydraulique saturée du sol, les constantes de rétention pour l'écoulement direct et l'écoulement hypodermique (interflow) ainsi que le colmatage du réseau des cours d'eau.

Dans un premier temps, les paramètres pour les secteurs sources sélectionnés ont été calibrés sans activation du modèle des macropores, donc uniquement en activant le modèle des eaux souterraines. Ensuite, la calibration a été réalisée pour le reste des sous-régions. La calibration s'est déroulée en deux étapes. Dans la première étape, les entrées d'eau mesurées sont calibrées et, dans la seconde étape, elles sont remplacées par les entrées d'eau calculées. Le tableau ci-dessous donne un aperçu des paramètres calibrés. Il indique que seul le colmatage du réseau des cours d'eau varie avec le modèle des eaux souterraines. Les autres jeux de données se rapportant aux surfaces et utilisés pour le modèle des eaux souterraines (p. ex. les puissances aquifères et les conductivités hydrauliques horizontales) demeurent inchangés pendant la calibration.

Tableau 7: Paramètres de calibration et domaines de valeurs

	Paramètre	Domaine de valeurs
Dr	Densité de vidange	1 - 40
kd, ki	Constantes de rétention pour le débit direct et l'interflow	5 – 50 h
k_sat	Conductivité hydraulique à saturation	varie jusqu'à un facteur 100
kol	Colmatage du réseau des cours d'eau	10^{-5} - 10^{-6} m/s

Remarque: Les paramètres largeur et profondeur du cours d'eau (Cf. chapitre 3.2.2) obtenus à partir de l'analyse topographique TANALYS ont été modifiés avant d'être utilisés dans le modèle des eaux souterraines. La préparation de ces paramètres partait de l'hypothèse qu'il était possible de générer l'écoulement de base (exfiltration des eaux souterraines) dans chacune des mailles 500 m x 500 m de la grille. L'extension du réseau hydrographique à l'ensemble des mailles de la région a été réalisée selon la méthode de la mise à l'échelle en fonction de la pente. De plus, les mailles du réseau hydrographique utilisé jusqu'ici ont été élevées aux valeurs d'échelle évaluées.

4.2.2 Résultats pour les régions tests

La calibration du modèle pour les régions tests a été réalisée à partir de simulations continues sur 10 ans durant la période 1981-1990. Les résultats de 1980 ont servi de période d'équilibration du modèle. Un échantillon des résultats obtenus après modélisation est présenté à la figure 18. Les résultats de la calibration indiquent une bonne adéquation entre les débits mesurés et ceux qui sont simulés. Ils confirment ainsi que le modèle utilisé peut simuler les différents bassins versants et les régimes de débit avec une précision appropriée à la problématique. Le logarithme du critère d'efficacité Nash-Sutcliffe - utilisé comme indicateur pour estimer la qualité de simulation du débit - se situe entre 0.70 et 0.90.

Conformément à la problématique de départ, la calibration du modèle avait pour but non pas de reproduire les phénomènes uniques de crues mais plutôt de simuler le mieux possible des niveaux d'eau moyens et bas. Les analyses des débits mesurés et simulés indiquent que ce travail n'était pas simple à réaliser au niveau de chacune des régions. En effet, les calculs ont abouti à de faibles surestimations des débits simulés ($\Delta Q < 10\%$) pour les régions de la Thur et du Tessin; par contre, des débits beaucoup plus élevés ($\Delta Q > 10\%$) ont été calculés pour la région de l'Emme. Les écarts enregistrés dans les régions de la Thur et de l'Emme, toutes deux caractérisées par une exploitation agricole intensive, tiennent, d'une part à l'impact anthropogène sur le régime hydrique naturel (vu le manque des données nécessaires à l'application du modèle, ce type d'influence n'a pas été retenu!) - p. ex. les prises d'eau liées à l'irrigation - et d'autre part aux incertitudes liées à l'application du modèle. Par contre, l'interprétation des débits trop élevés dans la région du Tessin semble plus simple à expliquer. Le régime plutôt intensif des débits est influencé par la gestion de stockage des différentes conduites entrantes, sortantes et intermédiaires à l'échelle suprarégionale. En conséquence, les données de gestion influant sur les débits doivent être prises en compte pour améliorer significativement l'application du modèle dans cette région. En effet, des applications antérieures du modèle réalisées dans la région du Tessin ont montré, après intégration de ces données supplémentaires, que la qualité de simulation du débit (avec la même configuration de modèle) pouvait s'élever à des valeurs d'efficacité supérieures à 0.9 (Cf. Jasper [2005]).

La comparaison des débits simulés avec les débits mesurés dans les régions de la Dischma et du Rhône ont mis en évidence des sous-estimations faibles à modérées ($3\% < \Delta Q < 15\%$). Ces écarts proviennent certainement de la modélisation insuffisante du débit glaciaire, lequel influence particulièrement sur le comportement des débits (forme et volume des courbes de débit) dans ces régions. En effet, aucune dynamique de l'étendue des glaciers n'a été prise en compte lors de la mise en place du modèle. Les superficies des névés et des glaces modélisées ont été considérées comme des constantes durant la période de simulation, ce qui ne correspond pas à la réalité. Par ailleurs, la résolution au pas de temps journalier n'est pas vraiment adaptée à la reproduction de la dynamique des débits glaciaires. Par contre, des études de modélisation antérieures ont montré que le pas de temps horaire permet une assez bonne représentation des caractéristiques de débit existant dans les bassins versants partiellement occupés par des glaciers (Cf. Klok et al. [2001], Gurtz et al. [2003], Verbunt et al. [2003]).

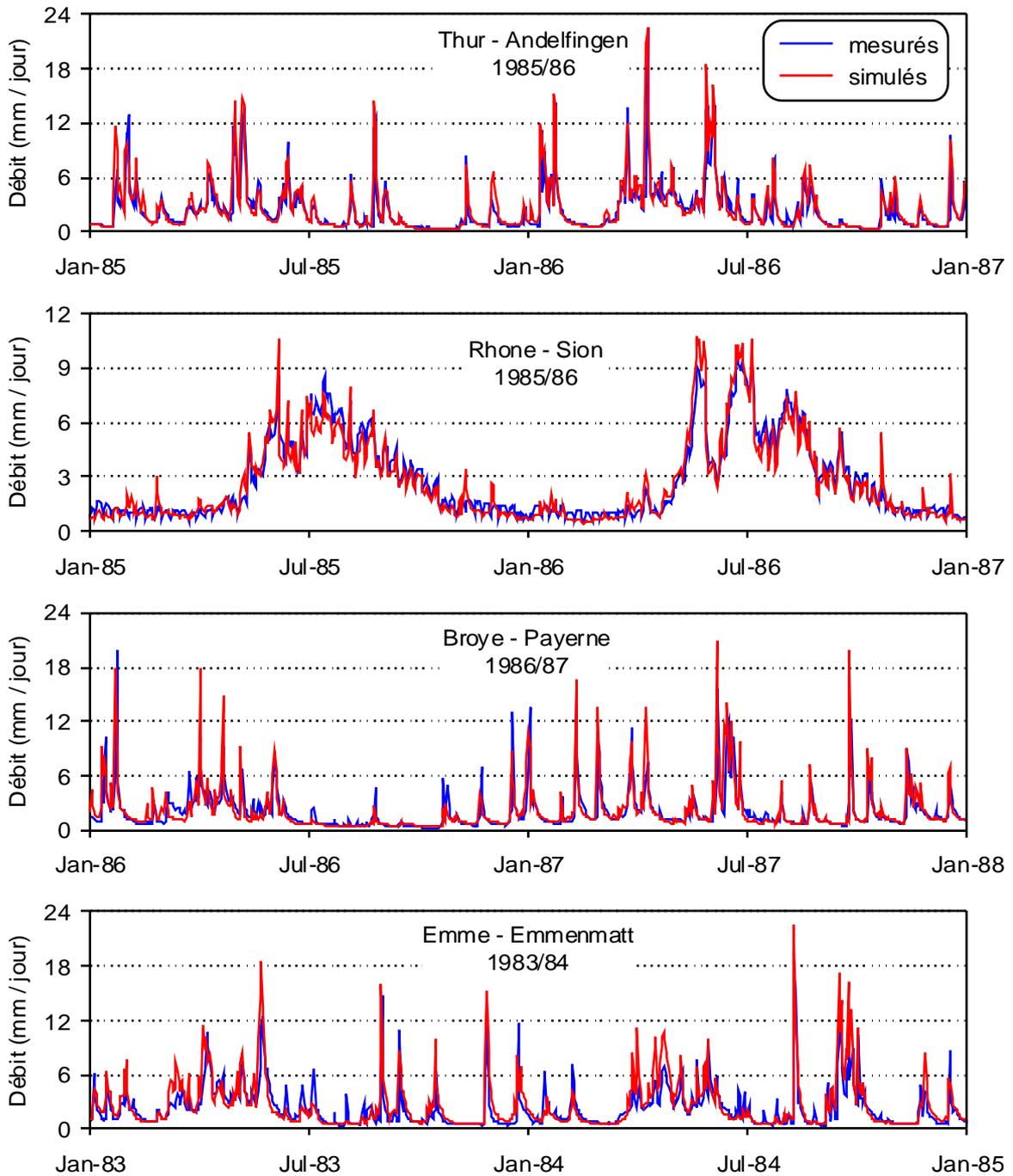


Figure 18: Calibration du modèle, par comparaison des débits mesurés (bleu) avec les débits simulés (rouge)

4.3 Résultats de la validation du modèle et de la simulation à long terme

4.3.1 Démarche

La vérification ou la validation d'un modèle calibré sert à vérifier et à évaluer la validité des laps de temps et contraintes liées au système autres que ceux qui ont été utilisés dans la calibration. Dans le cadre de la vérification, les calculs effectués avec le modèle ont été réalisés à partir des données initiales mesurées et des paramètres calibrés; les résultats des calculs sont ensuite comparés avec les données mesurées. La vérification du modèle calibré a eu lieu sur la base de calculs continus dérivant du modèle pour la période 1991 - 2000. Les données initiales utilisées

étaient indépendantes de celles qui ont été utilisées pour la période de calibration. La vérification du modèle a été suivie de la simulation à long terme. Elle s'étend à la période d'observation 1980 - 2006. Les résultats de la vérification du modèle et de la simulation à long terme sont documentés dans le chapitre qui suit.

4.3.2 Résultats pour les régions tests

Les résultats de la vérification du modèle et de la simulation à long terme n'indiquent pratiquement aucune perte de qualité par rapport aux résultats de la calibration, en ce qui concerne la qualité d'adéquation mathématique et visuelle des flux mesurés avec les flux simulés (Cf. figure 19). La vérification du modèle est donc réussie. Néanmoins, des incertitudes inhérentes à l'application du modèle subsistent, elles ont été décrites au chapitre précédent.

Les résultats de la simulation à long terme ont été calculés pour l'ensemble de la surface agricole de la Suisse et en particulier pour ses composantes terres arables et prairies. Troisième composante, l'arboriculture n'a pas été examinée séparément. Elle a été prise en compte uniquement pour les calculs se référant à l'ensemble de la superficie agricole.

Conformément à la problématique de départ, l'évapotranspiration relative (ET/ETP) des surfaces agricoles mesurée pendant la période de végétation a été l'unité de mesure choisie pour analyser le régime hydrique. Elle a été calculée pour chaque région examinée avec une différenciation par surface. Le tableau 8 présente les résultats ET/ETP spécifiques à chaque région avec une différenciation par surface. Pour l'ensemble des surfaces agricoles, les rapports ET/ETP se situent en moyenne entre 0.80 et 0.87. Les valeurs les plus faibles correspondant aux besoins potentiels en eau; les plus élevées ont été trouvées dans les régions de la Broye et du Rhône. Ces résultats sont valables également pour les terres arables, qui indiquent toutes des valeurs de l'indicateur ET/ETP plus petites que celles des prairies.

Tableau 8: Valeurs ET/ETP spécifiques à chaque région pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris l'arboriculture); moyennes pour les périodes de végétation 1980 - 2006

Bassin versant		Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
Terres arables	ET/ETP	0.85	0.82	0.80	0.70	0.79	-
	Nombre de mailles	2470	1028	893	10	31	-
Prairies	ET/ETP	0.92	0.91	0.90	0.83	0.87	0.86
	Nombre de mailles	1277	903	110	1050	746	48
Surfaces agricoles (total)	ET/ETP	0.87	0.86	0.81	0.80	0.86	0.86
	Nombre de mailles	3956	1985	1025	1207	787	48

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

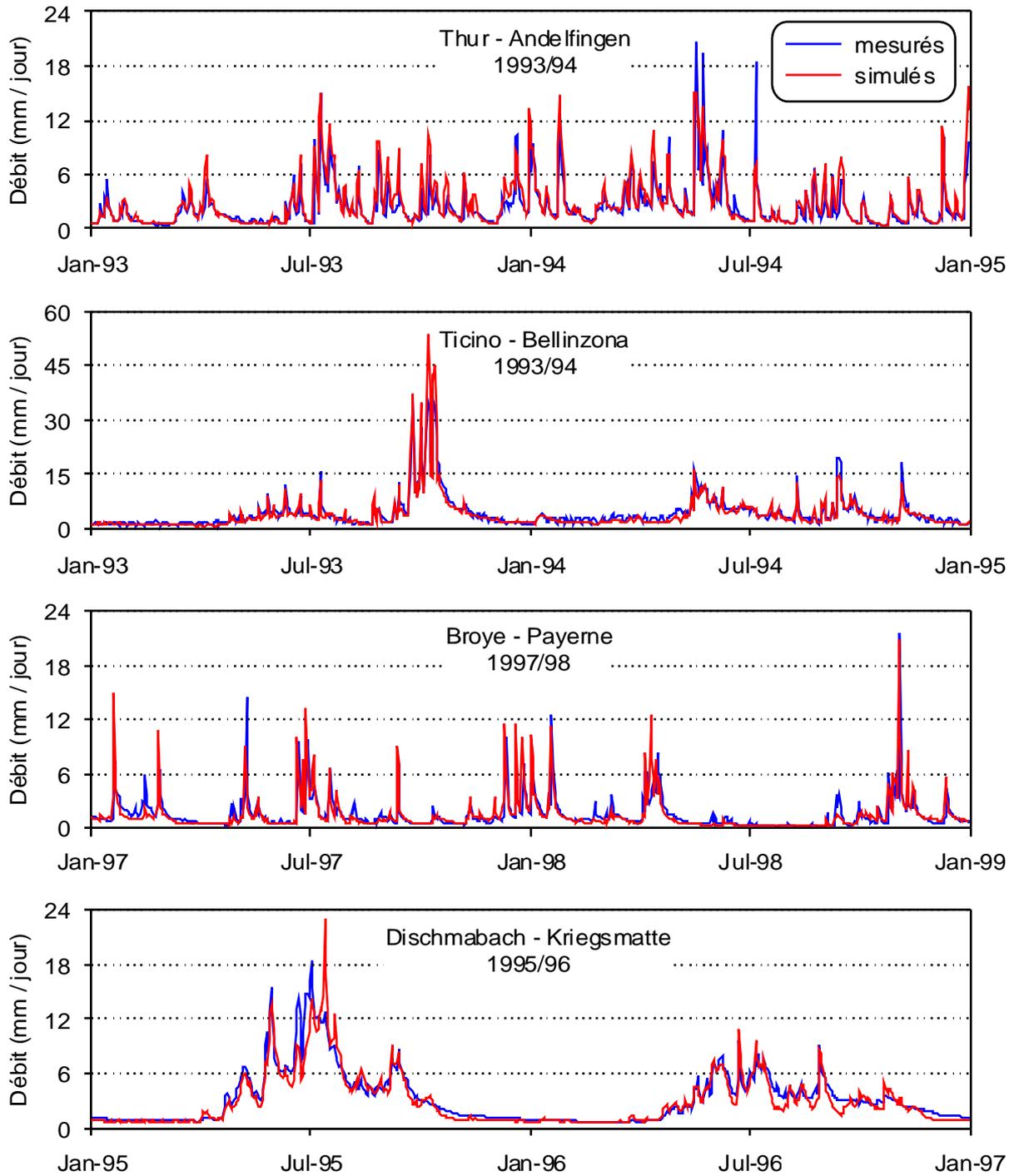


Figure 19: Vérification du modèle, par comparaison des débits mesurés (bleu) avec ceux simulés (rouge).

5 Evaluation des besoins en irrigation différenciés par surface

5.1 Extrapolation des résultats de simulation spécifiques aux régions

La régression multiple a été utilisée pour extrapoler à la superficie agricole de la Suisse les indicateurs de sécheresse ET/ETP simulés spécifiquement pour chaque région. Elle intègre la dépendance de l'évapotranspiration relative aux conditions climatiques, topographiques et pédologiques. Les relations statistiques entre les modèles de répartition spatiale ET/ETP et les principales caractéristiques régionales sont quantifiées au tableau 9.

Tableau 9: Relation entre les valeurs calculées ET/ETP et les différentes caractéristiques régionales (toutes les données proviennent de l'ensemble des surfaces agricoles des régions tests)

Caractéristique	Coefficient de corrélation
Rapport entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations (ETP/N) ^a	0.97
Altitude du terrain ^b	0.90
Pente ^c	0.79
Perméabilité du sol ^d	0.95
Profondeur du sol ^d	0.75
Capacité de rétention du sol ^d	0.64
Squelette du sol ^d	0.55

^a moyenne de 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'un échelon de 5°

^d Répartition des classes selon BEK200 (Cf. tableau 5)

Les résultats des analyses de corrélation ont été reportés sur un tableau de classification comprenant 81 classes (combinaison des 4 caractéristiques, de 3 classes chacune). Ce tableau a servi de base pour extrapoler à l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse les modèles de superficie ET/ETP obtenus dans les régions tests. Les classes de caractéristiques utilisées sont définies au tableau 10. Le domaine des classes a été choisi de façon à ce que chacune soit justifiée par un nombre suffisant de mailles de la grille.

Tableau 10: Caractéristiques sélectionnées dans les différentes classes utilisées pour l'extrapolation du paramètre ET/ETP (les données de superficie relative sont toutes extrapolées à l'ensemble des surfaces agricoles des régions tests)

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 de perméabilité ^b	2 - 3	17	4	39	5-6	44
Hauteur du terrain [m s. m]	< 600	28	600-1200	50	> 1200	22
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 BEK200 (Cf. tableau 5)

15.6% (ou 2'252 km²) de l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse ont pu être recensées à partir des régions tests. Rapportée aux surfaces des terres arables, cette superficie représente 19.3%; elle correspond à 13.8% pour les prairies. Les données de superficie relative se rapportant aux caractéristiques choisies se situent dans un ordre de grandeur similaire à celles de l'agriculture de l'ensemble de la Suisse.

L'extrapolation des ET/ETP exige que la classification de la région ciblée soit calquée sur les données décrites au tableau 10. Trois des quatre caractéristiques régionales ont été obtenues à partir de certains jeux de données de base: la perméabilité du sol à partir de la *Carte digitale des aptitudes des sols* (BEK200) ; les paramètres de superficie topographique - hauteur du terrain et pente – à partir du *modèle d'altitude RIMINI* (Cf. chapitre 3.2). Par contre, les indicateurs ETP/N se rapportant à la période de végétation ont dû être estimés à partir des calculs de modélisation. La figure 20 présente la répartition différenciée par surface de cet indicateur pour l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse.

Les régions dont l'indicateur affiche des valeurs supérieures ou égales à 1 – ce qui correspond à des bilans hydriques négatifs – représentent des régions potentiellement de consommation. En revanche, des valeurs égales ou inférieures à 0.6 correspondent à des régions d'approvisionnement. De manière générale, les modèles de répartition ETP/N fournissent des indications sur l'emplacement des régions ayant des besoins potentiels en irrigation. Selon la figure 20, il serait utile de repérer les régions potentiellement menacées situées plus spécifiquement dans le Plateau inférieur et dans la vallée du Rhône.

Les analyses de l'indicateur ET/ETP différencié par surface donnent des indications plus détaillées sur les besoins en irrigation. En effet, seul cet indicateur intègre la teneur actuelle en eau du sol, paramètre de grande importance pour les plantes. De plus, les relations de régression multiple tirées du tableau 10 servent à extrapoler à l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse les valeurs de ET/ETP spécifiques à chaque région. Le modèle de répartition des surfaces ainsi obtenu est présenté à la figure 21. Les régions avec les différents quantiles de non-atteinte de la valeur seuil ET/ETP de 0.8 sont illustrées à la figure 22 alors que les moyennes reposant sur plusieurs années peuvent être obtenues séparément pour les terres arables et les prairies, à partir du tableau 11. Ce tableau présente également les données exprimant les probabilités relatives (en pourcentage) d'une non-atteinte du seuil ET/ETP de 0.8. Les emplacements des régions correspondantes sont illustrés aux figures 22 à 26.

Tableau 11: Moyennes et quantiles (20%, 25%, 33%, 50%) du rapport ET/ETP pour l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse (y compris les surfaces couvertes par l'arboriculture), avec données séparées pour les terres arables et les prairies; moyennes pour les périodes de végétation 1980 – 2006; quantiles comme données de superficie relative pour ET/ETP < 0.80

		Moyenne	Q20%	Q25%	Q33%	Q50%
Terres arables		0.81	50.8 %	44.3 %	41.1 %	17.4 %
	Nombre de mailles	25221	12825	11171	10367	4380
Prairies		0.88	18.1 %	10.6 %	9.6 %	5.4 %
	Nombre de mailles	29938	5425	3178	2863	1629
Superficie agricole (totale)		0.85	35.6 %	28.7 %	26.5 %	12.8 %
	Nombre de mailles	57706	20525	16572	15288	7366

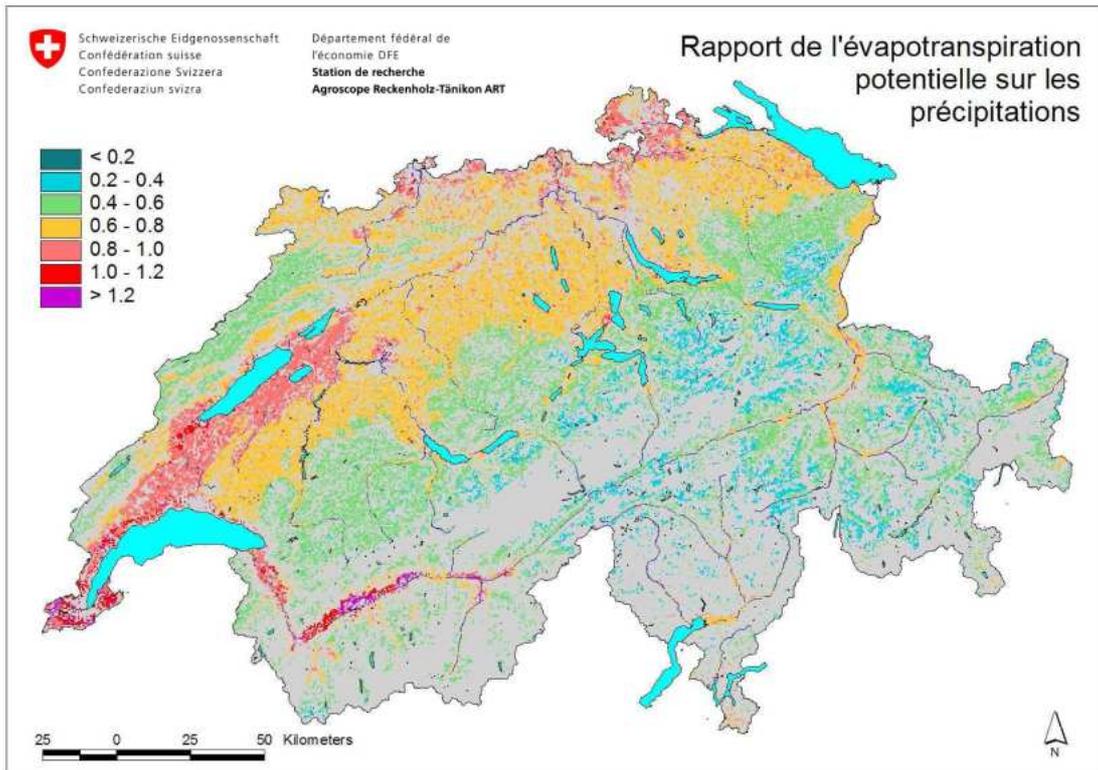


Figure 20: Répartition spatiale du rapport de l'évapotranspiration potentielle sur les précipitations (ETP/N) des surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

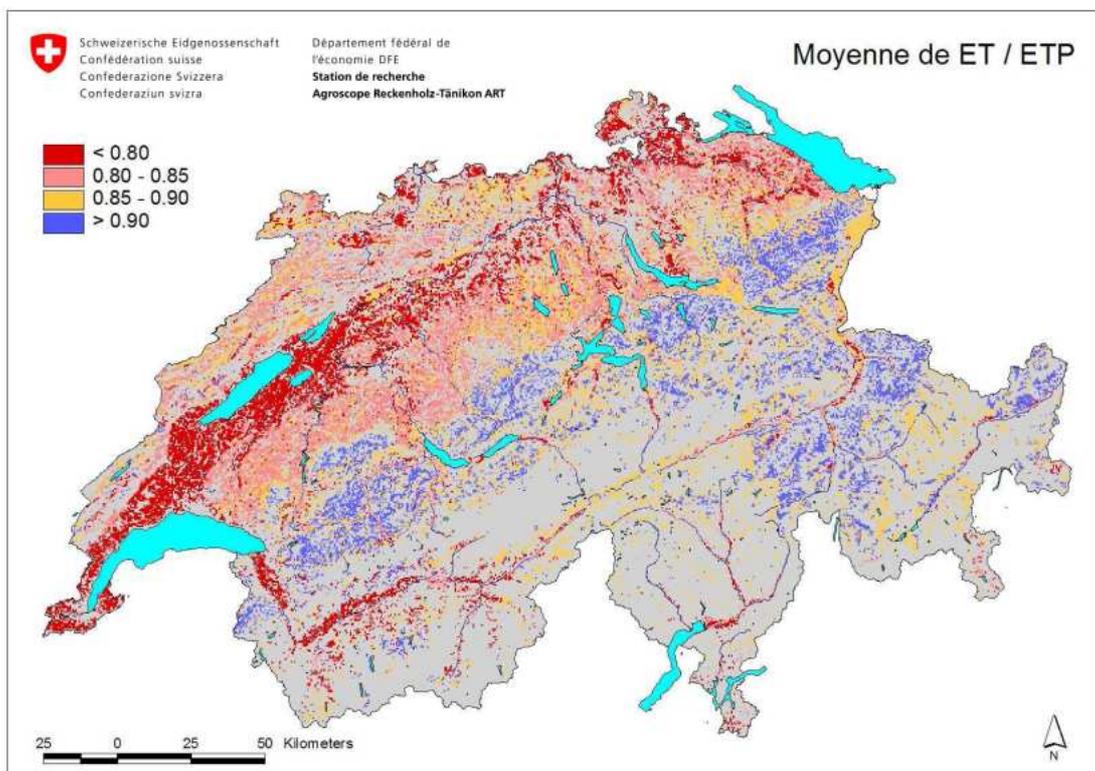


Figure 21: Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

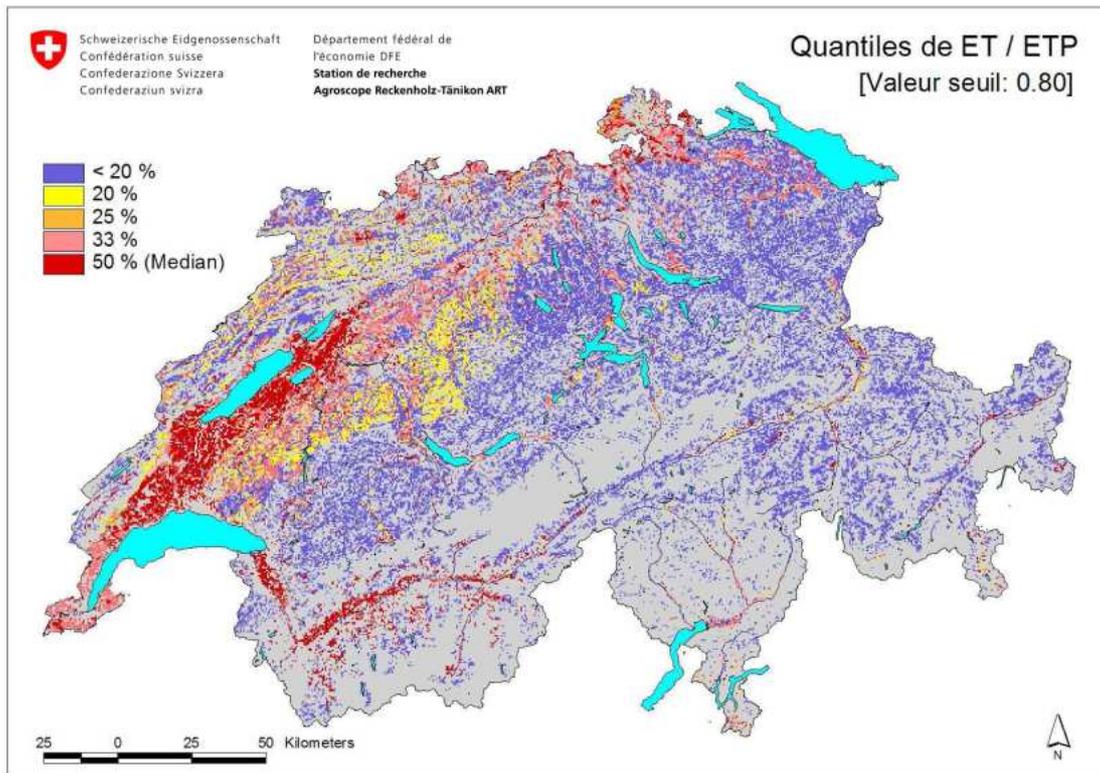


Figure 22: Quantiles sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

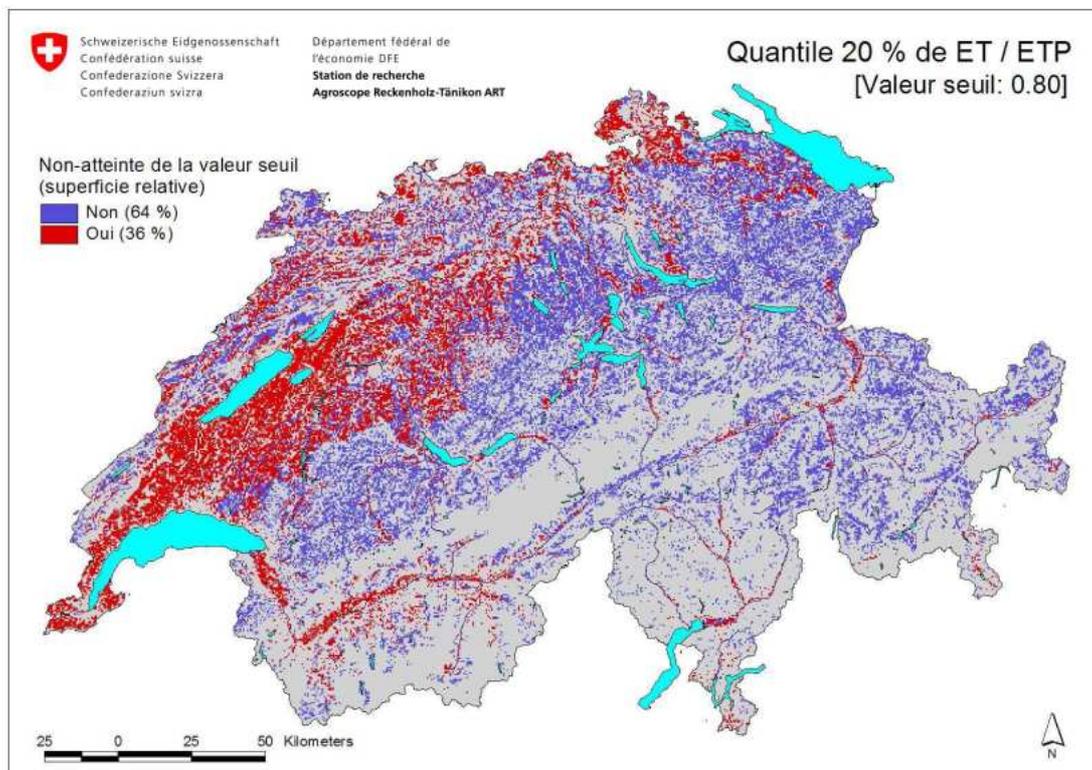


Figure 23: Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

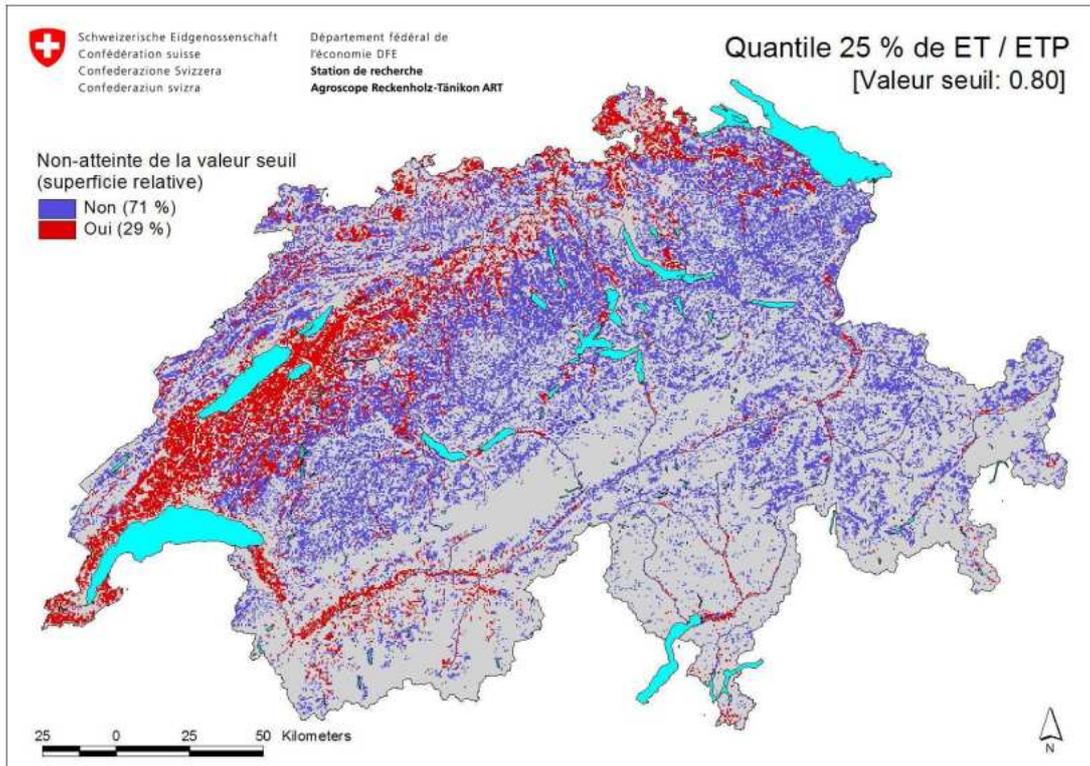


Figure 24: Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

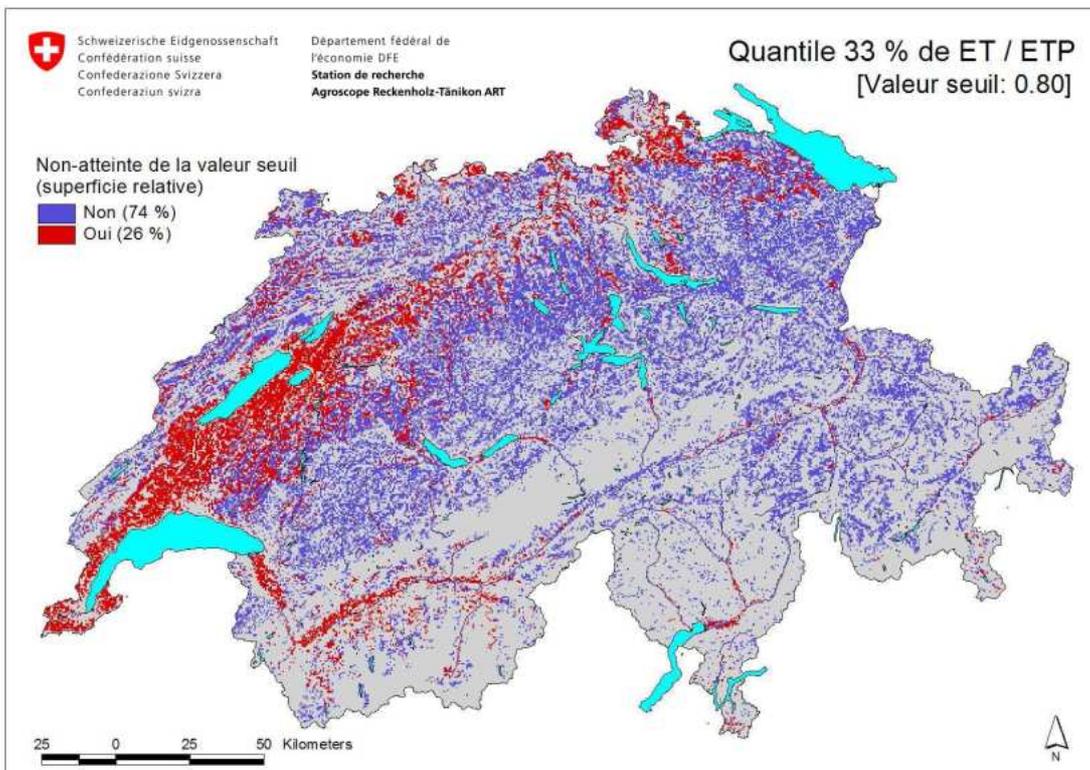


Figure 25: Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

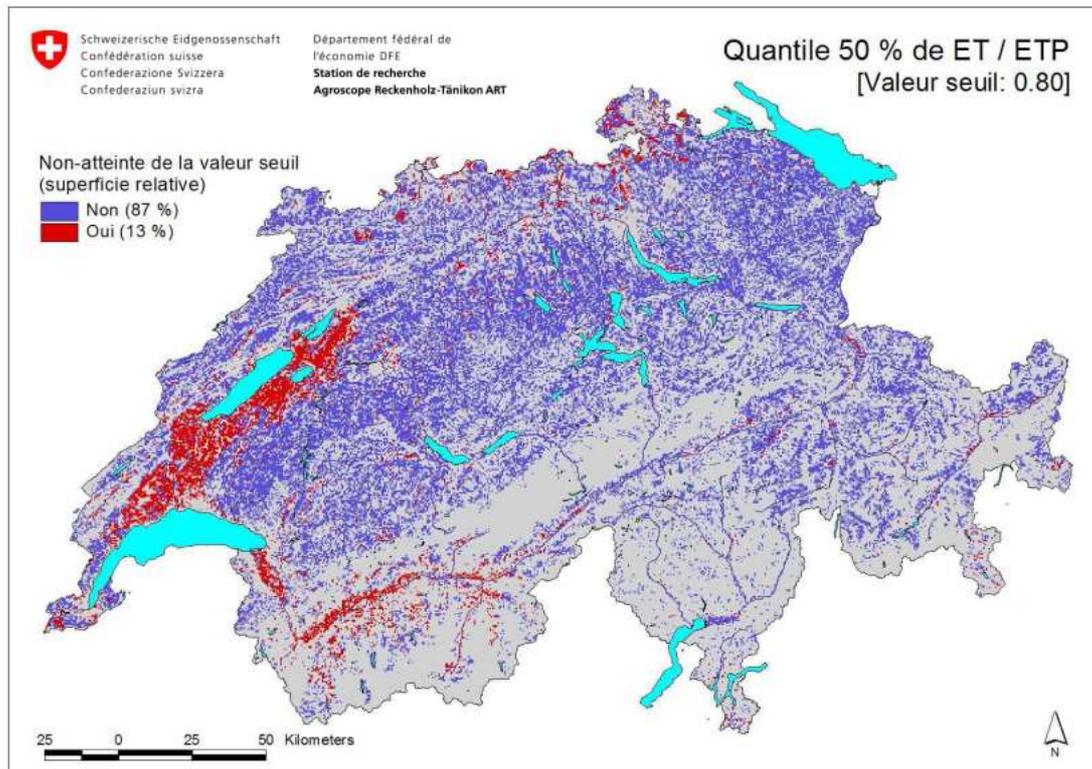


Figure 26: Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

5.2 Analyses des tendances à la sécheresse

Outre la fréquence, la durée de la non-atteinte de la valeur seuil ET/ETP est particulièrement importante pour les agriculteurs. En effet, la longueur et l'intensité de la période de sécheresse sont décisives pour les taux de perte de rendement. Pour cette raison, il a été effectué des analyses différenciées par surface de la durée de la non-atteinte de la valeur seuil ET/ETP, complétées par des analyses de scénario de comportement.

Pour la réalisation de ces analyses, les périodes de sécheresse ont été définies comme étant les périodes de non-atteinte de la valeur seuil ET/ETP de 0.8 (Cf. le chapitre 5.1); une période de sécheresse persistante d'au moins 5 jours pouvant être suivie d'une interruption de 2 jours consécutifs a été choisie comme seuil de tolérance. En cas d'interruption plus longue de l'épisode de sécheresse, le comptage était interrompu, puis repris avec une nouvelle période de sécheresse. Dans cette étude, le développement des périodes de sécheresse était limité à la durée de la période de végétation.

Les calculs de modélisation décrits au chapitre 4.3.2 ont généré des jeux de données au pas de temps journalier, spécifiques à chaque région (1980 – 2006). Ils ont servi aux analyses sur la non-atteinte de la valeur seuil de ET/ETP basées sur 27 périodes de végétation (simulation à long terme). À partir de ces jeux de données, il a été procédé à l'évaluation différenciée par surface de la longueur des périodes annuelles de non-atteinte. Les résultats de ces analyses sont présentés au tableau 12. Comme attendu, les plus longues périodes de sécheresse ont eu lieu dans les vallées du Rhône et du Tessin. Pour les terres arables, la longueur moyenne de la période de sécheresse variait entre 47 et 102 jours. Les périodes maximales atteignaient, pour certaines mailles de la grille, des valeurs supérieures à 200 jours.

Tableau 12: Moyennes régionales spécifiques de la longueur des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.80) pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris l'arboriculture); données en jours pour l'ensemble des périodes de végétation 1980 - 2006

Bassin versant		Thur	Emme	Broye	Rhône ^a	Tessin	Dischma
Terres arables	Longueur max.	54	92	107	226	127	-
	Longueur moy.	20	31	39	102	47	-
	Nombre de mailles	2470	1028	893	10	31	-
Prairies	Longueur max.	12	28	37	109	93	82
	Longueur moy.	5	9	11	56	37	38
	Nombre de mailles	1277	903	110	1050	746	48
Surfaces agricoles (total)	Longueur max.	43	63	100	128	96	82
	Longueur moy.	16	21	36	68	39	38
	Nombre de mailles	3956	1985	1025	1207	787	48

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

L'extrapolation aux surfaces cultivables de la Suisse des évaluations des périodes de sécheresse spécifiques à chaque région confirme ce qui avait été mis en évidence dans les régions tests. Les terres arables présentent une période de sécheresse d'une durée moyenne de 37 jours (Cf. figure 27) (maximum = 91 jours), alors qu'elle est réduite à 25 jours dans le cas des prairies (Cf. figure 28) (maximum = 58 jours). Pour l'ensemble de la surface agricole de la Suisse, la moyenne de cette période se situe à 31 jours (maximum = 76 jours). Des cartes indiquant les durées maximales sont données dans l'annexe E (E13, E14).

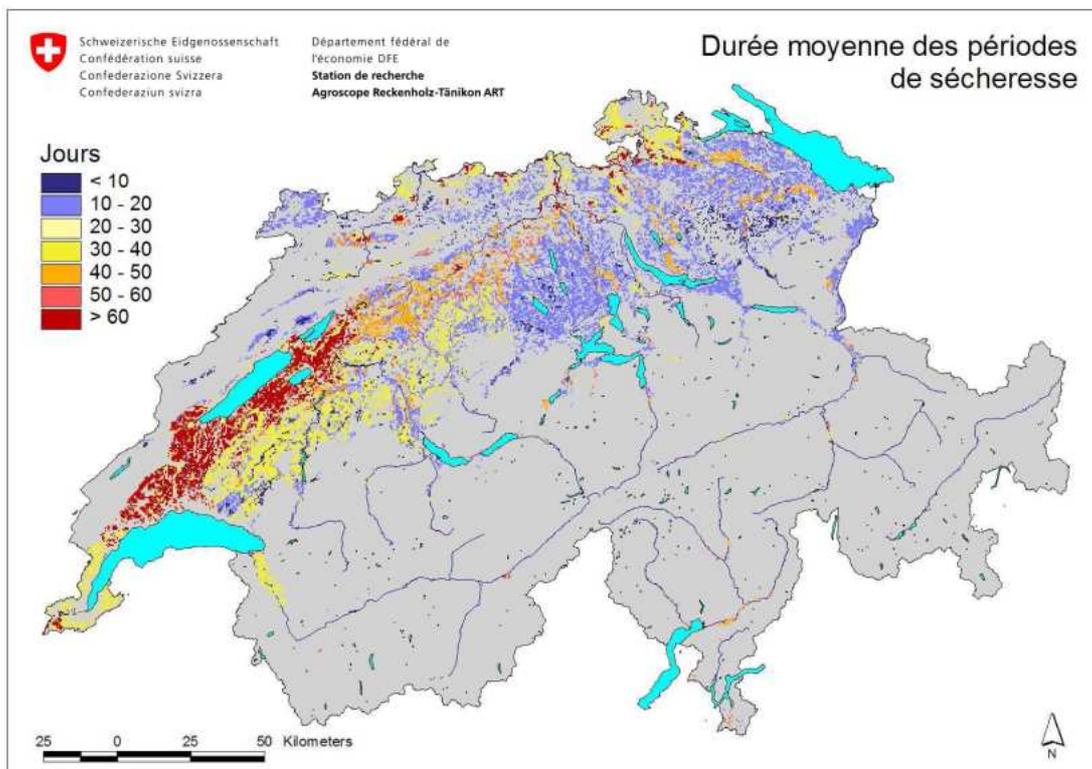


Figure 27: Durées moyennes des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.8) pour les terres arables en Suisse; calculs pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

En fonction des jeux de données calculées selon les surfaces, le Seeland et les sols plats de la vallée du Rhône sont des régions qui doivent être considérées comme présentant des risques de

sécheresse croissants. Dans ce cas, la non-atteinte persistante de la valeur seuil critique définie comme critère de sécheresse est davantage la règle que l'exception. Par ailleurs, les vallées alpines et les régions attribuées principalement aux terres arables du Plateau inférieur doivent également être considérées comme présentant des risques de sécheresse élevés.

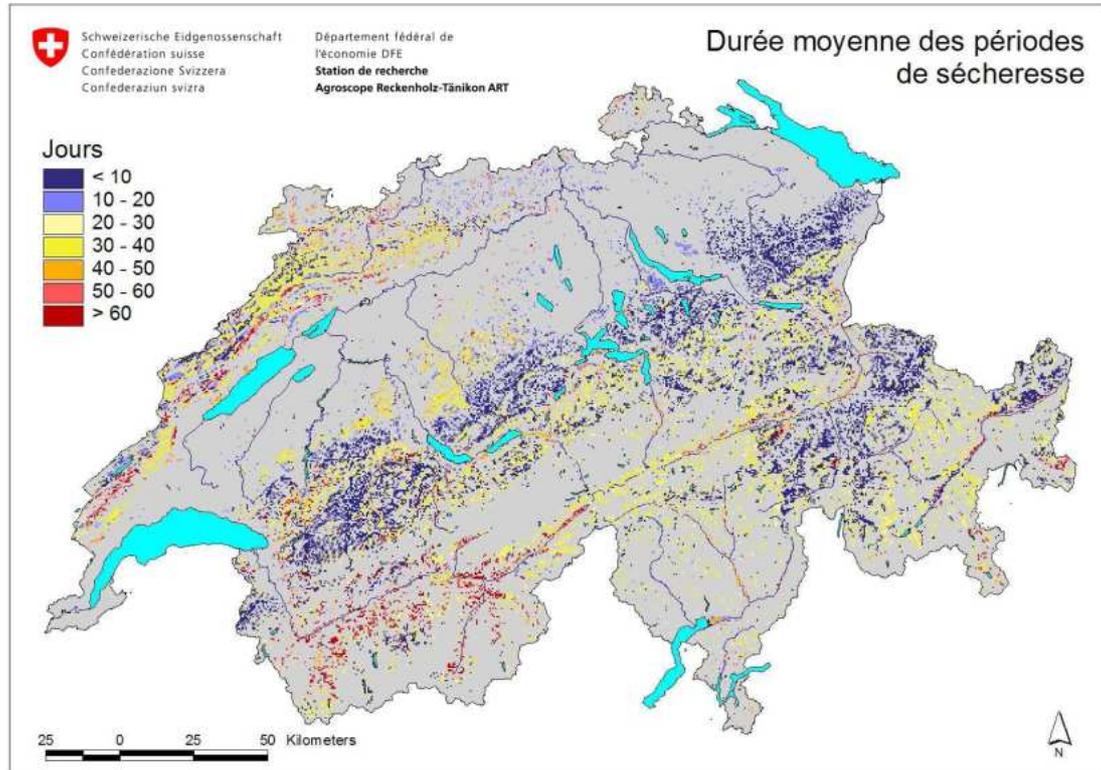


Figure 28: Durée moyenne des périodes de sécheresse ($ET/ETP < 0.8$) dans les prairies en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

L'analyse de la durée des périodes de sécheresse a été complétée par des analyses de tendances différenciées par surface. Pour définir les tendances, les pentes des droites de régression établies sur 27 valeurs annuelles de durée ont été choisies comme critère de sélection. Les comportements positifs (accroissement de la durée des périodes de sécheresse) correspondent aux pentes des droites plus grandes que 0.1 alors que les comportements négatifs (diminution de la durée des périodes de sécheresse) correspondent aux valeurs plus petites que 0.1.

L'extrapolation à l'ensemble de la surface agricole suisse des valeurs spécifiques aux régions indique une augmentation significative de la durée des périodes de sécheresse dans les régions des terres arables sur le versant nord des Alpes, en particulier dans la vallée du Rhin, au sud du lac de Constance, dans la région fluviale du lac des Quatre Cantons et dans différentes cuvettes fluviales du Plateau (Cf. figure 29). Pour les prairies, il n'a été calculé que des comportements positifs isolés dans le nord-ouest de la Suisse (Cf. figure 30).

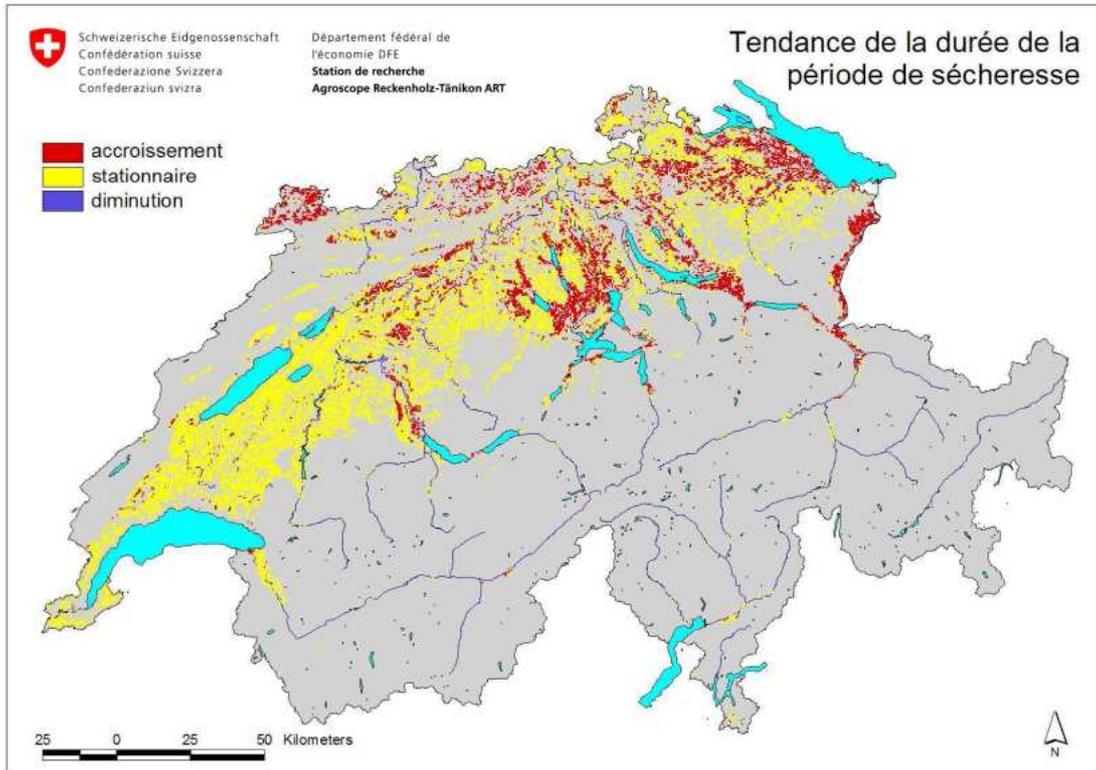


Figure 29: Analyse des tendances pour la durée de la période de sécheresse ($ET/ETP < 0.8$) des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

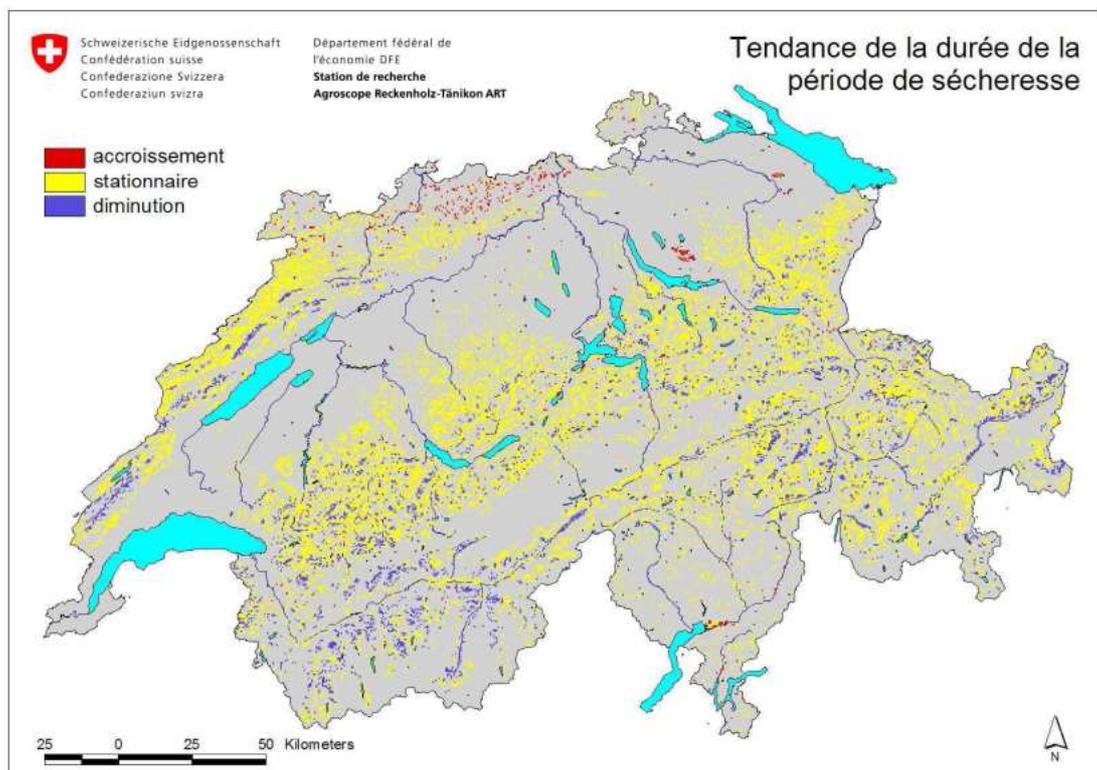


Figure 30: Analyse des tendances pour la durée de la période de sécheresse ($ET/ETP < 0.8$) des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

6 Evaluation

A l'aide d'outils modernes et de l'intégration d'une base de données étendue, la présente étude fournit des bases de décision pour évaluer les besoins en irrigation de l'agriculture suisse. Sur la base du matériel cartographique réalisé, il est désormais possible d'identifier les régions présentant différents risques de sécheresse et par conséquent de lire à grande échelle les modèles illustrant l'évolution temporelle des besoins en irrigation au cours des 27 dernières années. La différenciation spatiale des besoins en irrigation reflète principalement les conditions climatiques et les propriétés des sols ainsi que l'altitude et les différentes répartitions des terres arables et des prairies.

Les analyses des besoins en irrigation provenant du modèle s'appuient principalement sur le choix d'une valeur seuil de 0.8 pour le rapport ET/ETP. Lorsque ce seuil n'est pas atteint pendant une période suffisante, il faut s'attendre à des pertes de rendement substantielles d'un ordre de grandeur de 20% en moyenne. La non-atteinte de cette valeur seuil représente un indicateur pour l'évaluation des besoins en irrigation agricole, qui repose sur le « rendement ». Toutefois, le choix partiellement subjectif de la valeur seuil représente un compromis. Il répond au besoin des utilisateurs de pouvoir détecter avec une sécurité suffisamment grande les régions touchées. S'il avait été choisi une valeur seuil trop faible, la sécurité serait encore plus grande mais une sous-estimation des réductions de rendement des surfaces touchées dues à la sécheresse (dans le domaine de 20%) pourrait se produire.

Les distributions spatiales du rapport $ET/ETP < 0.8$ obtenus montrent avant tout à l'ouest du Plateau des régions potentiellement demandeuses en irrigation. Les autres régions présentant un risque élevé de sécheresse sont la vallée du Rhône, chaude et pauvre en précipitations, les vallées inférieures du Tessin, différentes vallées alpines des Grisons ainsi que la partie nord-est du Plateau (dont la région inférieure de la Thur). De manière générale, la probabilité de non-atteinte de la valeur seuil est plus grande pour les terres arables que pour les prairies. Le quantile 33% de non-atteinte est très grand pour l'ensemble des terres arables en Suisse vu qu'il correspond à 41%. En revanche, cette valeur est estimée à 10% seulement pour les prairies.

En raison du critère choisi ($ET/ETP < 0.8$) pour définir les besoins en irrigation, les calculs indiquent qu'une part considérable (environ 26%) des surfaces agricoles suisses nécessite des besoins en irrigation. Cette situation signifie qu'une irrigation supplémentaire devrait être entreprise régulièrement sur ces surfaces pour améliorer le rendement des grandes cultures et à moins grande importance celui des prairies. En considérant l'ensemble de la superficie agricole, la surface qui se rapporte au quantile 33% (c'est-à-dire chaque trois ans) correspond à une superficie d'environ 400'000 ha, dont 275'000 ha de terres arables. Cette valeur se situe bien au-dessus des surfaces actuellement irriguées qui représentent environ 50'000 ha. Cela signifie qu'une irrigation régulière ou occasionnelle ne s'applique aujourd'hui qu'aux surfaces fortement touchées, c'est-à-dire à celles qui sont caractérisées par une faible valeur seuil de ET/ETP et/ou par un plus haut quantile (p. ex. à 50% ce qui correspond à 13% de la superficie totale).

En utilisant une valeur seuil de 0.8, il en ressort que l'irrigation devrait être étendue à davantage de surfaces. Dans ces régions, la demande en irrigation pourrait devenir de plus en plus forte. A cause du changement climatique, les surfaces touchées pourraient encore augmenter ces prochaines décennies augmentant ainsi la demande en irrigation. Le changement des conditions climatiques - plus hautes températures et moins de précipitations durant l'été - est lié à une augmentation du potentiel d'évapotranspiration, c'est-à-dire à une demande en eau toujours plus croissante pour les cultures.

Les cultures grandes consommatrices en eau seraient les premières concernées: la pomme de terre ou les légumes, puis viendraient le maïs et les céréales et finalement les surfaces les plus exposées des prairies. Le risque lié à la sécheresse sera caractérisé non seulement par la fré-

quence de l'apparition d'une non-atteinte de la valeur seuil mais aussi par la durée des périodes de sécheresse. Les analyses réalisées dans la présente étude indiquent que de nombreuses surfaces agricoles se trouvent déjà aujourd'hui pendant plusieurs semaines ou mois consécutifs en dessous des limites critiques de sécheresse quand elles ne sont pas irriguées artificiellement. En outre, les analyses des tendances mettent en évidence une augmentation de la durée des périodes de sécheresse pour de nombreuses régions du versant nord des Alpes, en particulier au nord-est du pays. Cette tendance peut probablement déjà avoir un lien avec le réchauffement climatique actuel.

La demande croissante en eau d'irrigation est annonciatrice d'une part d'un conflit potentiel des différents secteurs pour les besoins en eau – comme en été 2003 – et d'autre part de risques pour l'environnement. Le danger de lessivage des éléments nutritifs, ou l'abaissement du niveau de la nappe phréatique en sont des exemples. Ces risques doivent être reconnus suffisamment tôt et intégrés surtout par rapport au choix de la source d'eau, à la quantité et la technique d'irrigation, ainsi qu'à la fixation de la période d'irrigation.

La présente étude a permis de faire une première estimation distribuée des besoins en irrigation des régions agricoles de la Suisse. Cet aperçu permet d'évaluer les différenciations spatiales et les tendances chronologiques. Dans une phase ultérieure, les besoins en irrigation - aussi par rapport aux prévisions climatiques - pourraient être quantifiés à la même échelle. Les données et les outils nécessaires à ce travail sont disponibles. Cependant, il sera indispensable d'intégrer au modèle des calculs supplémentaires nécessitant des données locales et des paramètres spécifiques aux cultures pour pouvoir réaliser l'analyse détaillée d'un emplacement spécifique ou pour pouvoir conduire des projets d'irrigation destinés à des cultures ou à des rotations de cultures particulières.

7 Bibliographie

- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2008): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2007. Bern
- 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
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N°56. Rome, Italy. 193 pp.
- GURTZ, J., ZAPPA, M., JASPER, K., LANG, H., BADOUX, A., VERBUNT, M. & VITVAR, T. (2003): A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrol. Processes* 17, 297-311
- JASPER, K., CALANCA, P.L., GYALISTRAS, D. & FUHRER, J. (2004): Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Res.* 26, 113-129.
- JASPER, K., CALANCA, P. & FUHRER, J. (2006): Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change. *J. Hydrol.* 327, 550-563
- KLOK, E.J., JASPER, K., ROELOFSMA, K.P., BADOUX, A. & GURTZ, J. (2001): Distributed hydrological modelling of a glaciated Alpine river basin. - *Hydrol. Sci. J.* 46, 553-570
- MONTEITH, J.L. UND UNSWORTH, M.H. (1990): Principles of environmental physics, Second Edition, Edward Arnold, London.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. - 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- PÖHLER, H., CHMIELEWSKI, F.-M., JASPER, K., HENNIGES, Y., SCHERZER, J. (2007): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- RAES, D. (2002): Yield response to water. Report KuLeuven, Leuven, Belgium, 17pp.
- SCHÜEPP, M. & GENSLER, G. (1980): Klimaregionen der Schweiz. In: Müller G., 1980. Die Beobachtungsnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Konzept 1980. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 93, Anhang Ib. Zürich.
- 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]
- SEVRUK, B. (Ed.) (1986): Correction of precipitation measurements. Zürcher Geographische Schriften, 23 ETH Zürich.

swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004): RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz. Wabern

VERBUNT, M., GURTZ, J., JASPER, K., LAMG, H., WARMERDAM, P. & ZAPPA, M. (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modelling. J. Hydrol. 182, 36-44

VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 44, 892-898

8 Annexes

Annexe A

Glossaire

Annexe B

Stations de débit utilisées pour la calibration du modèle

Annexe C

Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97

Annexe D

Unités cartographiques de la Carte digitale des aptitudes des sols de la Suisse

Annexe E

Cartes de la statistique de la superficie de ET/ETP

Annexe F

Répertoire des tableaux

Annexe G

Répertoire des figures

A: Glossaire

Pondération par l'inverse de la distance (*engl.* Inverse Distance Weighting - IDW): cette méthode est basée sur le postulat que les données spatiales mesurées dispersément présentent certaines similitudes en fonction de leur distance dans l'espace. La valeur à un point non observé est évaluée par la moyenne pondérée des valeurs mesurées voisines. Les pondérations de l'estimateur linéaire appliqué sont proportionnelles à l'inverse des distances séparant le point à estimer et le point mesuré appliqué.

La pondération par l'inverse des distances est utilisée dans le modèle WaSiM-ETH (la plupart du temps en combinaison avec la régression dépendant de l'altitude) pour interpoler dans la grille du modèle les données mesurées à partir des stations météorologiques. Détails dans: Schulla & Jasper [1998] ou sur le site http://www.wasim.ch/the_model/feature_idw.htm). Voir aussi sous *régression dépendant de l'altitude*.

Perméabilité: souvent utilisée comme synonyme de *conductivité hydraulique saturée*. Dans la carte d'utilisation des sols de la Suisse (BEK200), la perméabilité est utilisée pour caractériser la perméabilité hydrique des sols. La plupart du temps, on utilise des notions qualitatives à cet effet (p. ex. perméabilité moyenne).

Densité de drainage: paramètre de calibration utilisé dans le modèle WaSiM-ETH et se rapportant à une (sous)région. Ce paramètre tient compte de la densité de drainage du sol dans une maille de la grille ainsi que de la différence entre la conductivité hydraulique verticale et la conductivité hydraulique latérale. En raison de sa caractéristique, c'est un paramètre de récolte qui agit de façon linéaire avec la quantité calculée de l'écoulement hypodermique (interflow).

Accumulation de flux: bassin versant spécifique d'un point en nombre de mailles de la grille. En fixant une valeur seuil, le réseau hydrographique peut être extrait de l'accumulation de flux. Voir aussi *Tanalys*.

Conductivité hydraulique saturée: quotient de la vitesse de filtration et du gradient hydraulique utilisé comme unité de mesure pour la perméabilité d'un sol saturé en eau. *Contraire*: conductivité hydraulique non saturée. En général, il est admis qu'une diminution de l'humidité du sol réduit fortement la conductivité hydraulique.

Régression dépendant de l'altitude: évaluation de la valeur interpolée à l'aide d'un paramètre météorologique dépendant de l'altitude. Pour plus de détails, voir dans: Schulla & Jasper [1998] ou sur http://www.wasim.ch/the_model/feature_regression.htm). Voir aussi *Pondération par l'inverse de la distance*.

Interflow (écoulement hypodermique ou écoulement de subsurface): ruissellement latéral dans les horizons superficiels du sol.

Interception: capture ou rétention des précipitations à la « surface » de la végétation.

Stockage par interception: capacité de stockage et de rétention des eaux de pluie par la végétation.

Régression multiple (*engl.* multiple regression): relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes.

Méso-échelle: en hydrologie, intervalle de superficies compris entre 1 km² et 10'000 km².

Fonction de pédotransfert (PTF): base d'évaluation des propriétés des sols d'importance hy-

drologique (courbes de rétention, unités de mesure de stockage, etc.). Les PTF servent de substituts aux valeurs mesurées qui ne peuvent être évaluées que par dispersion et non pas sur l'ensemble d'une surface.

Gamme pF: expression de la tension de succion du sol. Le pF correspond au logarithme en base dix de la tension de succion du sol. Celle-ci correspond à la pression négative de l'eau du sol par rapport à la pression atmosphérique. Elle indique la force de liaison de l'eau dans les régions non saturées du sol.

Phénologie: se rapporte aux phénomènes de développement récurrents dans la nature. Par exemple : les stades de développement phénologique caractéristiques de la végétation sont saisis et simulés dans la modélisation hydrologique.

Constante de rétention: paramètre de calibration d'une sous-région utilisé dans le modèle WaSiM-ETH. Ce paramètre est utilisé pour caractériser l'écoulement d'un réservoir. Il décrit le laps de temps écoulé entre les points clés des courbes des flux d'eau à l'entrée et à la sortie.

Modèle RIMINI: Modèle d'altitude pour l'ensemble de la Suisse avec une maille de résolution de 250 m.

Modèle de routage: calcule toutes les concentrations de débit (déformation du débit) dans les bassins et dans les régions voisines.

Parcours de routage: sections des cours d'eau.

Structures de routage: le réseau des cours d'eau dans un bassin versant (partie haute/partie basse d'un bassin versant, distribution des cours d'eau).

Pente de la droite de régression: les droites de régression sont un moyen souvent utilisé pour suivre les comportements de différentes données et mettre en évidence des phénomènes aléatoires perturbateurs. La pente est un dérivé utile de la droite de régression.

TANALYS: ce programme d'analyse topographique est un instrument de base pour travailler avec le modèle WaSiM-ETH. Partant d'un modèle d'altitude numérique (DHM), il permet d'extraire et de préparer les données nécessaires à la grille, les structures et les relations importantes pour le modèle. Voir les détails dans Schulla & Jasper [1998] et sur <http://www.wasim.ch/products/tanalys.htm>). Voir aussi *accumulation des flux*.

Thermal Time Model: modèle phénologique qui se base typiquement sur la température de l'air pour établir le début de la végétation.

Méthode de translation et de rétention: méthode utilisée dans de nombreux modèles de routage.

Vitesse de translation: vitesse d'écoulement sans l'influence des effets de stockage.

Horizon de sol insaturé: couches de sol situées au-dessus de la nappe phréatique et caractérisées par une capacité d'absorption saturée.

B: Stations de débit utilisées pour la calibration du modèle

Tableau 13: Stations de débit utilisées pour la calibration du modèle dans les régions tests;
AE₀: superficie du bassin versant (selon BAFU [2008])

Station de débit	Cours d'eau	y-Coord.	x-Coord.	Altitude [m s.m.]	AE ₀ [km ²]
Thu					
Andelfingen	Thur	693510	272500	356	1696
Frauenfeld	Murg	709540	269660	390	212
Wängi	Murg	714105	261720	466	78.9
Halden	Thur	733560	263180	456	1085
St. Gallen	Sitter	742540	253230	577	261
Hundwil	Urnäsch	740170	244800	746	64.5
Appenzell	Sitter	749040	244220	769	74.2
Herisau	Glatt	737270	251290	679	16.2
Jonschwil	Thur	723675	252720	534	493
Mosnang	Rietholzbach	718840	248440	682	3.31
Mogelsberg	Necker	727110	247290	606	88.2
Stein/Iltishag	Thur	736020	228250	850	84.0
Emme					
Wiler	Emme	608220	223240	458	939
Emmenmatt	Emme	623610	200420	638	443
Eggiwil	Emme	627910	191180	745	124
Langnau	Ifis	627320	198600	685	188
Broye					
Payerne	Broye	561660	187320	441	392
Rhone					
Sion	Rhone	593770	118630	484	3373
Brig	Rhone	641340	129700	667	913
Visp	Vispa	634150	124850	659	778
Blatten	Lonza	629130	140910	1520	77.8
Ticino					
Bellinzona	Ticino	721245	117025	220	1515
Lumino	Moesa	724765	120360	249	471
Loderio	Brenno	717770	137270	348	397
Pollegio	Ticino	716120	135330	298	444
Dischmabach					
Davos-Kriegsmatte	Dischmabach	786220	183370	1668	43.3

C1: Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 - Nomenclature

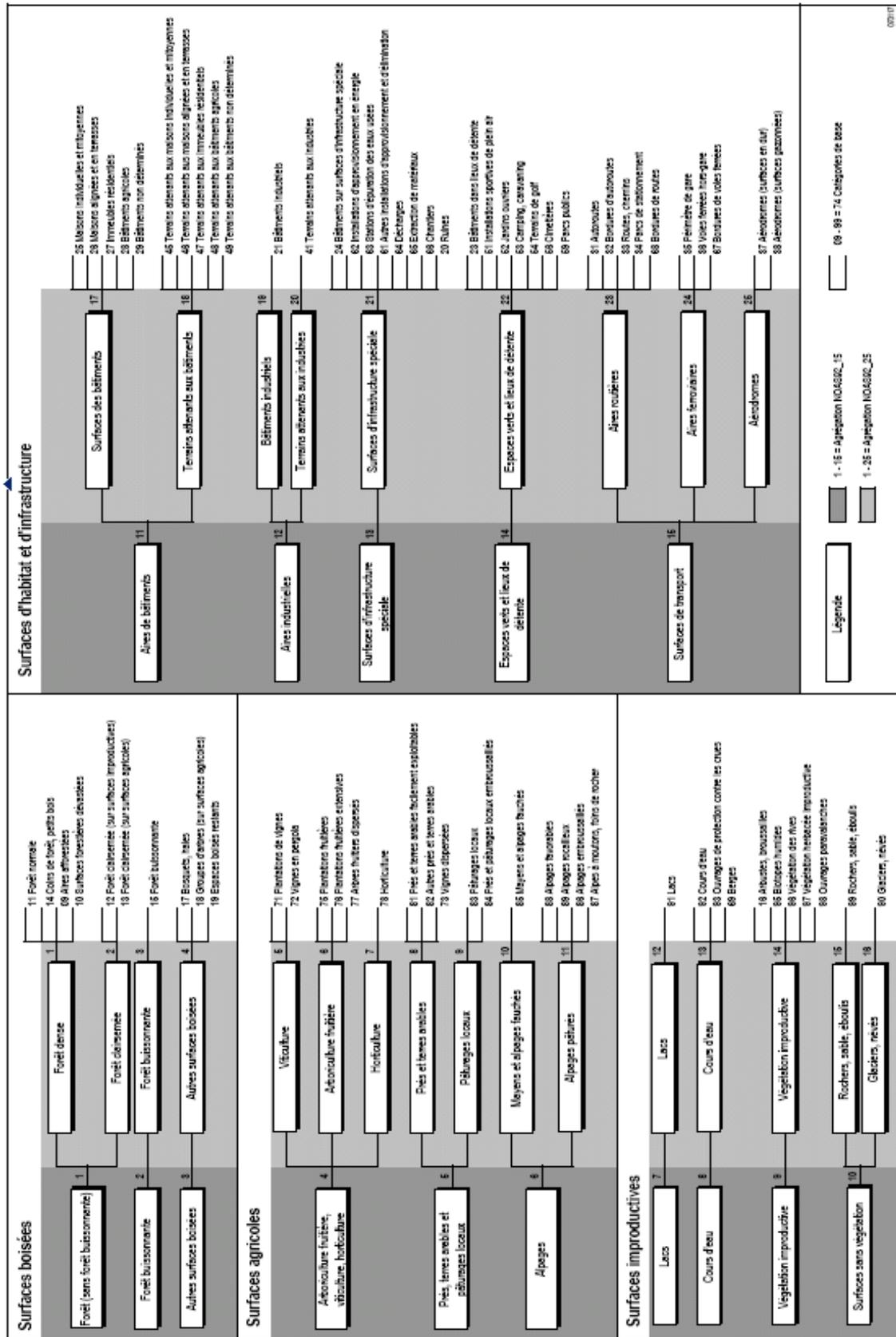


Figure 31: Statistique suisse de la superficie 1992/97 – Nomenclature NOAS92: Catégories de base et agrégations (BFS [2001])

C2: Statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 - Reclassement

Tableau 14:

Reclassification

Code	Statistique de la superficie	Superficie [ha]	Code	WaSiM-Catégories
9	Aires afforestées	3349	4	Forêt
10	Surfaces forestières dévastées	14851	5	Surfaces forestières ouvert
11	Forêt normale	962312	4	Forêt
12	Forêt clairsemée (sur surfaces improductives)	52825	5	Surfaces forestières ouvert
13	Forêt clairsemée (sur surfaces agricoles)	24108	5	Surfaces forestières ouvert
14	Coins de forêt, petits bois	44711	6	Forêt buissonnante
15	Forêt buissonnante	60514	6	Forêt buissonnante
16	Arbustes, broussailles	70278	10	Arbustes
17	Bosquets, haies	35807	5	Surfaces forestières ouvert
18	Groupes d'arbres (sur surfaces agricoles)	38157	5	Surfaces forestières ouvert
19	Espaces boisés restants	35011	5	Surfaces forestières ouvert
20	Terrains attenants aux industries	98	2	Aires de construction rural
21	Bâtiments industriels	7292	2	Habitat rural
23	Bâtiments dans lieux de détente	420	3	Habitat dispersé
24	Bâtiments sur surfaces d'infrastructure spéciale	228	2	Habitat rural
25	Maisons individuelles et mitoyennes	10652	2	Habitat rural
26	Maisons alignées et en terrasses	760	2	Habitat rural
27	Immeubles résidentiels	5480	2	Habitat rural
28	Bâtiments agricoles	9131	2	Habitat rural
29	Bâtiments non déterminés	12485	2	Habitat rural
31	Autoroutes	3602	2	Habitat rural
32	Bordures d'autoroutes	2214	12	Végétation restant
33	Routes, chemins	64791	2	Habitat rural
34	Parcs de stationnement	4358	2	Habitat rural
35	Périmètre de gare	2301	2	Habitat rural
36	Voies ferrées hors-gare	3331	3	Habitat dispersé
37	Aérodromes (surfaces en dur)	841	2	Habitat rural
38	Aérodromes (surfaces gazonnées)	744	12	Végétation restant
41	Terrains attenants aux industries	12941	3	Habitat dispersé
45	Terrains attenants aux [25]	45705	3	Habitat dispersé
46	Terrains attenants aux [26]	1943	3	Habitat dispersé
47	Terrains attenants aux [27]	14062	3	Habitat dispersé
48	Terrains attenants aux [28]	14948	3	Habitat dispersé
49	Terrains attenants aux [29]	22392	3	Habitat dispersé
51	Installations sportives de plein air	6760	12	Végétation restant
52	Jardins ouvriers	1807	9	Arboriculture fruitière
53	Camping, caravanning	1045	12	Végétation restant
54	Terrains de	1126	12	Végétation restant
56	Cimetières	1371	12	Végétation restant
59	Parcs publics	3331	12	Végétation restant

Code	Statistique de la superficie	Superficie [ha]	Code	WaSiM-Catégories
61	Autres installations d'approvisionnement et d'élimination	303	3	Habitat dispersé
62	Installations d'approvisionnement en énergie	1176	2	Habitat rural
63	Stations d'épuration des eaux usées	510	2	Habitat rural
64	Décharges	2438	3	Habitat dispersé
65	Extraction de matériaux	5385	3	Habitat dispersé
66	Chantiers	5975	3	Habitat dispersé
67	Bordures de voies ferrées	2817	12	Végétation restant
68	Bordures de routes	4332	12	Végétation restant
69	Berges	2717	12	Végétation restant
71	Plantations de vignes	15290	9	Arboriculture fruitière
72	Vignes en pergola	146	9	Arboriculture fruitière
73	Vignes dispersées	227	9	Arboriculture fruitière
75	Plantations fruitières	8288	9	Arboriculture fruitière
76	Plantations fruitières extensives	3306	9	Arboriculture fruitière
77	Arbres fruitiers dispersés	29886	9	Arboriculture fruitière
78	Horticulture	4036	9	Arboriculture fruitière
81	Prés et terres arables facilement exploitables	547754	7/8	Terres arables/prairies ^{a)}
82	Autres prés et terres arables	289374	7/8	Terres arables/prairies
83	Pâturages locaux	87303	7/8	Terres arables/prairies
84	Prés et pâturages locaux embroussaillés	1708	11	Prés et pâturages locaux embroussaillés
85	Mayens et alpages fauchés	32316	8	Prairies
86	Alpages embroussaillés	39646	11	Prés et pâturages locaux embroussaillés
87	Alpes à moutons, foins de rocher	51124	8	Prairies
88	Alpages favorables	368691	8	Prairies
89	Alpages rocailloux	46024	14	Rochers, sable, éboulis
90	Glaciers, névés	134757	15/16	Glaciers, névés ^{b)}
91	Lacs	142235	1	Lacs et cours d'eau
92	Cours d'eau	28253	1	Lacs et cours d'eau
93	Ouvrages de protection contre les crues	762	3	Habitat dispersé
95	Biotopes humides	7931	13	Biotopes humides
96	Végétation des rives	1036	13	Biotopes humides
97	Végétation herbacée improductive	182384	12	Végétation restant
98	Ouvrages paravalanches	1422	3	Habitat dispersé
99	Rochers, sable, éboulis	480842	14	Rochers, sable, éboulis

^{a)} Classification des terres arables et des prairies selon le système d'indicateur de MONET (OFS et al. [2002])

^{b)} La classification des surfaces glaciaires en zone de glace et en zone de névé a été effectuée en fonction de l'altitude. Les surfaces glaciaires situées en dessous de 2900 m s. m. sont définies comme des zones de glace alors que les surfaces situées au dessus sont définies comme des zones de névé.

D: Définition des unités cartographiques selon les BEK200

Tableau15: Unité cartographique (UC) de la Carte des aptitudes des sols de la Suisse (BEK200) avec les paramètres hydrologiques des sols (définition des codes voir tableau 5)

UC	Unités cartographiques	Profondeur physiologique	Squelette	Conductivité hydraulique	Capacité de rétention	Engorgement
1	Lacs	-	-	-	-	-
6	Marais	-	-	-	-	-
7	Agglomérations	-	-	-	-	-
8	Rochers	-	-	-	-	-
JURA TABULAIRE						
A1	Plateaux (calcaires)	3	4	5	3	-
A2	Pentes raides, exposition générale au sud, inclinaison >35%	2	5	5	2	-
A3	Pentes raides, exposition générale au nord, inclinaison >35%	3	4	3	3	2
A4	Plateaux (marnes)	5	2	3	5	-
A5	Versants, marnes ou limons de pente, exposition générale au sud, inclinaison <35%	5	2	3	5	2
A6	Versants, marnes ou limons de pente, exposition générale au nord, inclinaison <35%	5	2	2	4	2
A7	Plateaux, lœss et lehm	6	1	4	6	-
A8	Versants, lœss et lehm, exposition générale au sud, inclinaison <35%	5	1	4	6	-
A9	Versants, lœss et lehm, exposition générale au nord, inclinaison <35%	5	1	4	6	2
BASSINS ET VALLEES DANS LE JURA TABULAIRE-BASSINS DANS LE JURA PLISSE.						
B2	Jura tabulaire, plaine alluviale	5	2	3	5	2
B3	Jura tabulaire, graviers, inclinaison <10%	5	4	6	3	-
B4	Jura tabulaire, combe inclinée, inclinaison <25%	5	3	3	5	2
B5	Jura plissé, plaine alluviale	5	2	3	5	2
B6	Jura plissé, graviers	5	4	5	4	-
B7	Jura plissé, cailloutis du Sundgau et limon d'altération	6	2	4	5	-
B8	Jura plissé, versants, molasse mélangée, exposition générale au sud, inclinaison <25%	5	2	5	4	-
B9	Jura plissé, versants, molasse mélangée, exposition générale au sud, inclinaison <25%	5	2	5	5	2
VALLEES LONGITUDINALES DANS LE JURA PLISSE						
C1	Zones à tourbières	4	1	3	-5	4
C2	Moraines	5	4	4	4	-
C3	Graviers	4	4	6	3	-
C4	Alluvions	5	3	3	5	2
C5	Calcaires	3	4	5	3	-
C6	Moraines du pied du Jura	3	4	6	3	-
C7	Versants, molasse et dépôts superficiels, exposition générale au sud, inclinaison <25%	4	3	5	4	-
C8	Versants, molasse et dépôts superficiels, exposition générale au nord, inclinaison <25%	4	3	5	-4	3

UC	Unités cartographiques	Profondeur physiologique	Squelette	Conductivité hydraulique	Capacité de rétention	Engorgement
Plateaux du Jura						
D	comme D1					
D1	Plateaux, bombements calcaires	3	4	5	4	-
D2	Combes anticlinales et synclinales	4	2	2	-5	3
Chaînes dans les chaînes du Jura						
E1	Versants, limons de pente, exposition générale au sud, inclinaison <35%	4	3	4	4	-
E2	Pentes raides, calcaires, exposition générale au sud, inclinaison >35%	3	4	5	3	-
E3	Pentes raides avec têtes et bancs rocheux, inclinaison >35%	2	5	6	2	-
E4	Plaines tronquées, aplanissements	4	4	3	4	-
E5	Croupes et hauts de versants, calcaires	3	4	5	4	-
E6	Versants, limons de pente, exposition générale au nord, inclinaison <35%	4	3	3	4	-
E7	Pentes raides, calcaires, exposition générale au sud, inclinaison <35%	3	4	5	3	-
E8	Combes inclinées, limons de pente, exposition générale au sud	4	3	3	-4	3
E9	Combes inclinées, limons de pente, exposition générale au nord	4	3	3	-5	4
PLAINES DES BASSES REGIONS						
F1	Marais, tourbières	4	1	3	-5	4
F2	Graviers	5	3	6	4	-
F3	Alluvions récentes, argileuses	4	2	2	-5	3
F4	Alluvions récentes, sableuses	5	2	5	4	2
COLLINES MORAINIQUES						
G1	Cuvettes, bassins de surcreusement glaciaire, moraines de fonds, marais	4	2	3	-4	4
G2	Plaine graveleuse fluvio-glaciaire	5	3	6	4	-
G3	Dos, drumlins peu marqués, moraines terminales	5	3	4	5	-
G4	Alluvions fines	4	2	4	-5	3
BASSES COLLINES MOLASSIQUES PARTIELLEMENT RECOUVERTES DE MORAINES						
H1	Plateaux légèrement ondulés et terrasses, moraines argileuses, Suisse orientale et région lémanique	5	3	4	6	2
H2	Versants, surtout vallums morainiques, inclinaison <25%, Suisse orientale, région lémanique	5	3	4	-5	3
H3	Pentes raides, surtout molasse, inclinaison >25%	4	3	4	4	-
H4	Cuvettes, rigoles d'accumulation	4	1	3	-5	4
H5	Plateaux légèrement ondulés et terrasses, moraine/molasse sableuse, Suisse occidentale	5	2	5	5	-
H6	Versants, inclinaison <25%	5	2	5	5	-
H7	Deckenschotter	6	4	6	4	-
Vallées alluviales du Moyen-Pays						
J1	Alluvions fines	4	2	4	-5	3
J2	Alluvions graveleuses	4	4	5	4	-
Moyennes collines molassiques avec formes glaciaires locales						
K1	Plateaux et terrasses, molasse à grain fin	5	2	4	5	2

UC	Unités cartographiques	Profondeur physiologique	Squelette	Conductivité hydraulique	Capacité de rétention	Engorgement
K2	Versants, molasse à grain fin, inclinaison <25%	6	2	5	5	2
K3	Pentes raides, molasse à grain fin, inclinaison >25%	4	2	5	4	-
K4	Cuvettes, rigoles d'accumulation	4	2	4	-5	3
Pays de drumlins avec un certain relief						
L2	Cuvettes prédominantes	3	1	2	-4	4
L3	Bosses et cuvettes, non séparables dans le dessin	3 / 4	1 / 4	2 / 6	-4 / 3	- / 4
L4	Bosses peu marquées en alternance avec des combes mouillées, inclinaison <25%	4	3	5	4	-
Hautes collines molassiques à fort relief d'érosion (Hörnli)						
M1	Croupes, inclinaison <25%	4	3	4	4	2
M2	Versants, inclinaison <35%	4	3	3	-5	3
M3	Pentes raides, inclinaison >35%	4	3	3	4	2
M4	Cuvettes, rigoles d'accumulation	4	3	3	-5	4
Hautes collines molassiques à fort relief d'érosion (Napf)						
N1	Croupes, aplanissements, inclinaison <25%	4	3	5	4	-
N2	Versants, inclinaison <35%	5	3	4	5	2
N3	Pentes raides, inclinaison >35%	4	3	5	4	2
N4	Cuvettes rigoles d'accumulation	4	3	4	-5	4
Molasse sableuse du bord des Alpes						
O1	Zones planes, inclinaison <10%	4	2	4	-5	3
O2	Versants, inclinaison <35%	5	2	4	-6	3
O3	Pentes raides, exposition générales au sud, inclinaison >35%	4	3	4	5	2
O4	Pentes raides, exposition générale au sud, inclinaison >35%	4	3	4	5	2
O5	Cuvettes, rigoles d'accumulation	4	2	3	-5	4
Poudingue prédominant du bord des Alpes						
P1	Croupes et versants traversés de bancs rocheux	3	4	4	2	-
P2	Versants, exposition générale au sud, Suisse orientale, inclinaison <35%	4	3	3	-5	3
P3	Versants, exposition générale au sud, Suisse occidentale, inclinaison <35%	4	3	5	5	-
P4	Pentes raides, exposition générale au sud, inclinaison >35%	3	4	4	3	-
P5	Versants, exposition générale au nord, Suisse occidentale, inclinaison <35%	4	3	3	-5	3
P6	Versants, exposition générale au nord, Suisse occidentale, inclinaison <35%	4	3	5	5	-
P7	Pentes raides, exposition générale au nord, inclinaison >35%	3	4	4	3	-
P8	Cuvettes	3	3	3	-4	4
Vallées alpines larges						
Q1	Alluvions fines	5	2	3	6	2
Q2	Alluvions graveleuses	4	4	6	3	-
Q3	Alluvions à nappe phréatique, marais	4	2	2	-5	4
Q4	Cônes d'alluvions	5	4	5	5	-
Q5	Cônes de déjection	4	5	6	3	-
Vallées alpines étroites						

UC	Unités cartographiques	Profondeur physiologique	Squelette	Conductivité hydraulique	Capacité de rétention	Engorgement
R1	Alluvions fines	4	3	5	-4	3
R2	Alluvions graveleuses	4	4	6	3	2
R3	Alluvions à nappe phréatique, marais	3	3	3	-5	4
R4	Cônes d'alluvions	5	4	5	4	-
R5	Cônes de déjection	4	5	6	3	-
Régions sur Flysch, Bundnerschiefer, principalement dans les Alpes septentrionales						
S1	Crêtes et versants traversés de bancs rocheux	2	4	5	2	-
S2	Versants supérieurs exposés au sud (<1500 m), inclinaison <35%	3	4	3	-4	3
S3	Versants supérieurs exposés au nord (<1500 m), inclinaison <35%	3	4	3	-4	4
S4	Versants inférieurs exposés au sud (<1500 m), inclinaison <35%	3	2	2	-4	4
S5	Pentes raides exposées au sud, inclinaison >35%	3	4	4	3	-
S6	Versants inférieurs exposés au nord (<1500 m), inclinaison <35%	3	2	2	-4	4
S7	Pentes raides exposés au nord, inclinaison >35%	3	4	3	3	2
S8	Cuvettes	3	3	2	-4	4
Régions sur Bundnerschiefer dans la haute vallée du Rhône et au Tessin						
T1	Crêtes et versants traversés de bancs rocheux	2	4	5	2	-
T2	Versants inférieurs (<1000 m), inclinaison <35%	4	3	5	4	-
T3	Pentes raides, inclinaison >35%	3	4	5	3	-
T4	Versants supérieurs (>1000 m), inclinaison >35%	4	4	5	4	-
Régions alpines sur formation calcaire						
U1	Crêtes et versants traversés de bancs rocheux	2	5	5	1	-
U2	Versants supérieurs exposés au sud (>1000 m), inclinaison <35%	3	4	4	3	-
U3	Versants supérieurs exposés au nord (>1000 m), inclinaison <35%	3	4	4	3	-
U4	Versants inférieurs exposés au sud (<1000 m), inclinaison <35%	4	3	4	4	-
U5	Pentes raides exposés au sud, inclinaison >35%	2	4	5	2	-
U6	Versants inférieurs exposés au nord (<1000 m), inclinaison <35%	4	3	4	4	2
U7	Pentes raides exposés au nord, inclinaison >35%	2	4	5	2	-
U8	Cuvettes	3	3	3	-4	4
Régions alpines sur formations cristallines dures						
V1	Crêtes et versants traversés de bancs rocheux	2	5	6	1	-
V2	Versants supérieurs exposés au sud (>1000 m), inclinaison <35%	3	5	6	3	-
V3	Versants supérieurs exposés au nord (>1000 m), inclinaison <35%	3	5	6	3	-
V4	Versants inférieurs exposés au sud (<1000 m), inclinaison <35%	4	4	6	3	-

UC	Unités cartographiques	Profondeur physiologique	Squelette	Conductivité hydraulique	Capacité de rétention	Engorgement
V5	Pentes raides exposés au sud, inclinaison >35%	2	5	6	2	-
V6	Versants inférieurs exposés au nord (<1000 m), inclinaison <35%	4	4	6	3	-
V7	Pentes raides exposés au nord, inclinaison >35%	2	5	6	2	-
V8	Cuvettes	3	5	5	1	3
Régions alpines sur formations cristallines relativement altérables						
W1	Crêtes et versants traversés de bancs rocheux	2	5	6	1	-
W2	Versants supérieurs exposés au sud (>1000 m), inclinaison <35%	3	4	5	3	2
W3	Versants supérieurs exposés au nord (>1000 m), inclinaison <35%	3	4	5	3	2
W4	Versants inférieurs exposés au sud (<1000 m), inclinaison <35%	4	3	5	4	-
W5	Pentes raides exposés au sud, inclinaison >35%	2	4	6	2	-
W6	Versants inférieurs exposés au nord (<1000 m), inclinaison <35%	4	3	5	4	-
W7	Pentes raides exposés au nord, inclinaison >35%	2	4	6	2	-
W8	Cuvettes	3	5	5	-2	3
Bord des Alpes sur molasse partiellement recouverte de moraine (Tessin)						
X1	Versants et terrasses, inclinaison <25%	5	3	5	5	-
X2	Pentes raides, inclinaison >25%	4	3	5	4	-
Vallées						
Y1	Alluvions fines prédominantes	4	3	5	4	-
Y2	Alluvions graveleuses prédominantes	3	5	6	2	-
Y3	Terrasses	6	3	5	5	-
Y4	Cônes d'alluvions	4	4	5	4	-
Y5	Cônes de déjection	3	5	6	2	-
Plaines (MAGADINO, MENDRISIO)						
Z1	Alluvions fines	5	2	4	-5	3
Z2	Alluvions sableuses	4	2	6	3	2
Z3	Alluvions à nappe phréatique	3	2	4	-4	4
Z4	Graviers	5	3	5	4	-
Z5	Cônes d'alluvions	6	3	5	5	-

E1: Moyenne de ET/ETP pour des terres arables

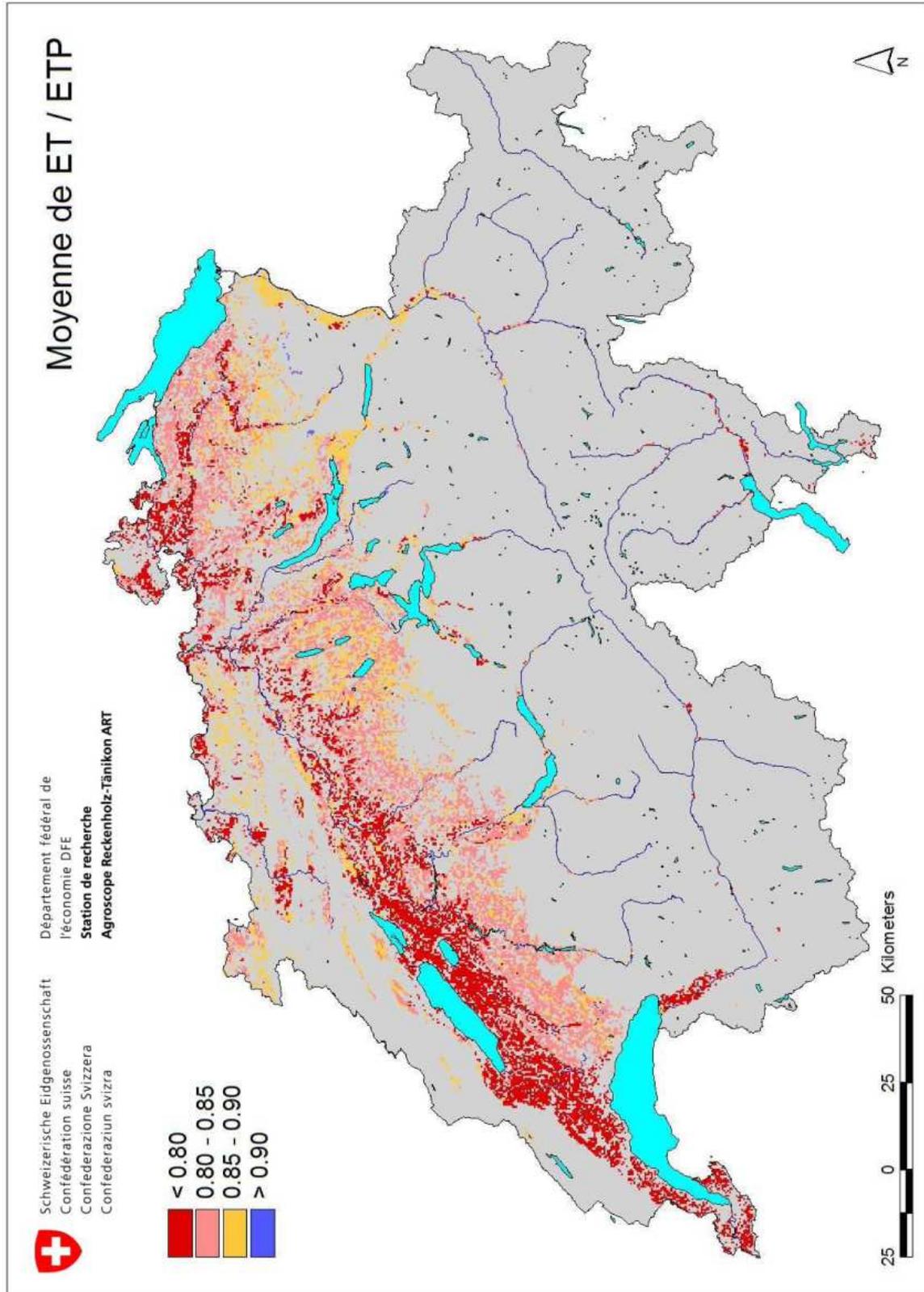


Figure 32: Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

E2: Moyenne de ET/ETP pour des prairies

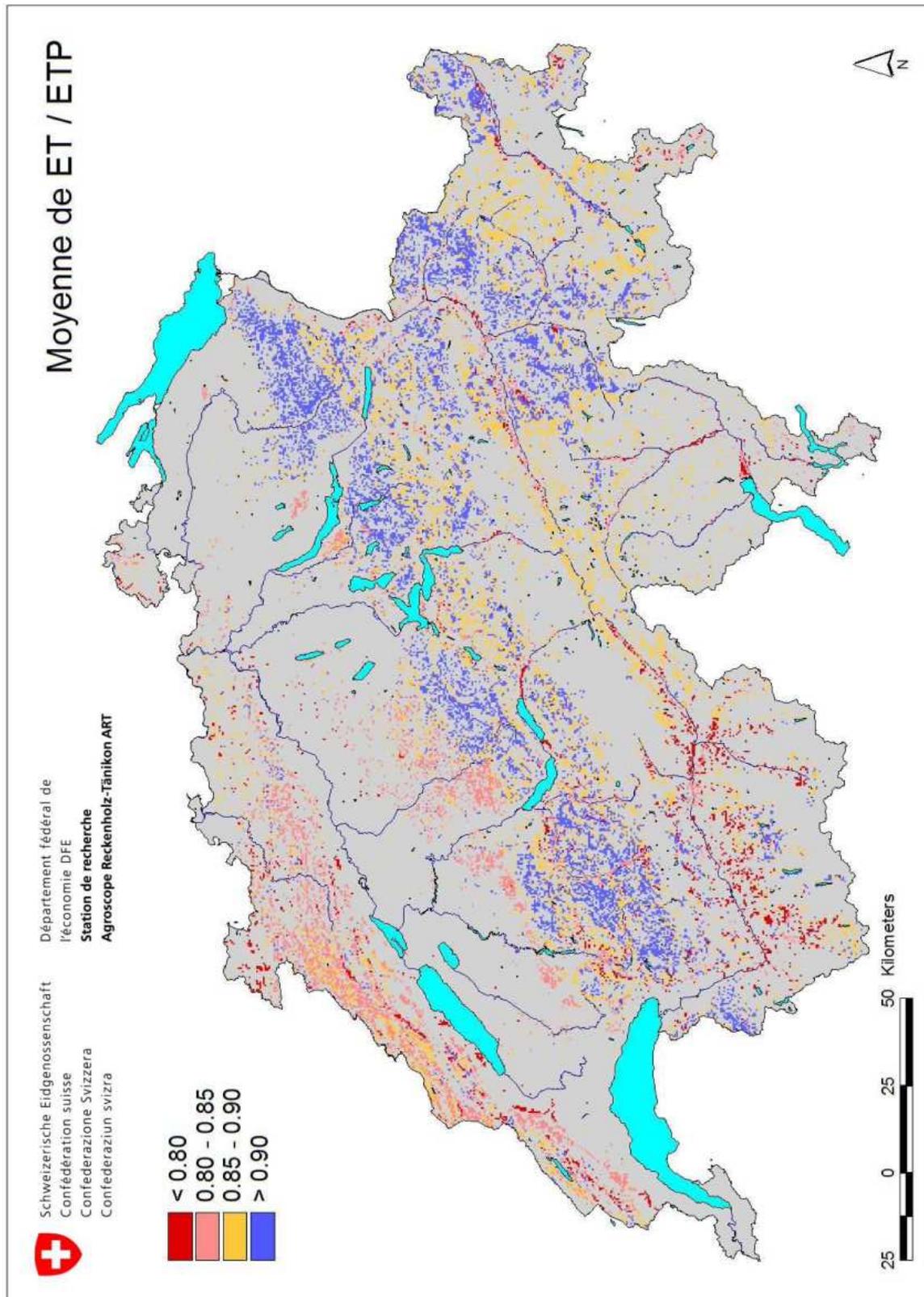


Figure 33: Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

E3: Quantile de ET/ETP pour les terres arables

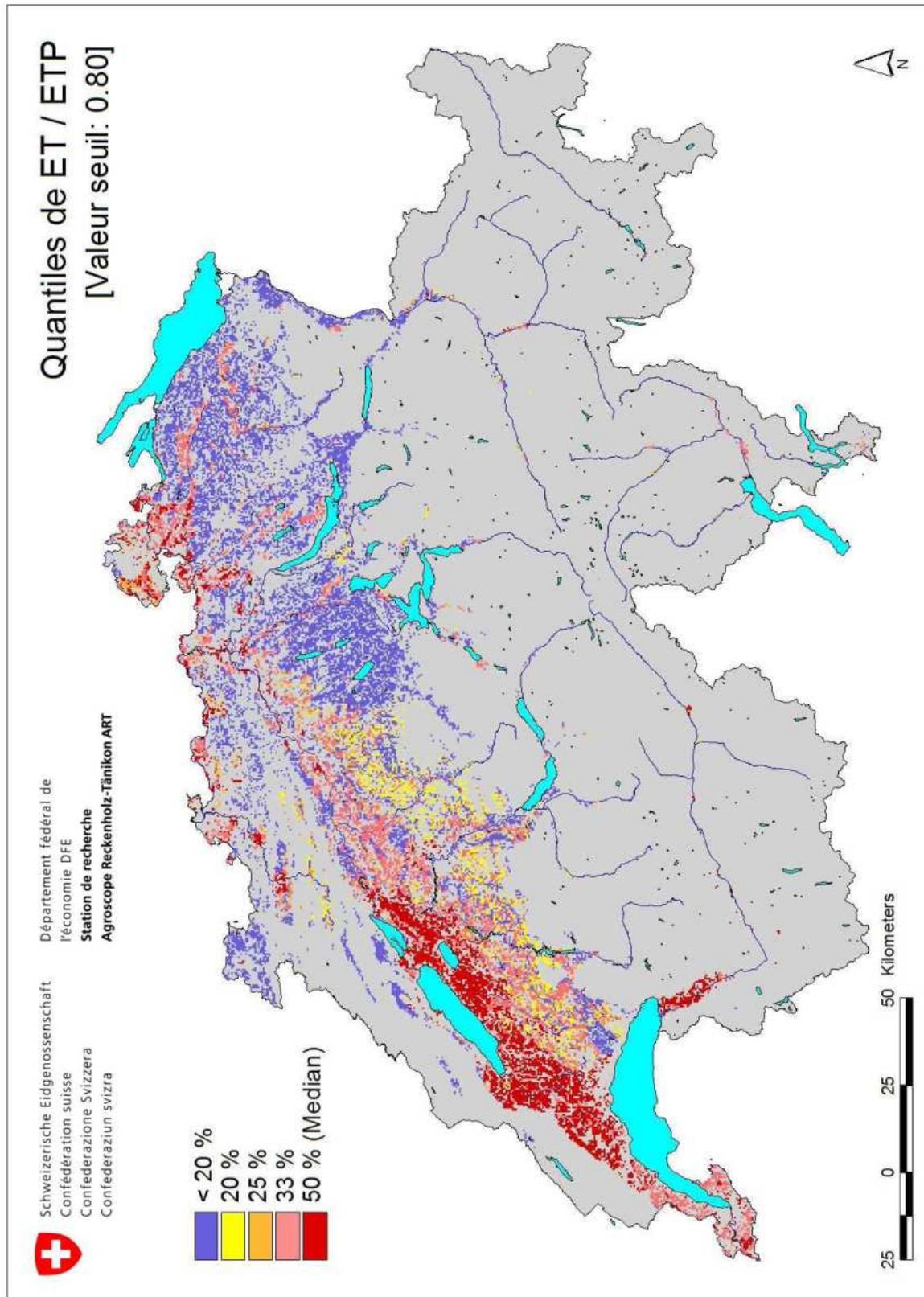


Figure 34: Quantile sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

E4: Quantile de ET/ETP pour les prairies

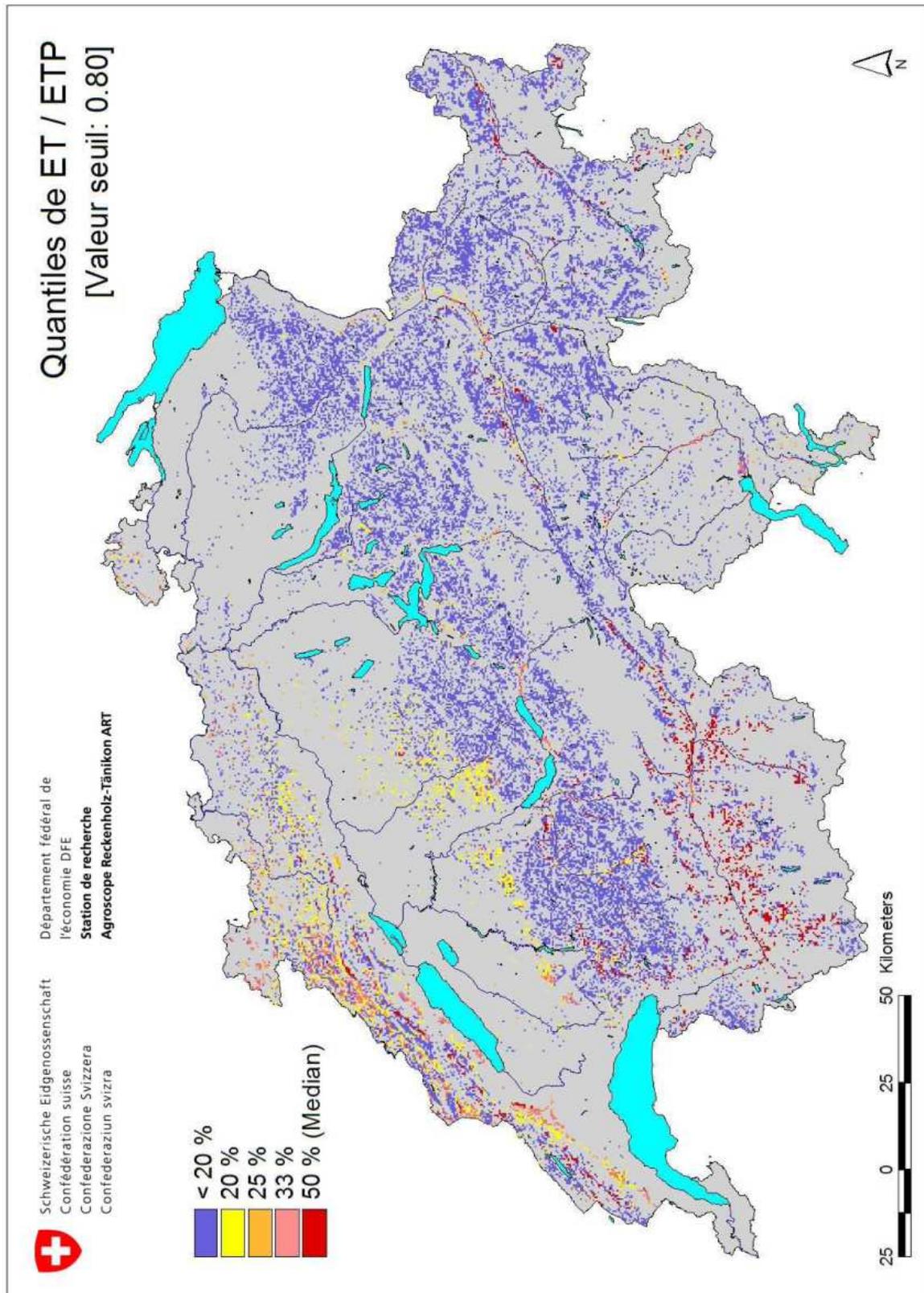


Figure 35: Quantile sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

E5: Quantile 20% de ET/ETP pour les terres arables

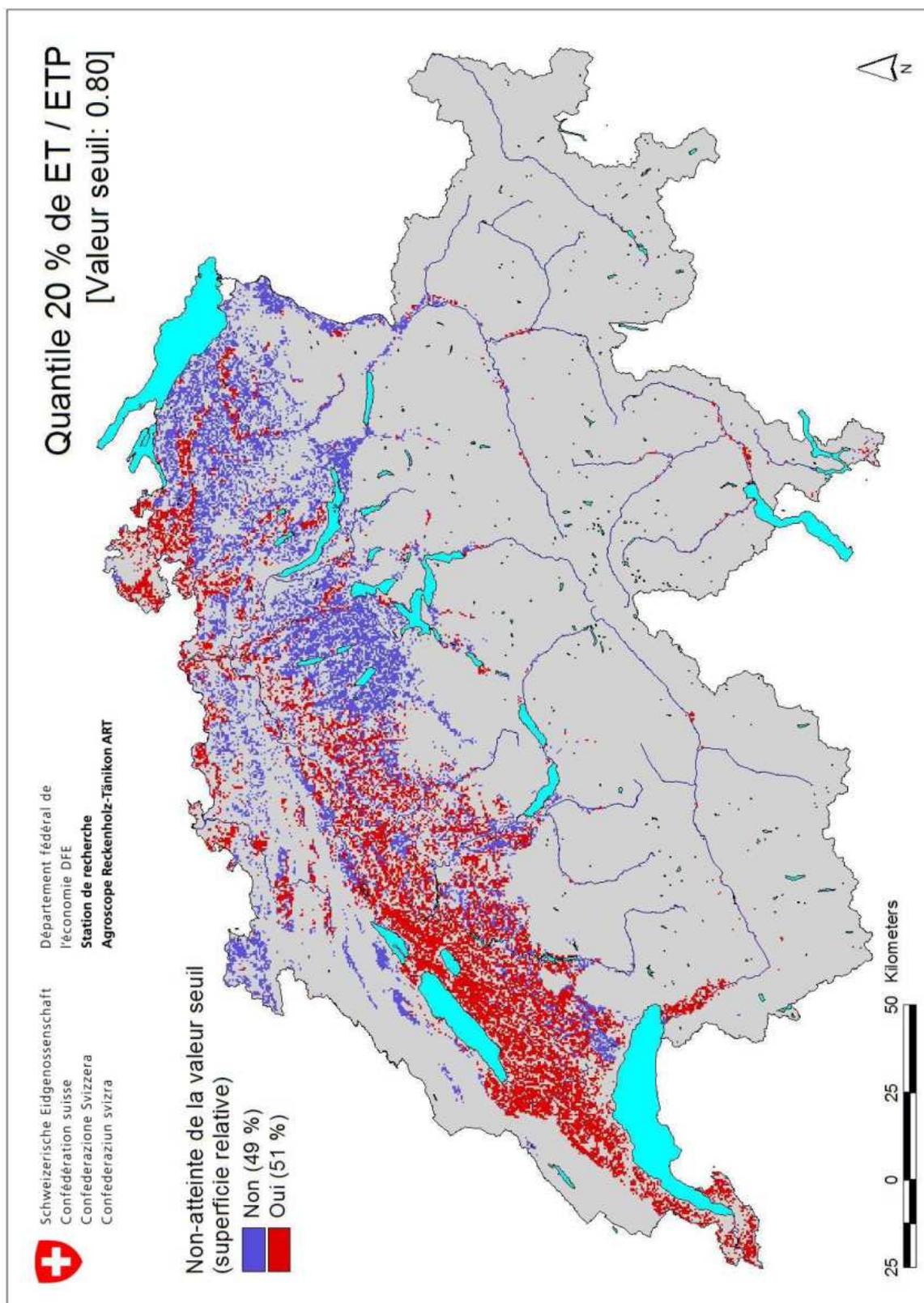


Figure 36: Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E6: Quantile 20% de ET/ETP pour les prairies

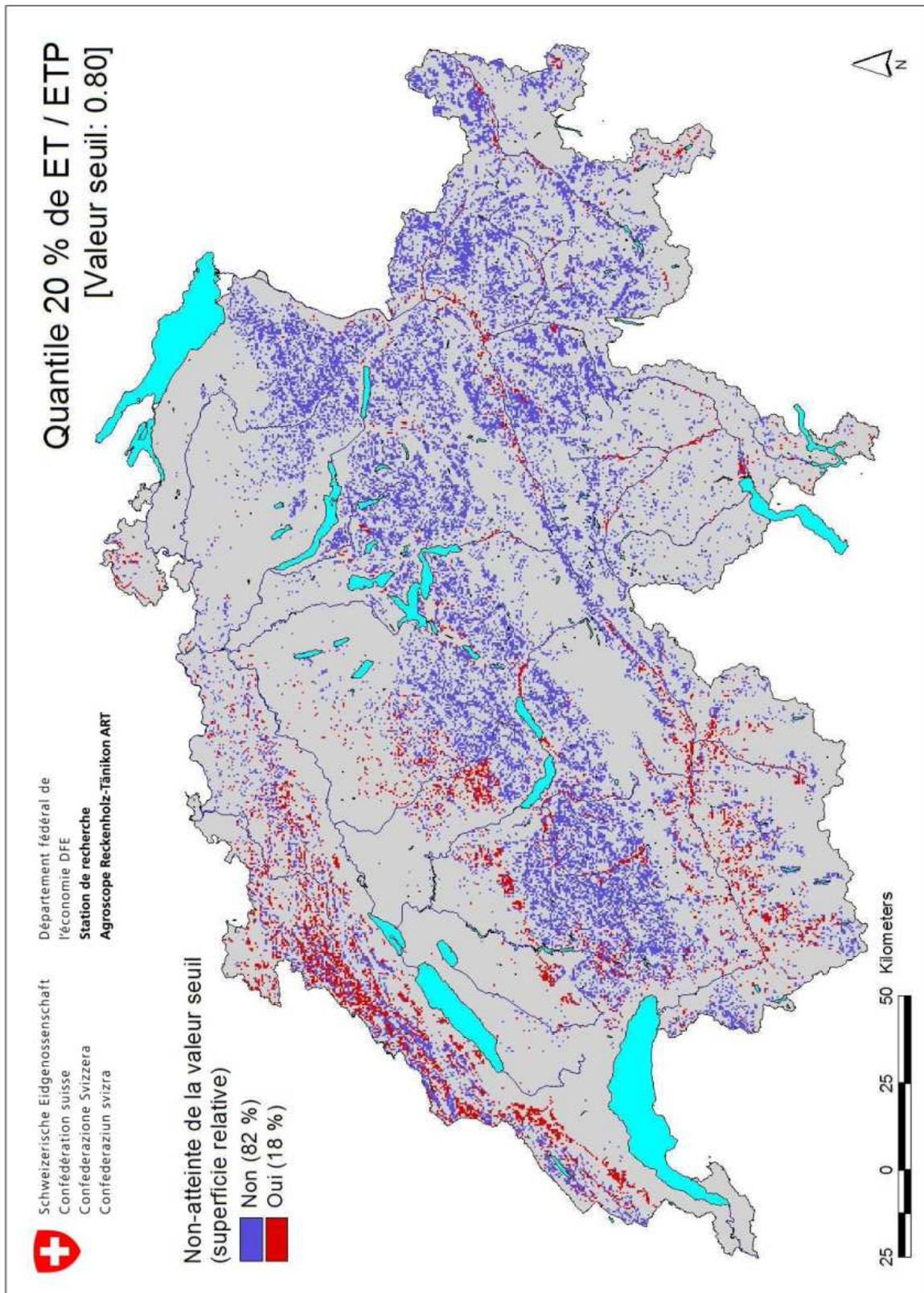


Figure 37: Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E7: Quantile 25% de ET/ETP pour les terres arables

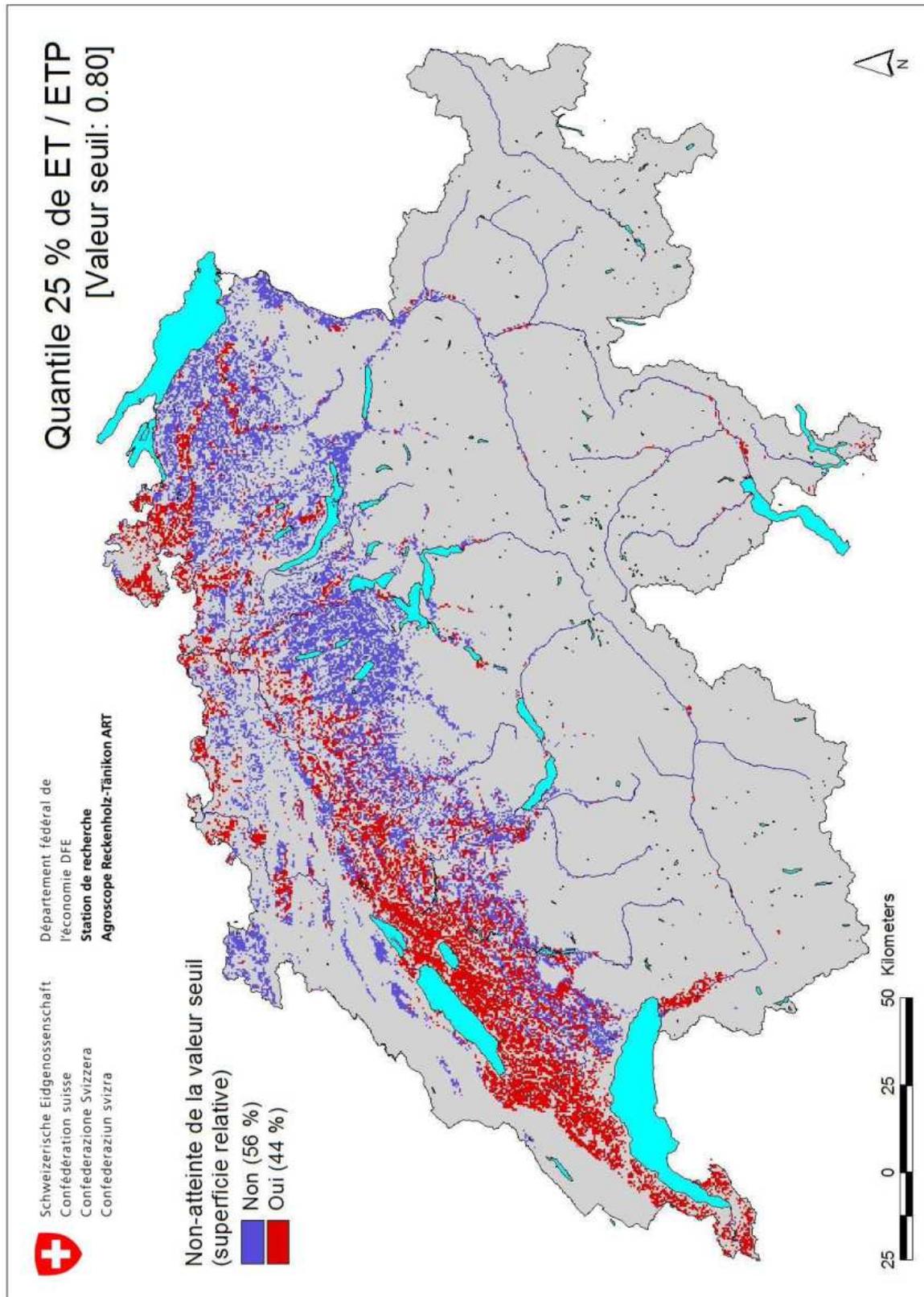


Figure 38: Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E8: Quantile 25% de ET/ETP pour les prairies

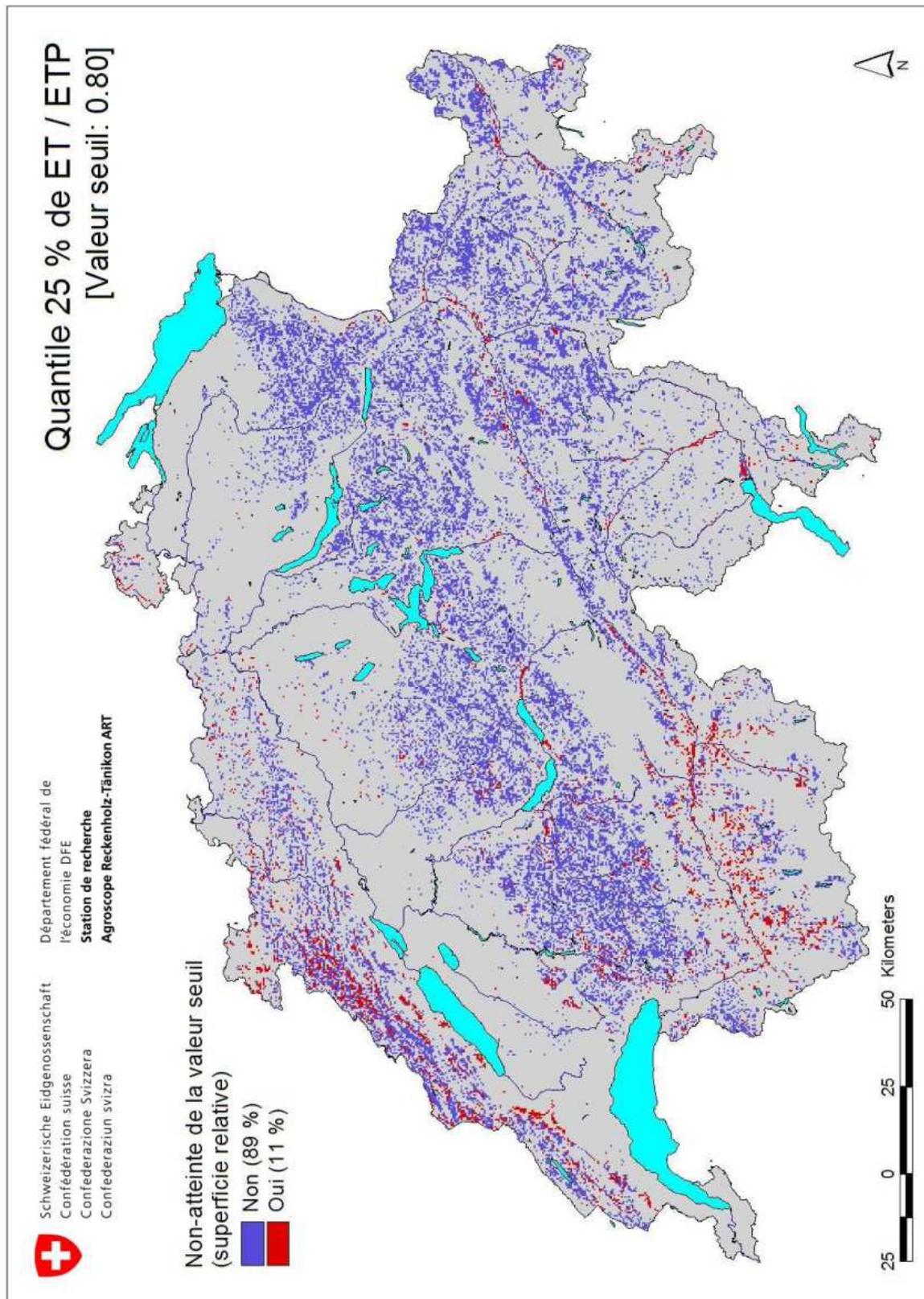


Figure 39: Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E9: Quantile 33% de ET/ETP pour les terres arables

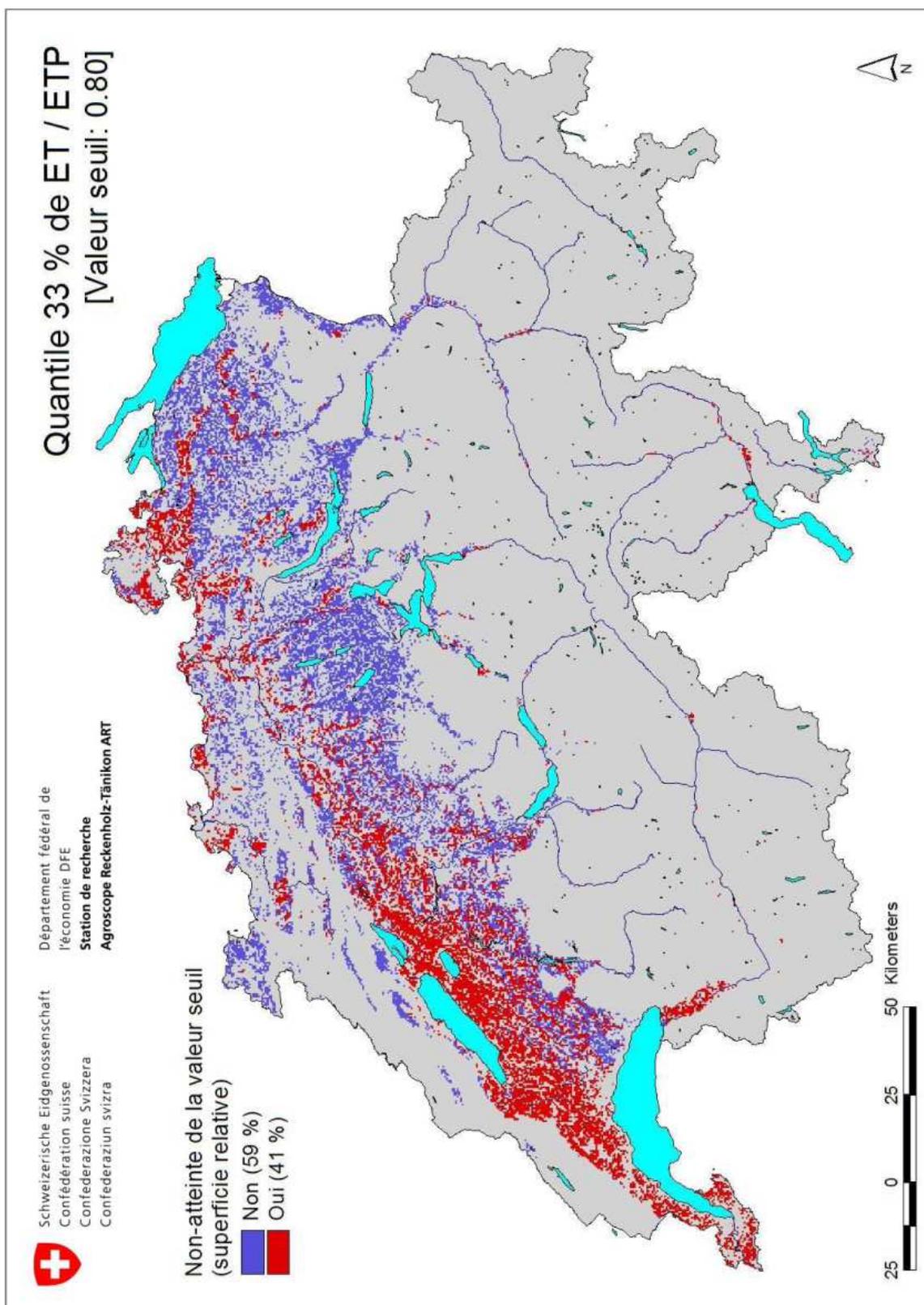


Figure 40: Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E10: Quantile 33% de ET/ETP pour les prairies

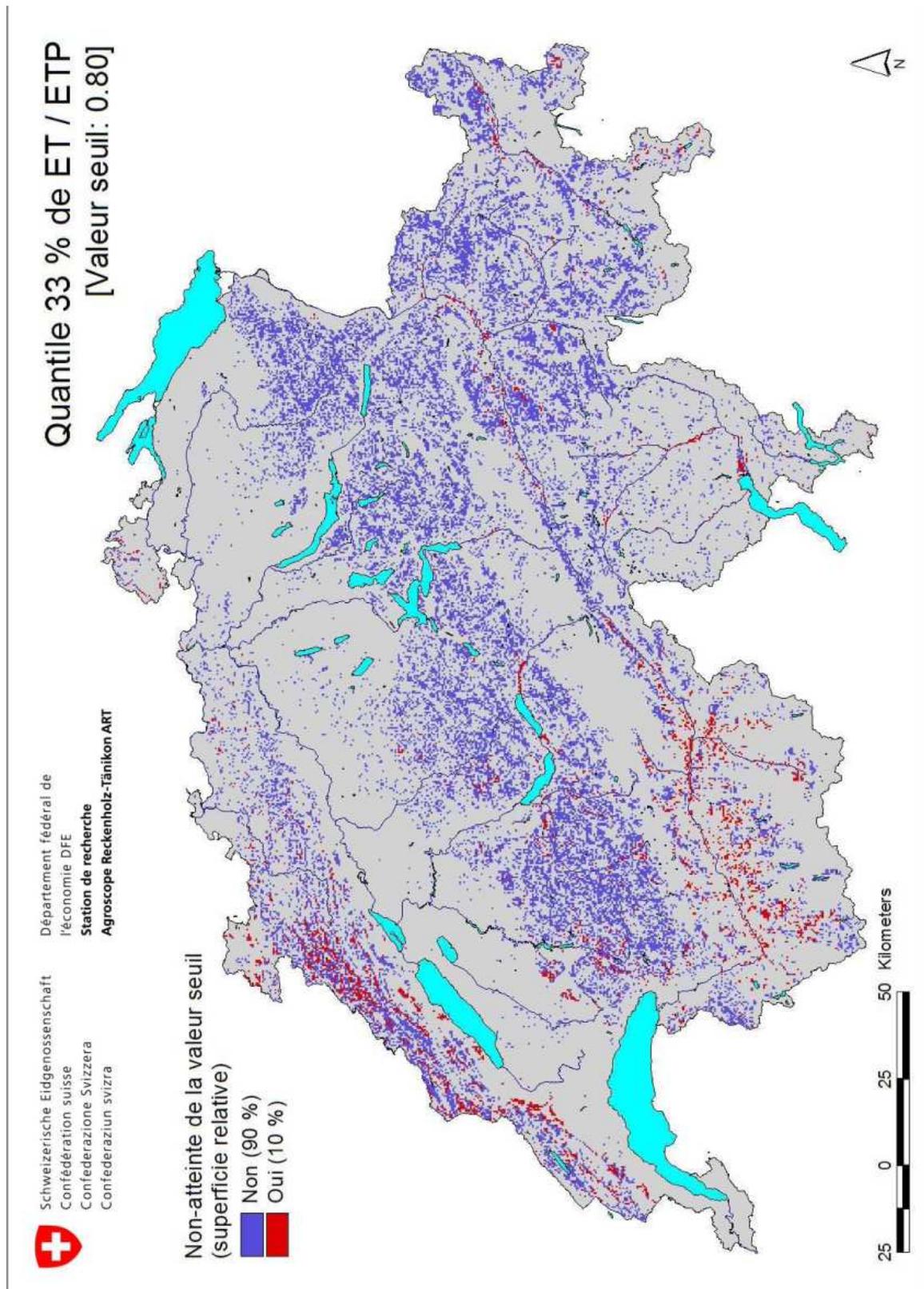


Figure 41: Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E11: Quantile 50% de ET/ETP pour les terres arables

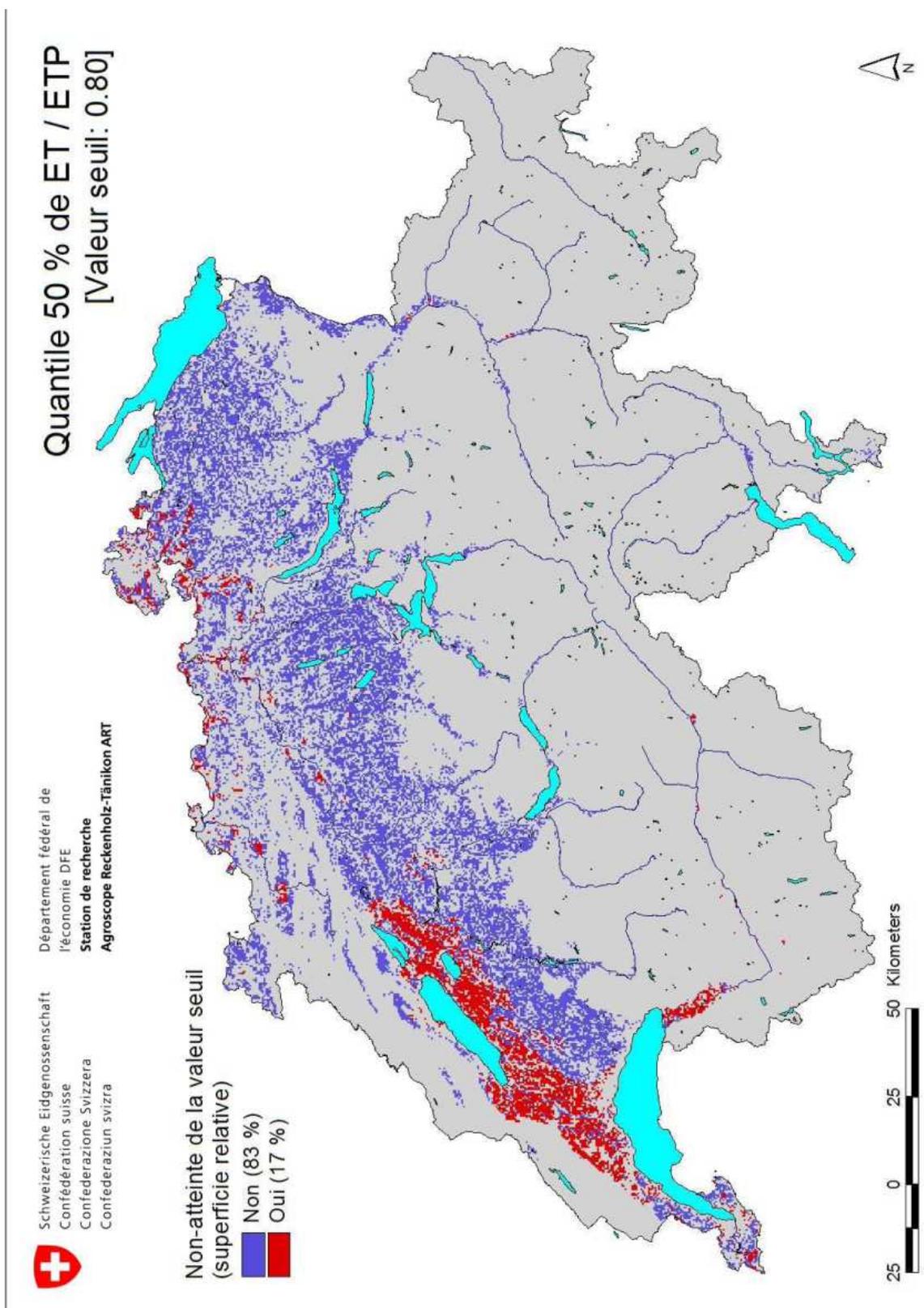


Figure 42: Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E12: Quantile 50% de ET/ETP pour les prairies

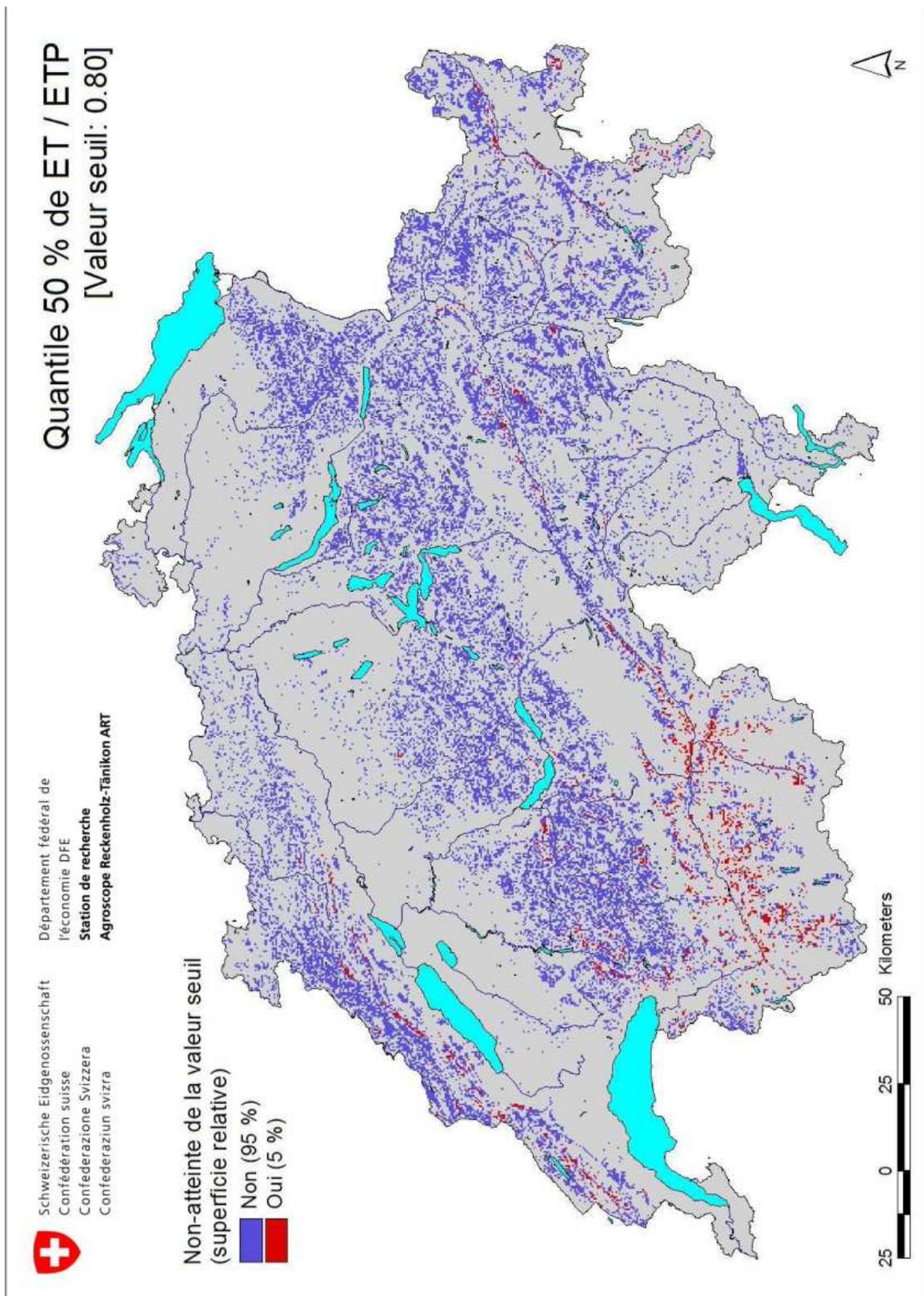


Figure 43: Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.

E13: Durée maximal des périodes de sécheresse dans les terres arables

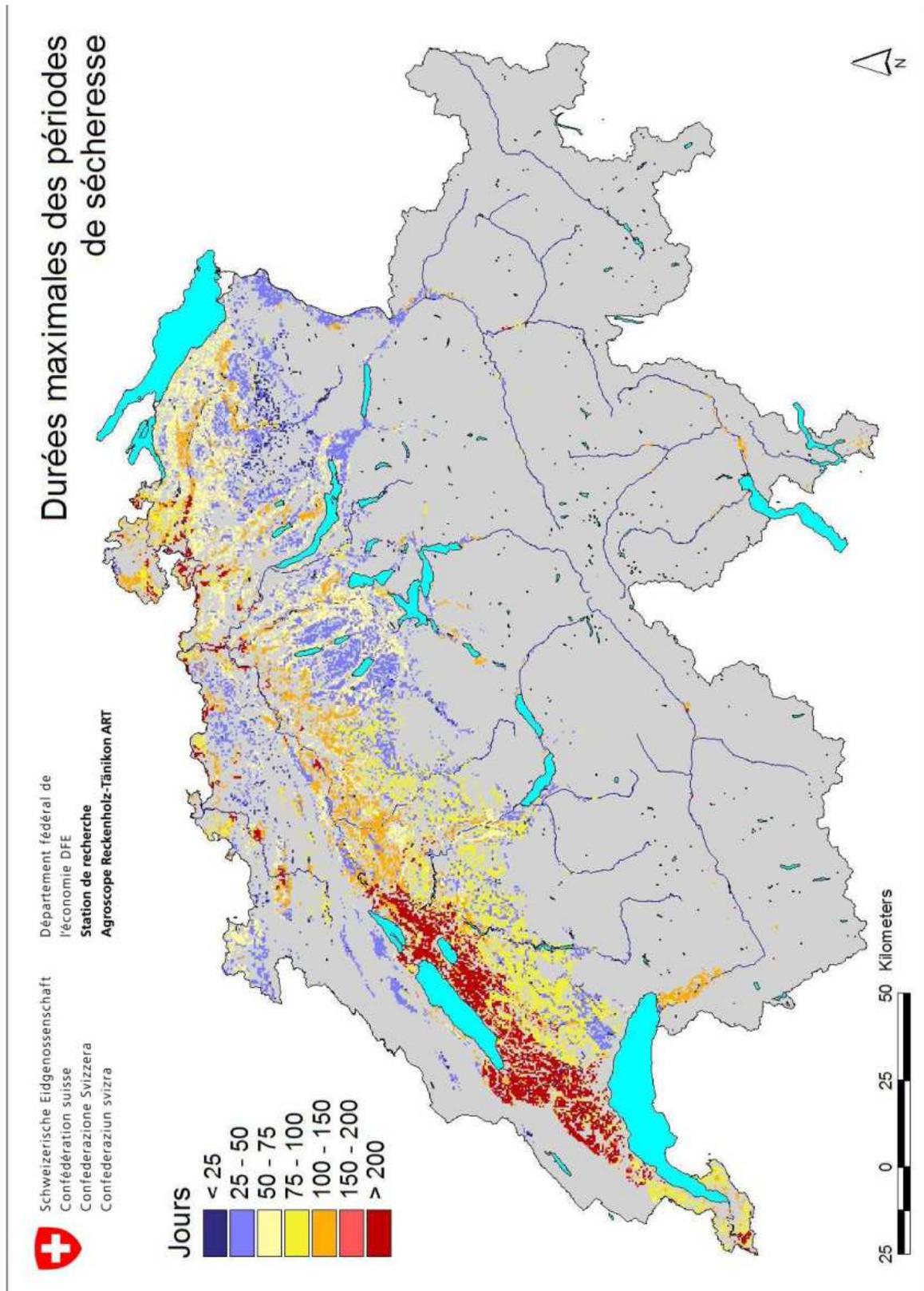


Figure 44: Durées maximales des périodes de sécheresse ($ET/ETP < 0.8$) dans les terres arables en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

E14: Durées maximales des périodes de sécheresse dans les prairies

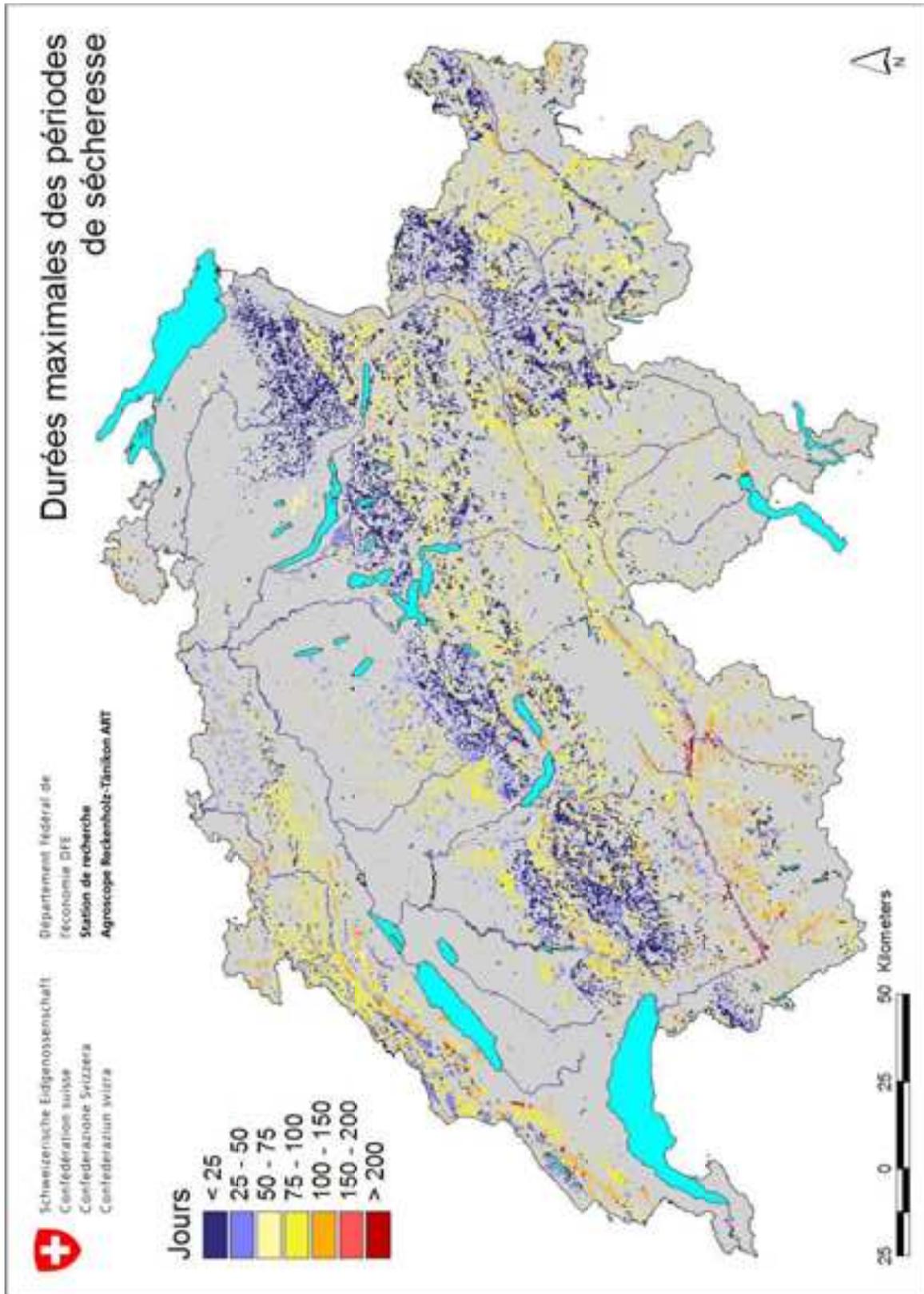


Figure 45: Durées maximales des périodes de sécheresse ($ET/ETP < 0.8$) dans les prairies en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m

F: Répertoire des tableaux

Tableau 1:	Brève caractérisation des régions tests	10
Tableau 2:	Nombre des stations disponibles pour l'application du modèle.....	15
Tableau 3:	Sous-bassins versants dérivés pour la Thur (AE_0 : superficie en surface du bassin versant; TG, sous-région; calc.: calculé; gris: sous-région; jaune: tête de bassin).....	18
Tableau 4:	Décomposition des «terres arables» selon le système d'indicateur de MONET..	21
Tableau 5:	Définition et répartition des propriétés des sols selon les BEK200 en fonction de la superficie des terres agricoles de la Suisse	24
Tableau 6:	Configuration du modèle pour la simulation des régions tests.....	26
Tableau 7:	Paramètres de calibration et domaines de valeurs.	28
Table 8:	Valeurs ET/ETP spécifiques à chaque région pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris l'arboriculture); moyennes pour les périodes de végétation 1980 - 2006.....	31
Tableau 9:	Relation entre les valeurs calculées ET/ETP et les différentes caractéristiques régionales (toutes les données proviennent de l'ensemble des surfaces agricoles des régions tests)	33
Tableau 10:	Caractéristiques sélectionnées dans les différentes classes utilisées pour l'extrapolation du paramètre ET/ETP (les données de superficie relative sont toutes extrapolées à l'ensemble des surfaces agricoles des régions tests)	33
Tableau 11:	Moyennes et quantiles (20%, 25%, 33%, 50%) du rapport ET/ETP pour l'ensemble des surfaces agricoles de la Suisse (y compris les surfaces couvertes par l'arboriculture), avec données séparées pour les terres arables et les prairies; moyennes pour les périodes de végétation 1980 – 2006; quantiles comme données de superficie relative pour ET/ETP < 0.80.....	34
Tableau 12:	Moyennes régionales spécifiques de la longueur des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.80) pour les terres arables, les prairies et l'ensemble des surfaces agricoles (y compris l'arboriculture); données en jours pour l'ensemble des périodes de végétation 1980 - 2006	39
Tableau 13:	Stations de débit utilisées pour la calibration du modèle dans les régions tests; AE_0 : superficie du bassin versant (selon BAFU [2008]).....	49
Tableau 14:	Reclassification de la statistique de la superficie de la Suisse 1992/97 avec indication des dimensions.....	51
Tableau 15:	Unité cartographique (KE) de la Carte des aptitudes des sols de la Suisse (BEK200) avec les paramètres hydrologiques des sols (définition des codes voir tableau 5).....	53

G: Répertoire des Figures

Figure 1:	Relation entre l'évapotranspiration relative (ET/ETP) et le rendement relatif des cultures agricoles ($Y_{\text{actuel}}/Y_{\text{max}}$). Les situations A_n et E_n représentent différentes conditions environnementales: d'optimales (A_n) à mauvaises E_n . Ces relations sont considérées comme étant linéaires jusqu'à ce que le rapport (ET/ETP) atteigne la valeur de 0.5 (Raes [2002]).....	8
Figure 2:	Emplacement des régions tests en Suisse.....	9
Figure 3:	Région de la Thur jusqu'à la station de jaugeage d'Andelfingen.....	11
Figure 4:	Région de l'Emme jusqu'à la station de jaugeage de Wiler.....	12
Figure 5:	Région de la Broye jusqu'à la station de jaugeage de Payerne.....	12
Figure 6:	Région du Rhône moyen avec emplacement des stations de jaugeage utilisées.....	13
Figure 7:	Région du Tessin jusqu'à la station de jaugeage de Bellinzone.....	14
Figure 8:	Région de la Dischma jusqu'à la station de jaugeage de Davos-Kriegsmatte.....	15
Figure 9:	Modèle d'altitude (DHM100) pour la région de la Thur, avec réseau fluvial.....	17
Figure 10:	Statistique de la superficie avec répartition des surfaces en fonction de l'altitude dans la région de la Thur.....	18
Figure 11:	Statistique de la superficie avec répartition des pentes (HN) en fonction de l'altitude dans la région de la Thur.....	18
Figure 12:	Sous-bassins versants dérivés pour la Thur (symbole circulaire jaune: station virtuelle de mesure de débit).....	19
Figure 13:	Répartition en pourcentage des principales utilisations en Suisse selon la Statistique de la superficie 1992/97.....	20
Figure 14:	Répartition spatiale de l'utilisation des sols reclassée dans la région de la Thur.....	21
Figure 15:	Répartition spatiale des surfaces agricoles en Suisse après reclassification avec emplacement des régions tests.....	22
Figure 16:	Répartition de la superficie correspondant aux propriétés des sols selon les BEK200 par rapport à l'ensemble de la superficie des sols agricoles suisses après reclassification (remarque: les superficies avec des sols imbibés d'eau se trouvent en rose sous « Capacité de rétention »).....	23
Figure 17:	Distribution spatiale de la perméabilité dans la région de la Thur d'après les BEK200.....	25
Figure 18:	Calibration du modèle, par comparaison des débits mesurés (bleu) avec les débits simulés (rouge).....	30
Figure 19:	Vérification du modèle, par comparaison des débits mesurés (bleu) avec ceux simulés (rouge).....	32
Figure 20:	Répartition spatiale du rapport de l'évapotranspiration potentielle sur les précipitations (ETP/N) des surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	35
Figure 21:	Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	35
Figure 22:	Quantile sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	36
Figure 23:	Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	36
Figure 24:	Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	37

Figure 25:	Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	37
Figure 26:	Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces agricoles de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	38
Figure 27:	Durées moyennes des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.8) pour les terres arables en Suisse; calculs pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	39
Figure 28:	Durée moyenne des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.8) dans les prairies en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	40
Figure 29:	Analyse de comportement pour la durée de la période de sécheresse (ET/ETP < 0.8) des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	41
Figure 30:	Analyse de comportement pour la durée de la période de sécheresse (ET/ETP < 0.8) des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	41
Figure 31:	Statistique suisse de la superficie 1992/97 — Nomenclature NOAS92: Catégories de base et agrégations (BFS [2001]).....	50
Figure 32:	Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	58
Figure 33:	Moyenne sur plusieurs années de l'évapotranspiration relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	59
Figure 34:	Quantile sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	60
Figure 35:	Quantile sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	61
Figure 36:	Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	62
Figure 37:	Quantile 20% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	63
Figure 38:	Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	64
Figure 39:	Quantile 25% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	65
Figure 40:	Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	66

Figure 41:	Quantile 33% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	67
Figure 42:	Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des terres arables de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	68
Figure 43:	Quantile 50% sur plusieurs années de l'évapotranspiration (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et l'évapotranspiration potentielle, ET/ETP) pour les surfaces des prairies de la Suisse, calcul pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	69
Figure 44:	Durée maximal des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.8) dans les terres arables en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	70
Figure 45:	Durée maximal des périodes de sécheresse (ET/ETP < 0.8) dans les prairies en Suisse; calcul pour les périodes de végétation 1980 - 2006 dans une grille de 500 m x 500 m.....	71