État et évolution des eaux souterraines en Suisse

Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

État et évolution des eaux souterraines en Suisse

Résultats de l’Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016

Publié par l’Office fédéral de l’environnement OFEV
Berne, 2019

Impressum

Éditeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Direction du projet à l'OFEV
Ronald Kozel (division Hydrologie)

Auteurs
Miriam Reinhardt (coordination), Aysel Güler, Marc Schürch, Michael Sinreich, Stephanie Zimmermann (division Hydrologie), Manuel Kunz (division Eaux)

Accompagnement à l'OFEV
Olivier Overney † (division Hydrologie), Markus Thommen (division Espèces écosystèmes, paysages), Bettina Hitzfeld, Magali Lebrun Lengacher, Christoph Reusser, Reto Tietz, Christiane Wermeille (division Sols et biotechnologie), Richard Ballaman, Andreas Buser, Petra Kunz, Josef Tremp (division Protection de l'air et produits chimiques), Sabine Augustin, Michael Reinhard (division Forêts), Christian Leu, Stephan Müller, Reto Muralt Teuscher, Michael Schärer, Corin Schwab, Fabian Soltermann, Saskia Zimmermann-Steffens (division Eaux)

Référence bibliographique
OFEV (éd.) 2019 : État et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement n° 1901 : 144 p.

Traduction
Service linguistique de l'OFEV

Mise en page
Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Photo de couverture
Captage d'une source à Altdorf UR
© Emanuel Ammon

Téléchargement au format PDF
www.bafu.admin.ch/uz-1901-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand. La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2019

Tables des matières

Abstracts **6**

Avant-propos **7**

1 L'essentiel en bref **8**

2 Introduction **12**

3 Observation nationale des eaux souterraines NAQUA **13**
3.1 Objectifs 13
3.2 Organisation 13
3.3 Modules 14
3.4 Assurance qualité 19
3.5 Information et communication 19

4 Les eaux souterraines en Suisse **20**
4.1 Ressources en eaux souterraines 20
4.2 Aquifères 20

5 Niveaux des eaux souterraines et débits des sources **23**
5.1 Bases 23
5.2 Relevé des données 24
5.3 État 25
5.4 Évolution 29
5.5 Analyse 31

6 Isotopes de l'eau **33**
6.1 Bases 33
6.2 Relevé des données 34
6.3 État 34
6.4 Évolution 36
6.5 Analyse 37

7 Température des eaux souterraines **38**
7.1 Bases 38
7.2 Relevé des données 38
7.3 État 39
7.4 Évolution 40
7.5 Analyse 42

8 Éléments majeurs **44**
8.1 Bases 44
8.2 Relevé des données 45
8.3 État 45
8.4 Évolution 47
8.5 Analyse 48

9 Éléments traces **50**
9.1 Bases 50
9.2 Relevé des données 50
9.3 État 52
9.4 Évolution 53
9.5 Analyse 54

10 Nitrates **56**
10.1 Bases 56
10.2 Relevé des données 57
10.3 État 57
10.4 Évolution 59
10.5 Analyse 60

11 Produits phytosanitaires **61**
11.1 Bases 61
11.2 Relevé des données 63
11.3 État 67
11.4 Évolution 77
11.5 Analyse 80

12 Composés organiques volatils **86**
12.1 Bases 86
12.2 Relevé des données 87
12.3 État 90
12.4 Évolution 95
12.5 Analyse 97

13 Indicateurs d'eaux usées **101**
13.1 Bases 101
13.2 Relevé des données 101
13.3 État 102
13.4 Analyse 105

14 Étude pilote « Composés perfluorés » **108**
14.1 Bases 108
14.2 Relevé des données 109
14.3 État 110
14.4 Analyse 111

15 Étude pilote « Screening » 113
15.1 Bases 113
15.2 Relevé des données 113
15.3 Résultats 114
15.4 Analyse 115

16 Étude pilote « Microorganismes » 117
16.1 Bases 117
16.2 Relevé des données 118
16.3 État 120
16.4 Analyse 124

17 Bilan : évaluation et actions requises 128
17.1 Évaluation de l'état des eaux souterraines 128
17.2 Actions requises et mesures 129
17.3 Perspectives pour le monitoring 131

Bibliographie 133

Répertoire 139
Figures 139
Tableaux 141

Annexe 1 143

Annexe 2 144

Abstracts

The NAQUA National Groundwater Monitoring is the joint federal-cantonal monitoring programme that records groundwater quantity and quality at around 600 monitoring sites across Switzerland. This NAQUA report shows that nitrate and pesticide residues in particular have a lasting adverse impact on groundwater quality. Persistent synthetic substances from industry, commerce and households are also detectable in groundwater, Switzerland's most important drinking water resource. The groundwater resources most affected are on the Swiss Plateau, which is densely populated and used intensively for agriculture. As groundwater renewal is such a slow process, anticipatory measures to protect and conserve groundwater resources are of particular importance.

Keywords:
NAQUA, groundwater, groundwater monitoring, groundwater quality, groundwater quantity

Gerée conjointement par la Confédération et les cantons, l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA suit, auprès de quelque 600 stations de mesure, l'évolution de la quantité et de la qualité des eaux souterraines en Suisse. Le présent rapport NAQUA montre que les nitrates et les résidus de produits phytosanitaires, en particulier, compromettent durablement leur qualité. Les relevés attestent cependant aussi de la présence dans les eaux souterraines – la principale ressource d'eau potable du pays – de substances artificielles persistantes provenant de l'industrie, de l'artisanat et des ménages. Cette atteinte est observée avant tout sur le Plateau, région densément peuplée et vouée à une exploitation agricole intensive. Étant donné que les eaux souterraines ne se renouvellent que lentement, les mesures préventives revêtent une importance toute particulière afin de protéger cette ressource à long terme.

Mots-clés :
NAQUA, eaux souterraines, observation des eaux souterraines, qualité des eaux souterraines, quantité des eaux souterraines

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA ist das gemeinsame Monitoringprogramm von Bund und Kantonen, das die Grundwasser-Quantität und -Qualität landesweit an rund 600 Messstellen erfasst. Der vorliegende NAQUA-Bericht zeigt, dass vor allem Nitrat und Rückstände von Pflanzenschutzmitteln die Grundwasser-Qualität nachhaltig beeinträchtigen. Auch künstliche, langlebige Substanzen aus Industrie, Gewerbe und Haushalten sind im Grundwasser, der wichtigsten Trinkwasserressource der Schweiz, nachweisbar. Betroffen sind vor allem die Grundwasservorkommen im intensiv landwirtschaftlich genutzten und dicht besiedelten Mittelland. Da sich Grundwasser nur langsam erneuert, kommt vorausschauenden Massnahmen zu Schutz und Erhalt der Grundwasserressourcen besondere Bedeutung zu.

Stichwörter:
NAQUA, Grundwasser, Grundwasserbeobachtung, Grundwasser-Qualität, Grundwasser-Quantität

L'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA è il programma di monitoraggio congiunto di Confederazione e Cantoni che rileva la quantità e la qualità delle acque sotterranee in circa 600 stazioni di misurazione sull'intero territorio nazionale. Il presente rapporto NAQUA mostra che la qualità delle acque sotterranee è compromessa in modo duraturo soprattutto dal nitrato e da residui di prodotti fitosanitari. Nelle acque sotterranee, la più importante risorsa di acqua potabile svizzera, sono presenti anche sostanze artificiali persistenti provenienti dall'industria, dall'artigianato e dalle economie domestiche. Ad essere interessata è soprattutto la falda freatica dell'Altipiano, una regione coltivata in modo intensivo e densamente popolata. Dato il lento rinnovo delle acque sotterranee, i provvedimenti a titolo preventivo finalizzati alla protezione e alla conservazione delle risorse di acque sotterranee assumono particolare importanza.

Parole chiave:
NAQUA, acque sotterranee, osservazione delle acque sotterranee, quantità delle acque sotterranee, qualità delle acque sotterranee

Avant-propos

Les eaux souterraines constituent notre principale ressource d'eau potable. Dans un pays riche en eau comme la Suisse, tout laisse à penser que cette ressource naturelle, pure et cristalline, soit disponible à tout moment. Or la réalité montre que l'or bleu, aussi indispensable soit-il, peut venir à manquer ou ne plus remplir les exigences de qualité. Les analyses de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA indiquent que les eaux souterraines subissent une certaine pression également dans notre pays. L'urbanisation restreint le volume des ressources accessibles, et les nitrates ainsi que les résidus de substances de synthèse persistantes, par exemple de produits phytosanitaires, d'hydrocarbures halogénés ou de substances présentes dans les eaux usées, mettent en péril la qualité des eaux souterraines. En outre, les périodes de sécheresse influent sur le volume d'eau disponible, parfois au point qu'il en résulte une pénurie.

Les eaux souterraines ne se renouvellent que lentement, si bien que les analyses y décèlent aujourd'hui encore, du fait de leur faible biodégradabilité, des substances interdites depuis de nombreuses années, à l'instar de l'atrazine, un herbicide prohibé depuis 2007. Il importe donc d'identifier très tôt les évolutions problématiques et de prendre des mesures préventives pour protéger les eaux souterraines des substances étrangères et nuisibles provenant de l'agriculture, de l'artisanat, de l'industrie ou encore des zones résidentielles. Il faut également observer avec attention l'impact des changements climatiques sur la quantité et la température des eaux souterraines afin de pouvoir réagir en temps opportun.

Gérée conjointement par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et les services cantonaux compétents, NAQUA livre depuis 2002 des données fiables sur l'état et l'évolution des eaux souterraines. Les données de référence et les analyses permettent de tirer des conclusions fondées et pertinentes sur la quantité et la qualité des eaux souterraines et servent ainsi de base à une gestion durable de celles-ci.

La préservation des eaux souterraines incombe à tout un chacun. Le présent rapport et les informations actuelles sur notre site Internet constituent une source fiable pour vous renseigner sur la quantité et la qualité des eaux souterraines en Suisse, afin que vous puissiez prendre des décisions en toute connaissance de cause.

Je tiens à remercier les nombreux partenaires impliqués, internes et externes à l'OFEV, de leur grande contribution à NAQUA.

Je vous souhaite une agréable lecture.

Karine Siegwart
Sous-directrice
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

1 L'essentiel en bref

En Suisse, les eaux souterraines sont de loin la principale ressource d'eau potable. En effet, 80 % de l'eau potable, soit environ 1,3 milliard de m^3, proviennent des eaux souterraines, dont 40 % peuvent être utilisées directement, sans traitement préalable. Les eaux souterraines alimentent en outre des zones humides précieuses et, notamment en périodes de sécheresse, les cours d'eau. Elles constituent par conséquent un bien précieux qu'il s'agit de préserver.

Pression accrue sur les eaux souterraines

En Suisse, disposer d'eaux souterraines de qualité et en quantité suffisante semble être une évidence. Pourtant, cette ressource est sous pression, surtout en raison des substances étrangères provenant de l'agriculture, mais aussi de celles des sites industriels et artisanaux pollués, des surfaces de transport et des eaux usées. Du fait de l'urbanisation croissante de la Suisse, il est souvent impossible de délimiter les surfaces nécessaires à la protection des captages d'eaux souterraines. De plus, les changements climatiques commencent à se répercuter sur les eaux souterraines.

Protection préventive

Les précipitations et les eaux infiltrées provenant des rivières permettent aux eaux souterraines de se renouveler constamment. Mais ce processus prend du temps. En d'autres termes, les eaux souterraines séjournent longtemps dans le sous-sol et les substances de synthèse ne s'y décomposent pratiquement pas, si bien que les substances problématiques ne sont guère éliminées. C'est pourquoi l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) dispose que les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. Pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être, elle fixe aussi des valeurs limites, appelées exigences chiffrées, pour des substances ou des groupes de substance spécifiques. De plus, l'état quantitatif des eaux souterraines ne doit pas se détériorer durablement.

Chiffres et faits de NAQUA

L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA relève l'état et l'évolution des eaux souterraines et aide à évaluer l'efficacité des mesures engagées. En étroite collaboration avec les services cantonaux spécialisés, NAQUA recense, à plus de 600 stations de mesure, la qualité et la quantité des eaux souterraines et présente les changements durables. Des études pilotes permettent en outre d'identifier des polluants spécifiques et de déterminer s'il est nécessaire de les inclure dans le monitoring à long terme. Grâce à NAQUA, les évolutions problématiques sont ainsi mises en évidence à un stade précoce, ce qui permet de prendre des mesures efficaces pour y faire face.

Rapport 2019

Le présent rapport de l'Observation nationale des eaux souterraines sur l'état et l'évolution des eaux souterraines fait suite aux deux rapports précédents et porte sur les années à partir de 2007. Il fournit de nombreux chiffres, faits et analyses à l'échelle nationale. Si la quantité des eaux souterraines est déterminée à partir de leurs niveaux et des débits des sources, leur qualité est évaluée par leur température et les substances naturelles et artificielles qu'elles contiennent. Il s'agit principalement de nitrates et de résidus de produits phytosanitaires, d'hydrocarbures halogénés et d'indicateurs d'eaux usées.

Origines diverses

Plus d'un tiers de l'eau potable suisse provient d'aquifères en roches meubles du Plateau et des grandes vallées alpines. Les sols jouant le rôle de filtre naturel, ces aquifères sont bien protégés contre les pollutions. Cependant, l'exploitation agricole intensive et la forte densité démographique font que les eaux souterraines du Plateau sont largement contaminées par des polluants et des substances étrangères, comme les nitrates ou les résidus de produits phytosanitaires. De plus, dans ces régions, les substances peuvent également parvenir dans les eaux souterraines par l'infiltration des eaux de rivière.

Un autre tiers de l'eau potable provient d'aquifères fissurés, qui se trouvent principalement dans les Alpes et sur le Plateau (roche molassique). Du fait du réseau de fractures et de fissures, l'eau circule ici plus rapidement que dans la roche meuble. De plus, la couche protectrice est souvent insuffisante. Toutefois, l'utilisation des surfaces étant la plupart du temps extensive, les substances étrangères y sont plus rares. Les valeurs localement éle-

vées de l'arsenic, du chrome et de l'uranium dans les eaux souterraines proviennent surtout de la roche en contact avec les eaux souterraines.

À peine un cinquième de l'eau potable est issu d'aquifères karstiques. Fréquents dans le Jura et les Alpes, ceux-ci sont particulièrement vulnérables à l'apport de substances étrangères et de microorganismes. Les eaux souterraines s'écoulent très rapidement dans le sous-sol, et il existe souvent un lien direct avec la surface. Cependant, les régions correspondantes connaissent une agriculture moins intensive et sont assez faiblement peuplées. Les aquifères karstiques contiennent donc généralement peu de substances de synthèse persistantes. Néanmoins, la qualité des eaux souterraines peut fortement fluctuer à court terme, du fait notamment des conditions météorologiques.

Quantité d'eaux souterraines en principe suffisantes

En théorie, il serait possible de prélever chaque année 18 milliards de m^3 d'eau souterraine pour l'approvisionnement en eau (soit dix fois plus que les besoins). Une telle exploitation n'entraînerait aucune baisse permanente des niveaux des eaux souterraines et ne porterait pas atteinte à l'environnement. En réalité cependant, en de nombreux endroits, des conflits avec d'autres utilisations, par exemple des activités agricoles, artisanales ou industrielles ou encore le développement urbain, ne permettent pas, tant s'en faut, d'exploiter un tel potentiel.

Les variations saisonnières ne représentent en général qu'une part très faible du volume total des eaux souterraines suisses. Dans les aquifères en roches meubles productifs, les fluctuations naturelles des niveaux sont relativement faibles. De fortes variations des débits des sources, en particulier dans les aquifères karstiques, peuvent cependant témoigner d'un fort changement du taux de remplissage de tels aquifères. Du point de vue quantitatif, il est possible d'affirmer que l'état des eaux souterraines reste stable, du moins dans un bilan pluriannuel, grâce au renouvellement régulier et complet des aquifères.

Trop de nitrates

À l'état naturel, les eaux souterraines contiennent très peu de nitrates, puisque la roche et les sols non exploités sont pauvres en azote aisément mobilisable. C'est le recours à de grandes quantités d'engrais azotés en agriculture qui conduit à l'accumulation d'azote dans le sol. Les nitrates se lient très peu aux particules du sol, sont très solubles et donc particulièrement mobiles. Les nitrates en excédent, qui ne sont pas assimilés par des plantes, peuvent être rapidement lessivés et sont susceptibles de percoler vers les eaux souterraines avec l'eau d'infiltration. En particulier pendant l'hiver, lorsque les précipitations sont abondantes et que de nombreuses terres sont laissées en jachère, l'azote accumulé dans le sol est lessivé sous forme de nitrates. Une fois parvenus dans les eaux souterraines, les nitrates ne se décomposent plus guère.

Pendant la période sous revue, la valeur de 25 mg/l de nitrates fixée par l'OEaux a été dépassée chaque année auprès de 15 à 20 % des stations de mesure. Cette substance est ainsi de loin la cause la plus fréquente de dépassement des valeurs limites. En 2014, les concentrations surpassaient même l'exigence chiffrée à 40 % des stations des régions prédominées par les grandes cultures.

Pour prévenir un apport excessif de nitrates dans les eaux souterraines, il faudrait optimiser durablement l'exploitation agricole, notamment dans les grandes cultures et la culture maraîchère, et l'ajuster à la capacité de chaque site. Seules une utilisation des engrais d'origine animale et minérale adaptée aux besoins et aux sites et une réduction globale des excédents d'azote dans l'agriculture permettront d'améliorer durablement la situation. Les mesures élaborées dans le cadre des différents projets d'assainissement devraient être appliquées de façon permanente dans toutes les régions concernées et être mises en œuvre dans les aires d'alimentation des captages d'eau à l'aide des instruments de la politique agricole.

Résidus de produits phytosanitaires très répandus

Quelque 300 substances organiques de synthèse sont actuellement approuvées en Suisse en tant que produits phytosanitaires. Elles sont principalement utilisées par l'agriculture, mais aussi dans l'horticulture et les jardins privés. Environ 2000 t de produits phytosanitaires sont vendues chaque année.

Le nombre de stations de mesure auxquelles des substances actives de produits phytosanitaires ou leurs produits de dégradation, les métabolites, ont été décelés dans les eaux souterraines dépasse nettement les 50 %, un chiffre pratiquement inchangé depuis 2011. En 2014, les substances actives dépassaient la limite de 0,1 µg/l fixée par l'OEaux à environ 2 % des stations de mesure. La plupart des dépassements de ces dernières années ont été causés par les herbicides bentazone, atrazine et métolachlore.

De plus, des métabolites pour lesquels l'OEaux ne fixe aucune limite spécifique ont été décelés en 2014 à 20 % des stations de mesure à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l. Dans les régions soumises à une exploitation agricole intensive, des concentrations de métabolites nettement plus élevées ont même été relevées à 65 % des stations. Ces métabolites sont souvent plus mobiles et plus persistants que leur substance mère. Jusqu'à fin 2014, les métabolites décelés le plus fréquemment et aux plus hautes concentrations étaient ceux du chloridazone, un herbicide destiné aux betteraves. Ils sont suivis des métabolites du métolachlore, qui est notamment utilisé dans la culture du maïs et de la betterave, mais aussi pour d'autres cultures spéciales.

Tandis que la charge totale en résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines stagne ces dernières années, des différences ont été constatées au sein de ces substances : la pollution des eaux souterraines par des résidus d'atrazine est, par exemple, en baisse depuis la restriction progressive et l'interdiction en 2007 de cette substance active. À l'inverse, le nombre de stations auxquelles des métabolites de métolachlore ont été détectés a doublé ces dernières années, parallèlement aux quantités de cette substance active utilisées.

L'exploitation agricole intensive est la principale source de pollution des eaux souterraines par des résidus de produits phytosanitaires, l'agriculture étant le seul secteur à répandre ces produits à grande échelle. Les produits phytosanitaires sont certes aussi utilisés dans les zones urbanisées et les jardins privés, mais en moins grandes quantités. Leur application sur des surfaces imperméabilisées n'est plus autorisée, car les substances y sont rapidement lessivées et peuvent directement pénétrer dans les canalisations et les eaux. Sur les routes et les places publiques, l'application d'herbicides est interdite depuis 1986. Cette interdiction a été étendue aux voies et aux places privées en 1999. De plus, le plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires, adopté en septembre 2017 par le Conseil fédéral, a pour objectif de réduire d'un quart, à moyen terme, les émissions de produits phytosanitaires, tout en divisant par deux les risques liés à ces produits.

Hydrocarbures halogénés provenant de sites contaminés
Contrairement à ce que leur nom laisse supposer, les hydrocarbures halogénés volatils (HHV) peuvent rester très longtemps dans les eaux souterraines. Ils sont utilisés dans l'industrie et l'artisanat, notamment comme détergents ou solvants ainsi que pour la fabrication de matières plastiques. Ils sont arrivés dans les eaux souterraines surtout pendant la seconde moitié du XX^{e} siècle, suite à des utilisations incorrectes et à des accidents. Ces sites contaminés polluent, aujourd'hui encore, les eaux souterraines.

En 2014, des HHV ont été détectés à environ 25 % des stations de mesure. À 4 % des sites, ils dépassaient l'exigence chiffrée définie dans l'OEaux, détériorant ainsi de manière significative la qualité des eaux souterraines. Le nombre de stations de mesure auxquelles des concentrations accrues de HHV ont été détectées a légèrement reculé ces dernières années.

Si l'assainissement des sites contaminés se révèle souvent complexe et coûteux, il revêt néanmoins une importance fondamentale dans la réduction de la pollution par les HHV des eaux souterraines dans les zones urbanisées. Il est impératif de poursuivre ces efforts.

Produits chimiques issus des eaux usées
Chaque jour, les ménages utilisent un grand nombre de lessives et de détergents, de produits cosmétiques, de crèmes, de gels douche et de médicaments, dont les composants rejoignent les eaux usées par le biais des éviers et des toilettes. Ces substances peuvent finir dans les eaux souterraines, soit par des fuites dans les canalisations, soit parce que les stations d'épuration des eaux usées (STEP) traditionnelles ne permettent pas, jusqu'à présent, d'éliminer certaines substances, qui sont donc

rejetées dans les cours d'eau et qui s'infiltrent ainsi dans les eaux souterraines.

En 2014, des substances qualifiées d'indicateurs d'eaux usées ont été détectées dans les eaux souterraines à 37 % des stations de mesure NAQUA. Même si l'OEaux ne prévoit pas, à ce jour, de valeurs limites spécifiques pour ces substances, leur présence dans les eaux souterraines n'est pas souhaitée. Ont notamment été décelés le sulfaméthoxazole, un antibiotique, ainsi que le benzotriazole, un agent anticorrosif, qui est par exemple contenu dans les liquides vaisselle pour protéger l'argenterie. Si les concentrations des médicaments sont presque toujours restées faibles, les concentrations de benzotriazole étaient supérieures à 0,1 µg/l à environ 1 % des stations de mesure.

La pollution des eaux souterraines par des substances issues des eaux usées n'est donc pas négligeable. Elle devrait toutefois reculer, car de nombreuses STEP seront dotées d'une étape de traitement supplémentaire au cours de ces prochaines années. Il sera ainsi possible, d'ici à 20 ans au plus tard, d'éliminer une grande partie des micropolluants dans environ 70 % des eaux usées communales.

Renforcer la protection des eaux souterraines

Ce sont les nitrates qui polluent le plus les eaux souterraines. En outre, plus de la moitié des stations de mesure font état de résidus de substances de synthèse, parfois persistantes. Il est donc impératif, à titre préventif, de poursuivre et de développer les mesures de réduction des polluants qui ont fait leurs preuves. Pour assurer une protection efficace des ressources en eaux souterraines, l'exploitation agricole doit être adaptée aux spécificités locales de sorte à ne plus polluer les eaux du sous-sol. De plus, il faut délimiter des zones de protection des eaux souterraines bien dimensionnées et juridiquement contraignantes, ce qui n'a pas encore été fait pour environ 40 % des captages d'eau potable en Suisse. D'importants conflits d'utilisation existent aussi dans de nombreuses zones de protection correctement délimitées, ce qui entraîne des risques pour l'utilisation de l'eau potable.

2 Introduction

Matière première
Fournissant pas moins de 80 % de l'eau potable consommée en Suisse, les eaux souterraines sont une ressource indigène de première importance. Leur qualité est le plus souvent bonne, de sorte que 40 % environ peuvent alimenter directement le réseau d'eau potable sans traitement préalable (Freiburghaus 2012). Les eaux souterraines exercent également une influence considérable sur de nombreux biotopes de grande valeur.

Pression anthropique accrue
L'utilisation des surfaces s'intensifie en Suisse. La densification des constructions et l'apport de substances étrangères provenant de l'agriculture, de l'industrie, de l'artisanat, des ménages ainsi que des transports augmentent la pression exercée sur les eaux souterraines. Des affectations relevant du passé, dont les traces perdurent dans les sites contaminés, représentent également un risque. Une fois que les polluants sont parvenus dans les eaux souterraines, ils ne se décomposent plus guère. Étant donné que l'eau demeure souvent très longtemps dans le sous-sol, les mesures préventives revêtent une importance toute particulière afin de protéger les eaux souterraines à long terme.

Bases de décision
Préserver les ressources en eaux souterraines, promouvoir leur gestion durable et en assurer une protection intégrale figurent parmi les principales tâches de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). La gestion des eaux souterraines, l'application de mesures destinées à les protéger et l'élimination des atteintes existantes relèvent quant à elles des cantons. Afin d'obtenir la mise en place de mesures efficaces, il est important de recueillir les informations les plus pertinentes, de comprendre les corrélations entre l'état des eaux et les facteurs qui le déterminent et d'identifier les déficits, voire les champs d'intervention. Ces bases de décision sont fournies par l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA.

Paramètres observés
NAQUA fournit des analyses nationales sur la quantité des eaux souterraines, en mesurant leurs niveaux et les débits des sources (chap. 5), et sur leur qualité. L'observation de cette dernière inclut la température (chap. 7) et porte tant sur les substances d'origine naturelle présentes dans l'eau (chap. 6, 8 et 9) que les substances étrangères telles que les nitrates (chap. 10), les produits phytosanitaires (chap. 11), les hydrocarbures (chap. 12) et les indicateurs d'eaux usées (chap. 13). D'autres micropolluants (chap. 14 et 15) et les paramètres biologiques (chap. 16) font l'objet de relevés limités dans le temps et l'espace dans le cadre d'études pilotes.

Période couverte
Le présent rapport sur l'état des ressources en eaux souterraines et leur évolution fait suite aux deux rapports précédents (OFEFP/OFEG 2004, OFEV 2009a). En prenant ainsi comme point de départ l'année 2007 et en se fondant sur les données validées disponibles au moment de son élaboration, le rapport couvre la période jusqu'en 2016 en ce qui concerne la quantité d'eaux souterraines, leur température et leurs composants d'origine naturelle, mais jusqu'en 2014 seulement pour ce qui est des substances étrangères (annexe 1). Des données actuelles sont publiées sur le site Internet de l'OFEV *(www.bafu.admin.ch/eaux-souterraines).* Depuis le lancement de NAQUA en 2002, des séries de données allant jusqu'à quinze ans sont maintenant disponibles à l'échelle nationale sur la quantité et la qualité des eaux souterraines. Ces données mettent parfois en évidence des changements significatifs.

3 Observation nationale des eaux souterraines NAQUA

3.1 Objectifs

Image à l'échelle nationale
L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA fournit une image de l'état des eaux souterraines et de leur évolution à l'échelle de la Suisse, sur le plan tant qualitatif que quantitatif. Voici les objectifs de NAQUA :

- consigner l'état ainsi que l'évolution de la quantité et de la qualité des eaux souterraines dans l'ensemble du pays ;
- repérer rapidement et suivre de manière ciblée les changements indésirables ou la présence de substances problématiques ;
- vérifier l'efficacité de mesures déjà prises pour protéger les eaux souterraines et démontrer la nécessité d'en prendre d'autres ;
- caractériser et classer les principaux aquifères de Suisse.

Base de référence
NAQUA constitue une base de référence importante pour la protection des eaux souterraines à l'échelle de la Suisse et sert en conséquence à protéger l'être humain et l'environnement contre des substances et des organismes nuisibles. Les données obtenues sont intégrées aux rapports cantonaux, nationaux et internationaux sur l'environnement.

Mission légale
Selon la Constitution, il incombe à la Confédération de pourvoir à l'utilisation rationnelle des ressources en eau et à leur protection (art. 76 Cst.). À cet effet, elle collecte les données statistiques requises concernant l'état et l'évolution des ressources en eaux souterraines (art. 65 Cst.). Elle est compétente pour effectuer des relevés d'intérêt national sur les conditions hydrologiques et la qualité des eaux souterraines (art. 57 de la loi fédérale sur la protection des eaux, LEaux). Les cantons effectuent par ailleurs les autres relevés nécessaires à l'exécution de la législation et communiquent les résultats aux autorités fédérales (art. 58 LEaux). La Confédération et les cantons informent régulièrement le public sur l'état actuel des eaux et sur l'efficacité des mesures prises pour les protéger (art. 50 LEaux).

3.2 Organisation

Collaboration entre Confédération et cantons
L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA est gérée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) en étroite collaboration avec les cantons. Une liste des services cantonaux spécialisés impliqués dans NAQUA figure en annexe 2. Relevées par la Confédération et les cantons dans le cadre de NAQUA, les données sont stockées dans une base de données centralisée. L'OFEV les gère et les analyse pour en tirer des conclusions à l'échelle nationale.

Données homogènes et de qualité à long terme
La coordination de l'observation des eaux souterraines entre Confédération et cantons dans le cadre de NAQUA garantit que les données sont relevées de manière homogène sur l'ensemble du pays et qu'elles sont comparables à l'échelle nationale, disponibles sans discontinuité sur le long terme et de qualité élevée. Elles permettent ainsi de tirer des conclusions significatives et fiables sur l'état et l'évolution des ressources suisses en eaux souterraines.

Groupes d'accompagnement
Le groupe de travail « Paramètres NAQUA » fournit à l'Observation nationale des eaux souterraines des conseils techniques et stratégiques pour la sélection et le développement des paramètres à analyser, en particulier pour ce qui est de la qualité des eaux souterraines. De même, le groupe d'experts « Isotopes dans le cycle de l'eau » apporte son appui à NAQUA dans le suivi des isotopes stables de l'eau. Les groupes d'accompagnement réunissent des représentants de différents offices fédéraux, de services cantonaux spécialisés, de distributeurs d'eau, des milieux scientifiques et de l'industrie.

3.3 Modules

L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA comprend quatre modules : QUANT, TREND, SPEZ et ISOT. Le module QUANT relève la quantité d'eaux souterraines tandis que les deux modules TREND et SPEZ portent sur leur qualité. Le module ISOT sert quant à lui à observer les isotopes dans le cycle de l'eau. Le cas échéant, des études pilotes limitées dans le temps viennent compléter le monitoring à long terme.

Stations de mesure

Les stations de mesure NAQUA couvrent les différentes régions géographiques du pays, les principaux types d'aquifères ainsi que les différentes conditions hydrogéologiques et utilisations du sol en Suisse (tab. 3.1). Le choix des stations des différents modules ainsi que leur représentativité sont décrits en détail dans les rapports précédents (OFEFP/OFEG 2004 ; OFEV 2009a). Dans les modules TREND et SPEZ, une très grande partie des stations sont des captages d'eau potable. De plus, la plupart des stations des modules QUANT, TREND et SPEZ se situent dans le secteur A_U de protection des eaux, c'est-

Tableau 3.1

Stations de mesure des différents modules selon le type de station, le type d'aquifère, l'utilisation principale du sol et l'exploitation de l'eau

État 2016. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure.

Critère	Caractéristique	Stations de mesure [nombre]			
		Module QUANT	Module TREND	Module SPEZ	Module ISOT
Type de station	Puits exploité	15	31	235	–
	Piézomètre	35	4	6	–
	Source	41	15	254	–
	Précipitations	–	–	–	13
	Cours d'eau	–	–	–	9
Type d'aquifère	Roches meubles				
	· Graviers	54	36	254	–
	· Moraines	2	0	38	–
	· Éboulis	1	1	41	–
	Roches consolidées				
	· Karst	17	7	95	–
	· Roches cristallines	8	2	16	–
	· Roches détritiques	9	4	51	–
Utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation	Zones urbanisées et voies de communication	10	11	85	–
	Grandes cultures	42	20	77	–
	Viticulture, arboriculture	–	1	5	–
	Production herbagère et bétail	11	7	138	–
	Pâturages d'estivage	3	2	20	–
	Forêt	19	7	151	–
	Régions improductives	6	2	13	–
	Non définie	–	–	6	–
Exploitation de l'eau	Production d'eau potable	46	37	443	–
	Secteur A_U de protection des eaux	81	46	467	–
Total		**91**	**50**	**495**	**22**

à-dire dans des aquifères exploitables pour l'approvisionnement en eau potable. Afin de garantir la pertinence des données relevées dans le cadre de NAQUA ainsi que leur comparabilité sur le long terme, les réseaux de mesure doivent demeurer aussi constants que possible. Les stations qui ne sont plus accessibles ou ont été supprimées sont remplacées de manière appropriée d'entente avec les services cantonaux spécialisés.

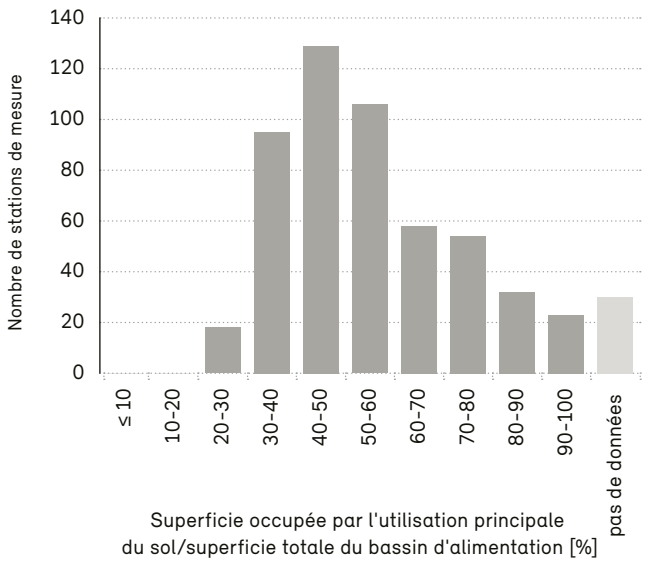
Utilisation du sol

L'utilisation du sol dans le bassin d'alimentation des diverses stations de mesure a été déterminée sur la base de photos aériennes, de la statistique suisse de la superficie et du recensement des entreprises agricoles. Compte tenu de la structure très fragmentée du territoire suisse, ces bassins présentent le plus souvent plusieurs utilisations du sol. Celle qui est dite « principale » est l'utilisation qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure. Sa part représente le plus souvent entre 35 et 80 % (fig. 3.1). Elle couvre rarement la totalité de la superficie du bassin d'alimentation et peut parfois n'en représenter que 25 %. L'eau souterraine d'une station peut donc être influencée de manière significative par d'autres utilisations du sol, qui occupent une part plus petite de la superficie. La part de la recharge provenant de l'infiltration de l'eau de rivière n'a pas été prise en compte dans la détermination de la superficie de l'utilisation du sol. En conséquence, l'utilisation des sols identifiée n'est valable que pour la part des eaux souterraines rechargées par l'infiltration directe des précipitations.

Figure 3.1

Utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation des stations de mesure par rapport à la superficie totale du bassin

Stations de mesure du module TREND et du module SPEZ.



3.3.1 Module QUANT (quantité)

Niveaux des eaux souterraines et débits des sources

À partir des niveaux des eaux souterraines et des débits des sources, le module QUANT enregistre sur le long terme des données concernant la quantité d'eau dans les aquifères caractéristiques de la Suisse. Les relevés permettent d'évaluer la quantité des eaux souterraines et son évolution au niveau national, ainsi que d'éventuels effets du changement climatique sur ces ressources. Il serait toutefois vain de vouloir en tirer des conclusions sur la disponibilité locale et régionale d'eaux souterraines, plus spécialement quant à la production d'eau potable.

Ce module enregistre également en continu la température, la conductivité électrique et parfois la turbidité des eaux souterraines.

Déploiement encore en cours

La mise en place du module QUANT, qui devrait en définitive compter 100 stations de mesure, n'est pas encore achevée (fig. 3.2). Depuis 2007, 19 nouvelles sources (6 dans le karst, 5 dans des roches cristallines fissurées, 4 dans des roches détritiques fissurées et 4 dans des roches meubles) ainsi qu'un puits exploité et un piézomètre, tous deux dans des roches meubles, ont été inclus dans le module. Fin 2016, celui-ci comptait donc au total 91 stations de mesure, dont 30 font également partie du module TREND et 17 du module SPEZ.

Saisies d'anciennes données

Les anciennes données collectées aux stations de mesure par les propriétaires de captages avant le lancement de NAQUA et disponibles uniquement sur papier (limnigrammes) ont été acquises de manière ciblée ces dernières années et converties au format numérique. La Suisse dispose ainsi, pour plus de 40 stations, de séries de données numériques concernant la quantité d'eaux souterraines sur une période de plus de vingt ans.

3.3.2 Modules TREND et SPEZ (qualité)

Module TREND : comprendre les processus

Le module TREND sert à comprendre les processus naturels et les facteurs anthropiques qui influent sur l'évolution à court et à long termes de la qualité des eaux souterraines. Ce module englobe 50 stations de mesure caractérisées de manière détaillée et sises dans des aquifères typiques (fig. 3.3). Géré de manière centralisée par la Confédération à partir de 1997, il est entièrement opérationnel depuis 2005. Il mesure les éléments inorganiques majeurs de l'eau tels que le calcium, le magnésium ou les bicarbonates, les chlorures et les sulfates, ainsi que les éléments traces. Par analogie avec le module SPEZ (cf. ci-dessous), les échantillons prélevés régulièrement sont également analysés quant à la présence de nitrates et de différentes substances organiques étrangères. Le module TREND enregistre aussi en continu les niveaux des eaux souterraines ou les débits des sources, la conductivité électrique, la température et, dans certains cas, la turbidité des eaux souterraines.

Module SPEZ : les polluants en point de mire

Le module SPEZ sert de base aux analyses statistiques menées à l'échelle nationale sur la présence de substances étrangères dans les eaux souterraines en Suisse, ainsi que sur leur évolution à long terme. Il focalise en particulier sur les substances issues de l'agriculture, de l'industrie, de l'artisanat, des ménages et des transports. Il analyse les nitrates, les résidus de produits phytosanitaires, les indicateurs d'eaux usées ainsi que d'autres micropolluants tels que les hydrocarbures halogénés. Le module SPEZ compte quelque 500 stations de mesure réparties sur l'ensemble de la Suisse (fig. 3.3) et est géré depuis 2002 par l'OFEV en étroite collaboration avec les services cantonaux spécialisés. Les stations couvrent les diverses régions géographiques et les caractéristiques hydrogéologiques du pays. L'utilisation du sol dans le bassin d'alimentation des stations de mesure permet d'estimer les sources potentielles de polluants.

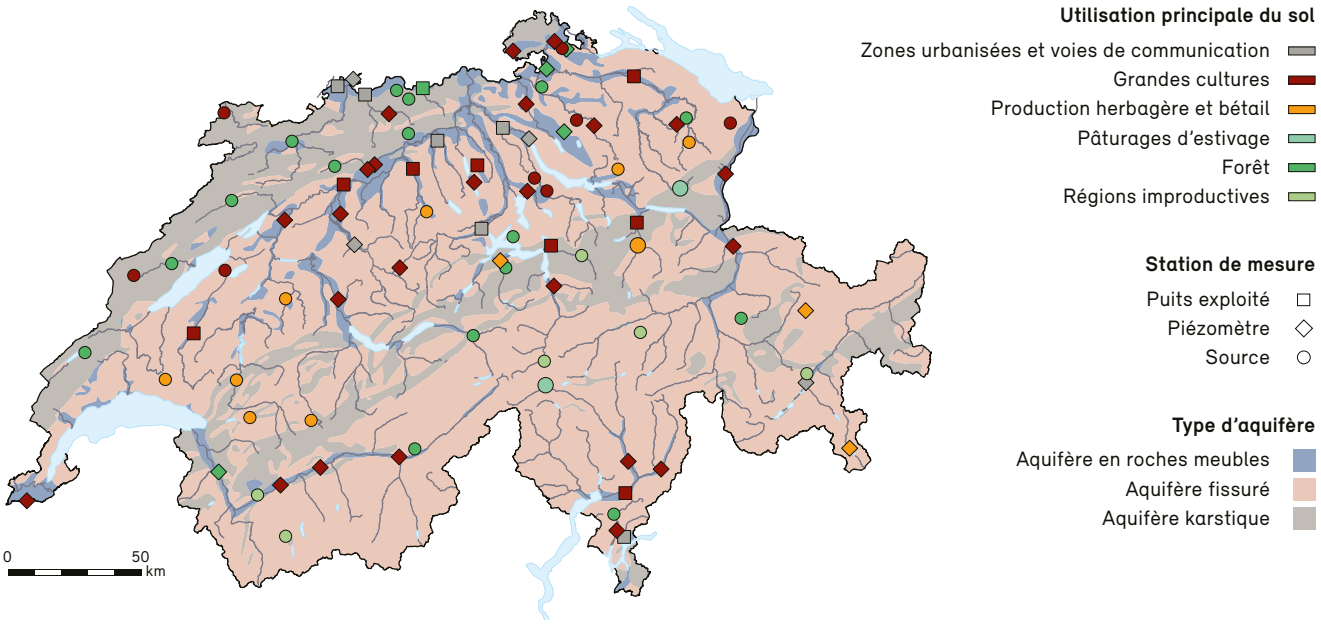
Monitoring à long terme de quelque 70 substances

La palette des substances qui font l'objet d'analyses régulières, soit une à quatre fois l'an, dans le cadre du monitoring à long terme des modules TREND et SPEZ est vérifiée chaque année et au besoin adaptée. Ces ajuste-

Figure 3.2

Stations de mesure du module QUANT destinées à l'observation de l'état quantitatif des eaux souterraines, utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation et type d'aquifère

État 2016.



ments se fondent sur les résultats de l'année précédente, des connaissances scientifiques récentes et les recommandations du groupe de travail « Paramètres NAQUA ». Grâce aux moyens d'analyse optimisés, le nombre des substances pour lesquelles des données sont disponibles à l'échelle nationale a quasiment triplé, passant de près de 20 en 2002 à environ 70.

Études pilotes

D'autres situations ou phénomènes susceptibles d'exercer une influence sur les eaux souterraines font l'objet d'études pilotes limitées dans le temps, que l'OFEV réalise souvent en collaboration avec d'autres offices fédéraux et des instituts de recherche. Depuis 2007, de telles études ont été consacrées aux domaines suivants.

- **Micropolluants**
  Composés perfluorés (2007/2008, chap. 14), Screening micropolluants (2007/2008, chap. 15), Dynamique des produits phytosanitaires (2010/2011, chap. 11), 1,4-dioxane (2011/2012, 2015, chap. 12), Glyphosate (2016/2017, chap. 11)
- **Composés traces inorganiques**
  Antimoine (2006/2007, chap. 9), Isotopes de l'eau dans les eaux souterraines (2006-2013, chap. 6), Éléments traces (2007/2008, chap. 9), Radioactivité naturelle et éléments traces (2012, chap. 9)
- **Microbiologie et faune**
  Microorganismes (2009/2010, chap. 16), Microbial source tracking (2012/2013, chap. 16), Communautés microbiennes (2012/2013), Stygofaune (2013/2014, chap. 16)

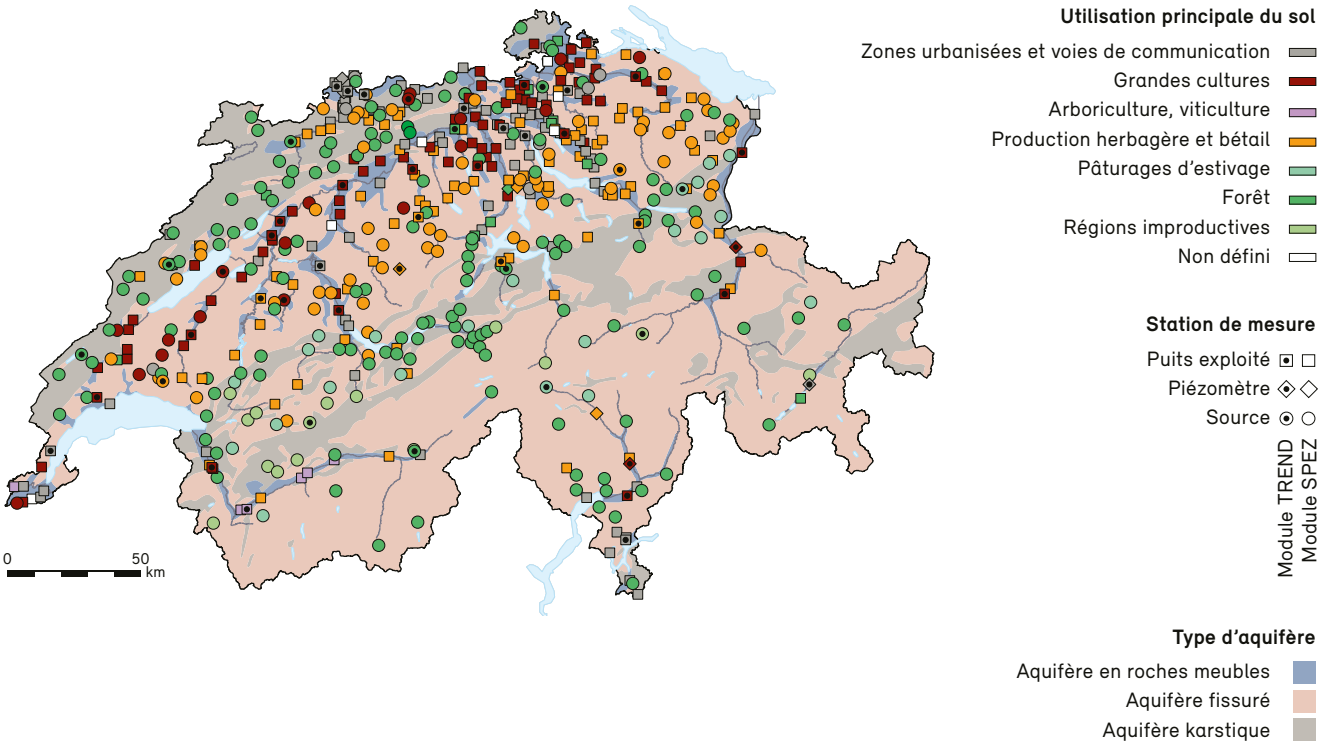
Autres substances

Outre les substances du monitoring à long terme et les divers paramètres chimiques et biologiques faisant l'objet des études pilotes, sont également enregistrées les substances que les cantons analysent de leur propre

Figure 3.3

Stations de mesure des modules TREND et SPEZ destinées à l'observation de la qualité des eaux souterraines, utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation et type d'aquifère

État 2016.



chef aux stations de mesure NAQUA et dont ils transmettent ensuite les données à l'OFEV. La base de données contient ainsi les résultats d'analyses pour un millier de substances différentes.

3.3.3 Module ISOT (isotopes de l'eau)

Données de référence

Le module ISOT sert à l'observation des isotopes dans le cycle de l'eau et fournit des données de références destinées à des études hydrogéologiques, comme la provenance et l'âge des eaux souterraines. Il permet également d'identifier les effets à long terme du changement climatique sur la composition isotopique des précipitations et des cours d'eau. Le module ISOT compte treize stations de mesure de précipitations et neuf stations de mesure des eaux de surface (fig. 3.4) depuis qu'il a intégré, en 2013, la station du Rhin à Weil am Rhein et celle du Rhône à Chancy. Jusqu'en 2009, il englobait également trois stations de mesure des eaux souterraines.

Stations de mesure des précipitations

Les treize stations de mesure des précipitations sont réparties à travers les différentes régions géographiques de la Suisse et couvrent plusieurs étages alpins le long d'un axe NO/SE, qui part de Berne (à 541 m d'altitude), passe par le col du Grimsel (1950 m) et aboutit à Lugano (379 m). Ces stations se situent à proximité de stations météorologiques de MétéoSuisse, qui recueillent les valeurs d'autres paramètres comme la température de l'air et la pression de vapeur d'eau.

Stations de mesure sur les grands cours d'eau

Les neuf stations de mesure des eaux de surface sont situées sur les grands cours d'eau qui prennent leur source dans les Alpes (Aar, Inn, Rhin, Rhône et Tessin). Elles se trouvent en général à l'embouchure dans les grands lacs ou à la frontière avec les pays voisins. Elles font également partie de l'Observation nationale continue des cours d'eau suisses (NADUF).

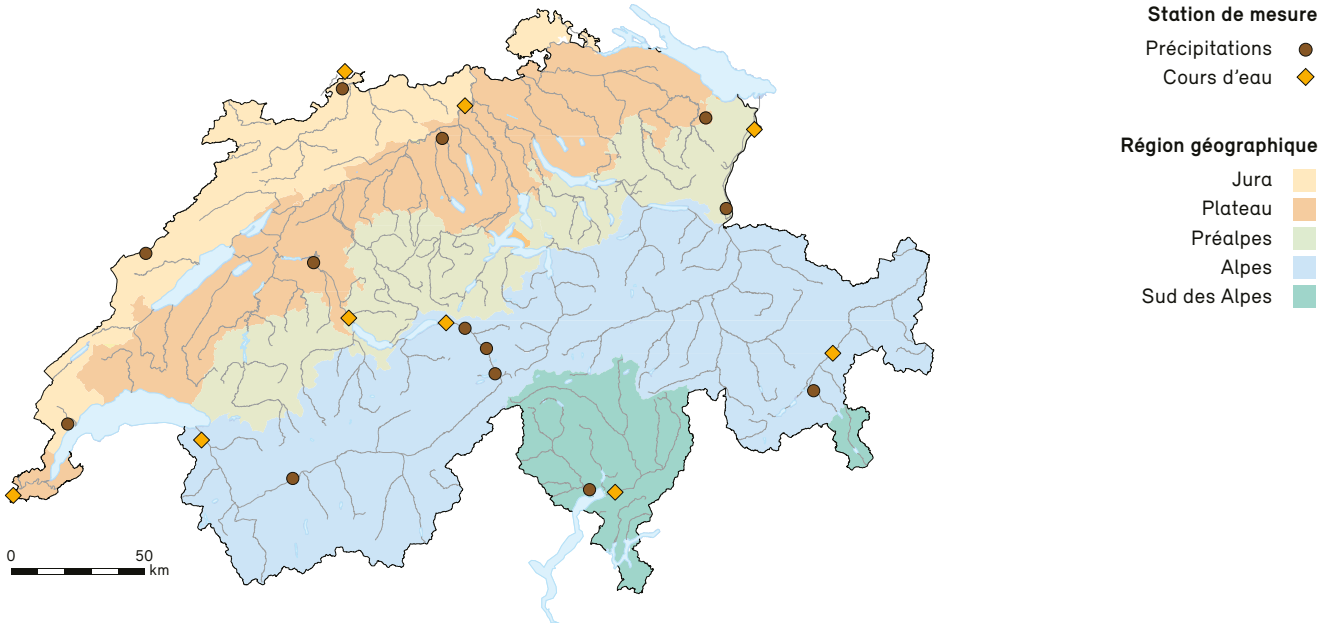
Stations de mesure dans certains aquifères

À l'époque de leur mise en place, les trois stations de mesure des eaux souterraines avaient été choisies pour observer comment les eaux souterraines intègrent la composition isotopique des précipitations. La pertinence de leurs résultats étant purement locale, elles ont été abandonnées fin 2009, après l'achèvement des études correspondantes.

Figure 3.4

Stations de mesure du module ISOT destinées à l'observation des isotopes dans les précipitations et les cours d'eau, et régions géographiques

État 2016.



Paramètres
Depuis 1992, le deutérium et l'oxygène 18, deux isotopes stables de l'eau, font l'objet d'analyses mensuelles à toutes les stations de mesure du module ISOT. Aux stations de mesure des précipitations le long de l'axe NO/SE, des données des années 1980 à 1991, collectées par l'Université de Berne, sont également disponibles. Lancées en 1992, les analyses du tritium dans les stations ISOT se sont achevées fin 2009. L'activité du tritium ayant dans l'ensemble retrouvé son niveau naturel après la diminution des essais nucléaires, il ne peut plus servir à déterminer l'âge de l'eau. Selon leur type, les stations ISOT recueillent également les valeurs de paramètres tels que la pression de vapeur d'eau, la température de l'air, le niveau ou le débit de l'eau, la température de l'eau et la conductivité électrique.

3.4 Assurance qualité

Validation des données
Dans le cadre de l'assurance qualité, une procédure comprenant plusieurs étapes évalue toutes les données NAQUA et vérifie leur plausibilité. Des résultats d'analyse douteux sont investigués en détail avec les laboratoires concernés. Seules les données validées sont publiées.

Essais interlaboratoires et analyses comparatives
Les laboratoires privés chargés d'effectuer les analyses chimiques sont accrédités et participent régulièrement à des essais interlaboratoires internationaux. De plus, ces laboratoires procèdent à des analyses comparatives deux fois par année, chaque fois à dix stations de mesure NAQUA. Ces comparaisons permettent de déceler et de corriger rapidement d'éventuels écarts systématiques.

Normes de qualité
Afin de garantir la comparabilité de toutes les données, l'OFEV fixe pour les substances du monitoring à long terme des limites de quantification que tous les laboratoires impliqués sont tenus de respecter. Ces limites sont définies de manière à correspondre à l'état de la technique et à se situer nettement au-dessous des exigences chiffrées de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux).

3.5 Information et communication

Publications imprimées et en ligne
Les résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines sont diffusés via deux canaux principaux : les informations paraissant à intervalles réguliers sur Internet (*www.bafu.admin.ch/eaux-souterraines*) et le rapport NAQUA, dont deux éditions ont jusqu'ici été publiées (OFEFP/OFEG 2004, OFEV 2009a). Le Bulletin des eaux souterraines fournit par ailleurs régulièrement des informations sur les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources, ainsi que sur leur évolution. Les données provenant de certaines stations de mesure concernant la quantité d'eaux souterraines et leur température sont de plus disponibles en ligne (*www.hydrodaten.admin.ch/fr/*). Enfin, des données et des analyses spécifiques sont périodiquement reprises dans des articles spécialisés ainsi que dans l'Annuaire hydrologique de la Suisse (OFEV 2018a, p. ex.), le rapport Environnement Suisse (Conseil fédéral 2018, p. ex.), l'Environnement – Statistique de poche (OFS 2018, p. ex.) et le Rapport agricole (OFAG 2016a, p. ex.) ou encore dans les rapports établis à l'intention de l'Organisation mondiale de la santé (OMS ; OSAV/OFEV 2016, p. ex.), de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE ; OCDE 2013, p. ex.) et des Nations Unies (CH 2016, p. ex.).

Indicateurs
Selon le contexte, les données et les analyses de NAQUA sont en outre agrégées en indicateurs spécifiques. Aux côtés de différents indicateurs de l'observation de l'environnement assurée par l'OFEV, NAQUA apporte une contribution aux indicateurs de développement durable du Cercle Indicateurs (ARE 2015, p. ex.) et aux indicateurs agro-environnementaux de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG 2014, p. ex.).

Transmission des données
Des données sont transmises une fois l'an à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE 2018, p. ex.), à l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA ; Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations [GNIP] et Réseau mondial de mesure des isotopes dans les cours d'eau [GNIR]) ainsi qu'au Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC ; Réseau mondial de surveillance des eaux souterraines [GGMN]).

4 Les eaux souterraines en Suisse

4.1 Ressources en eaux souterraines

Un élément du cycle de l'eau

Les eaux souterraines participent au cycle naturel de l'eau. Elles sont alimentées par la portion de l'eau des pluies ainsi que de la fonte des neiges et des glaciers qui ne s'évapore et ne ruisselle pas, mais pénètre dans le sol. Elles se forment également par infiltration de l'eau des cours d'eau. De fortes précipitations dans les bassins versants alpins des grands cours d'eau peuvent ainsi exercer une influence sur les aquifères de plaine. Lorsque les eaux d'infiltration atteignent la zone saturée du sous-sol, elles s'écoulent en tant qu'eaux souterraines jusqu'au point de sortie naturel (source) ou jusqu'à un point de prélèvement artificiel (puits de pompage). Elles peuvent également quitter l'aquifère pour alimenter des eaux de surface. Cette exfiltration constitue une part décisive du débit de base des cours d'eau et joue un rôle essentiel dans la préservation d'écosystèmes liés aux eaux souterraines.

150 milliards de m^3 d'eau disponibles

Le volume total des eaux disponibles dans le sous-sol suisse avoisine 150 milliards de m^3 (Sinreich et al. 2012), soit à peu près le volume de tous les lacs suisses réunis. En règle générale, le volume des eaux sortant du sous-sol par les sources ou par exfiltration dans les eaux de surface équivaut à celui généré par les précipitations et l'infiltration des cours d'eau. Cet équilibre signifie que le volume de l'eau souterraine reste constant à long terme. Cependant, une surexploitation de l'eau, c'est-à-dire lorsque les prélèvements ne sont pas effectués dans un souci de durabilité, peut entraîner une diminution du volume.

18 milliards de m^3 par an durablement exploitable

Le volume d'eaux souterraines disponible chaque année correspond au volume qu'il est possible de prélever de manière durable dans le sous-sol, à savoir sans abaisser à long terme leurs niveaux et sans porter d'autres atteintes persistantes à l'environnement. D'une part, il repose sur la recharge naturelle des eaux souterraines. De l'autre, il comprend la part supplémentaire d'eau qui peut s'infiltrer dans les aquifères productifs des grandes vallées si des puits de pompage sont exploités à proximité des cours d'eau. En Suisse, le volume théorique durablement exploitable avoisine 18 milliards de m^3 par an, soit plus de 10 % du volume total des eaux souterraines (Sinreich et al. 2012). Les modifications du régime de recharge, dues par exemple au changement climatique, sont susceptibles d'exercer une influence sur ces données à moyen ou à long terme.

Fréquentes limitations de l'exploitation

Si l'on ne considère que les sites où les eaux souterraines peuvent être exploitées conformément à la législation (délimitation de zones de protection sans conflit d'utilisation sérieux, application des restrictions requises en matière d'exploitation) ainsi que les ressources en eaux souterraines exploitables pour l'alimentation en eau potable, le volume effectivement disponible diminue sensiblement. L'utilisation intensive du sol et la densité des constructions rendent souvent très difficile la mise en service de nouveaux captages d'eau potable, en particulier dans les aquifères en roches meubles productifs du Plateau et des grandes vallées alpines.

1,3 milliard de m^3 par an exploités pour l'eau potable

Chaque année, environ 1,3 milliard de m^3 sont prélevés dans le sous-sol pour la production d'eau potable, soit 80 % environ de l'eau qui alimente les réseaux publics d'eau potable en Suisse (Freiburghaus 2009). Ce volume ne correspond certes qu'à 7 % environ de l'offre théorique d'eaux souterraines durablement exploitable par année. En raison de l'utilisation intensive de vastes portions du territoire suisse, le volume exploité représente cependant une portion nettement plus grande du volume réellement disponible.

4.2 Aquifères

Trois types d'aquifères

Il existe plusieurs types d'aquifères en Suisse. Selon leurs spécificités géologiques, on en distingue trois grands, qui diffèrent nettement par leurs caractéristiques hydrogéo-

logiques (vitesse d'écoulement et vulnérabilité face à l'apport de substances étrangères) : aquifères en roches meubles, aquifères fissurés et aquifères karstiques (fig. 4.1).

Aquifères en roches meubles

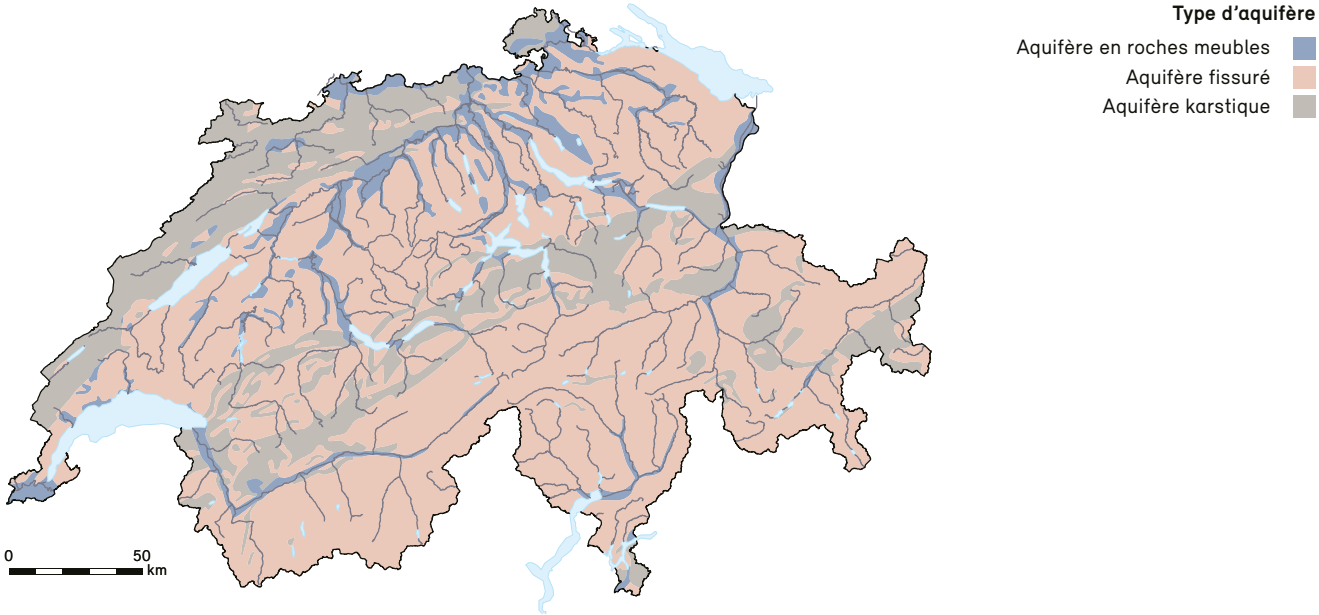
Dans les aquifères en roches meubles, l'eau s'écoule lentement et de manière uniforme dans les pores du sable et du gravier, par exemple, sa vitesse ne dépassant donc que rarement quelques mètres par jour. En Suisse, de grands réservoirs de ce type se situent surtout le long des grands cours d'eau du Plateau et au fond des grandes vallées alpines, occupant 6 % environ du territoire national (OFEV 2004). Lorsque rivières et eaux souterraines sont directement en contact, l'infiltration des eaux de surface représente une part importante de la recharge des eaux souterraines. Bien que les réservoirs aquifères suisses se trouvent le plus souvent à proximité de la surface, les sols et d'autres couches naturelles offrent en général une bonne protection contre l'apport de substances étrangères. Malgré leur superficie modeste, les aquifères en roches meubles assurent, en raison de leur grande productivité, une part considérable de l'approvisionnement en eau potable, à savoir 36 % environ (Spreafico et Weingartner 2005). Ces eaux souterraines sont en général exploitées à proximité des cours d'eau par des puits de pompage, qui fournissent souvent un débit élevé grâce à l'infiltration d'eau de surface dans les berges. Toutefois, lorsque ces captages sont trop proches du cours d'eau qui les alimente, ils peuvent se révéler vulnérables aux pollutions microbiologiques, en particulier lors de crues.

Aquifères fissurés

Dans de vastes portions du Plateau et des Alpes, le sous-sol est constitué de roches fissurées. Celles-ci occupent au total 78 % du territoire suisse et sont en partie couvertes d'une couche de roches meubles de faible épaisseur. Il existe également plusieurs types d'aquifères fissurés. Dans les roches cristallines fissurées (granites et gneiss, p. ex.), que l'on trouve principalement dans les Alpes et au sud des Alpes, l'eau circule dans un réseau de fissures et de grandes fractures géologiques. Dans les roches détritiques (grès et conglomérats, p. ex.), l'eau peut de plus s'écouler dans les pores de la roche, comme elle le fait dans le grès de la molasse du Plateau. Dans les aquifères fissurés, la vitesse d'écoulement de l'eau est par conséquent variable et peut atteindre plusieurs centaines de mètres par jour. Contrairement à de nombreux aquifères fissurés en roches détritiques situés en basse altitude, les aquifères fissurés en roches cristallines

Figure 4.1

Types d'aquifères



sont fréquemment dépourvus d'une couche de couverture naturelle suffisante. En effet, ils se trouvent le plus souvent dans les régions alpines où la couche superficielle du sol est très mince. Les eaux souterraines issues d'aquifères fissurés couvrent environ 30 % des besoins en eau potable de la Suisse et proviennent principalement de captages de sources.

Aquifères karstiques

Très fréquents dans les Alpes et le Jura, les aquifères karstiques occupent environ 16 % du territoire suisse. Sous l'effet de leur dissolution, les roches calcaires laissent se former des vides de taille variable (karstification), parfois de grottes, où les eaux souterraines peuvent s'écouler librement, leur vitesse atteignant plusieurs centaines de mètres par heure. De plus, les aquifères karstiques sont souvent en relation hydraulique directe avec la surface du sol. Pour cette raison et en l'absence fréquente d'une couche de sol suffisante, ils sont très vulnérables à l'apport de substances étrangères, en particulier aux pollutions microbiologiques. Dans ce domaine, les conditions hydrologiques, telles les précipitations et la fonte des neiges, jouent également un rôle important. Les sources karstiques contribuent à raison de 18 % environ à l'approvisionnement en eau potable de la population suisse.

5 Niveaux des eaux souterraines et débits des sources

5.1 Bases

Facteurs d'influence

La quantité des eaux souterraines et ses variations sont mesurées à l'aide de leurs niveaux et des débits des sources. Les fluctuations annuelles sont déterminées par les précipitations, la température de l'air, la fonte des neiges, l'intensité de la connexion hydraulique des eaux souterraines aux cours d'eau et les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère correspondant. L'exploitation des eaux souterraines, l'utilisation du sol, des améliorations foncières, des interventions liées à la construction ainsi que le changement climatique peuvent également avoir une influence sur l'évolution de la quantité d'eau souterraine. La plupart des aquifères suisses étant proches de la surface, ces influences s'exercent rapidement, c'est-à-dire en l'espace de quelques jours à quelques mois.

Trois régimes des eaux souterraines

Les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources connaissent en général des variations annuelles récurrentes. Par analogie à la notion de « régime d'écoulement » utilisée pour les cours d'eau (OFEV 1992), ces variations sont appelées « régime des eaux souterraines ». En Suisse, on distingue trois de ces régimes : pluvial, pluvio-nival et nivo-glaciaire. Le régime des eaux souterraines caractérise les fluctuations annuelles moyennes à long terme aussi bien des niveaux d'eaux souterraines (Schürch et al. 2010) que des débits des sources (Schürch et al. 2016).

Régime pluvial

Le régime pluvial est typique des régions du Jura et du Plateau. Il se distingue par une recharge des eaux souterraines liée aux précipitations locales qui intervient surtout en hiver et au printemps. En général, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources y atteignent donc des valeurs maximales durant les mois de janvier à mars, tandis qu'ils affichent leurs valeurs minimales à la fin de l'été, d'août à septembre. Dans le cas d'un haut niveau piézométrique, la recharge intervient avec un certain décalage. Il faut par conséquent plus de temps pour que les eaux souterraines atteignent leurs niveaux minimal et maximal (cf. station de « Wilchingen, Klettgau », fig. 5.4).

Régime pluvio-nival

Le régime pluvio-nival se distingue par une recharge combinant l'eau des précipitations et de la fonte des neiges. C'est le régime que l'on rencontre typiquement dans les régions des Préalpes et du sud des Alpes. Les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources y atteignent le plus souvent leurs valeurs maximales en mars ou en avril, où l'effet de la fonte des neiges coïncide avec les précipitations printanières, et affichent leurs valeurs minimales en hiver. Au sud des Alpes, les valeurs maximales sont enregistrées plus tard (en mai ou en juin) et peuvent être complétées par un deuxième maximum en octobre, ces deux pics s'expliquant par la fréquence des précipitations (effet de barrage) au printemps et en automne.

Régime nivo-glaciaire

Le régime nivo-glaciaire est typique de la région alpine. En hiver, les précipitations y tombent le plus souvent sous forme de neige et ne contribuent donc pas directement à la recharge des eaux souterraines. Les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources connaissant un régime nivo-glaciaire affichent donc leurs valeurs minimales entre décembre et février. En moyenne et haute altitude, ils atteignent leurs valeurs maximales entre mai et juillet sous l'effet de la fonte des neiges et des glaciers.

Régime importé

Lorsque le bassin versant d'un cours d'eau alimentant les eaux souterraines est situé dans une autre région géographique que l'aquifère, le débit du cours d'eau et la recharge locale des eaux souterraines par les précipitations suivent des variations annuelles moyennes qui diffèrent sur le long terme. Il arrive que le régime d'écoulement d'un cours d'eau influence celui de l'aquifère alimenté par infiltration au point de supplanter ce dernier.

On parle alors de régime « importé » des eaux souterraines. Les grands cours d'eau s'écoulant des Alpes (Aar, Linth, Reuss, Rhin et Rhône) importent ainsi le régime nivo-glaciaire dans les eaux souterraines qui s'écoulent dans les alluvions du fond des larges vallées du Plateau. De même, les rivières des Préalpes (Emme, Sarine et Thur) importent le régime pluvio-nival. Dans les aquifères en roches meubles de ces vallées, le régime importé d'eaux souterraines s'atténue avec la distance au cours d'eau pour retrouver progressivement les caractéristiques du régime typique de la région. Dans le Seeland bernois par exemple, le régime des eaux souterraines passe ainsi de nivo-glaciaire à pluvial.

LEaux : pas d'abaissement durable

Selon les objectifs écologiques pour l'eau définis par l'annexe 1 de l'ordonnance pour la protection des eaux (OEaux), les niveaux des eaux souterraines et le régime hydraulique doivent présenter des caractéristiques proches de l'état naturel. Pour protéger les ressources en eaux souterraines, la LEaux prévoit que les prélèvements opérés dans un aquifère ne doivent pas dépasser la quantité d'eau qui l'alimente. Autrement dit, tout abaissement durable et sur une grande surface des niveaux des eaux souterraines est interdit (art. 43, al. 1 et 6, LEaux). En ce qui concerne les débits des sources, les prélèvements d'eaux souterraines doivent respecter les dispositions de la LEaux qui régissent le débit résiduel des eaux de surface (art. 31 à 34 LEaux).

Indicateurs

Les indicateurs « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources élevés » et « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources bas », de l'OFEV, reflètent l'état des eaux. Les relevés à long terme et à l'échelle du pays des niveaux des eaux souterraines et des débits des sources dans le cadre de NAQUA permettent de consigner l'état et l'évolution de la quantité d'eaux souterraines au niveau national et d'identifier de possibles influences posant problème. Certaines données sont de plus transmises régulièrement à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE ; AEE 2018, p. ex.) et au Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC).

5.2 Relevé des données

Un relevé toutes les cinq minutes

Pour la période allant de 2007 à 2016, des données continues provenant des 91 stations de mesure du module QUANT (chap. 3) documentent les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources. Les relevés sont faits à l'aide d'une sonde fixe, qui effectue une mesure toutes les cinq minutes et l'enregistre.

Statistiques

Dans le cas des piézomètres et des sources, les analyses statistiques se fondent sur les moyennes mensuelles des niveaux des eaux souterraines ou des débits mesurés à chaque station de mesure, ces moyennes étant établies à partir des moyennes journalières. Pour les puits de pompage, ces évaluations se basent également sur les moyennes mensuelles des niveaux des eaux souterraines à chaque station, ces moyennes étant toutefois calculées à partir des valeurs maximales journalières. Pour comparer les niveaux des eaux souterraines d'une année avec leur évolution sur le long terme, les valeurs mesurées sont comparées avec celles des vingt années précédentes. De telles séries de données existent actuellement pour 40 des stations de mesure NAQUA. Pour toutes les autres stations en service en 2016, les séries de données disponibles couvrent des périodes plus courtes.

Valeurs de référence

Le classement des niveaux des eaux souterraines ou des débits des sources dans l'évolution à long terme se réfère au domaine dit « normal ». Ce domaine correspond à la marge de fluctuation dans laquelle s'inscriront, selon la plus grande probabilité statistique, les valeurs des niveaux des eaux souterraines ou des débits des sources mesurées à une station durant la période correspondante. Ce domaine englobe toutes les valeurs situées entre les centiles 10 et 90 des valeurs de référence. Les centiles sont toujours calculés à partir des moyennes mensuelles des vingt années précédentes ou des données disponibles, si les séries de données couvrent une période plus courte. Les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources sont dits élevés lorsqu'ils dépassent le domaine normal (et sont donc supérieurs au 90^{e} centile), c'est-à-dire lorsque le résultat du relevé s'inscrit dans les 10 % de valeurs les plus élevées mesurées au cours des vingt der-

nières années durant le mois considéré. À l'inverse, ces paramètres sont dits bas lorsqu'ils se situent en deçà du domaine normal (et sont donc inférieurs au 10e centile), c'est-à-dire lorsque le résultat du relevé s'inscrit dans les 10 % des valeurs les plus basses mesurées au cours des vingt dernières années durant le mois considéré. Pour fournir une présentation plus détaillée, le domaine normal est subdivisé en trois secteurs : niveaux des eaux souterraines et débits des sources inférieurs à la moyenne (centiles 10 à 25), moyens (centiles 25 à 75) et supérieurs à la moyenne (centiles 75 à 90).

Calcul des indicateurs
L'indicateur « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources élevés » exprime le pourcentage de stations de mesure où des niveaux respectivement des débits élevés ont été mesurés durant l'année considérée à une fréquence supérieure à la moyenne pluriannuelle. L'indicateur « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources bas » fournit quant à lui le pourcentage de stations où des niveaux respectivement des débits bas ont été observés durant l'année considérée à une fréquence supérieure à la moyenne pluriannuelle. Ces deux indicateurs se fondent sur les relevés des quelque 40 stations NAQUA pour lesquelles des séries de données continues de vingt années au moins sont disponibles.

5.3 État

Influence des précipitations et des cours d'eau
La quantité des précipitations (fig. 5.1) et le débit des cours d'eau sont les principaux paramètres qui déterminent les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources (fig. 5.2). Ce lien est notamment prouvé par les situations exceptionnelles observées durant les crues enregistrées en 2007, en 2012 et en 2014 ainsi que pendant les sécheresses de 2011 et de 2015.

2007
Sous l'effet de précipitations supérieures à la moyenne, les stations de mesure du nord de la Suisse, soumises à un régime pluvial, pluvio-nival ou nivo-glaciaire, ont enregistré des niveaux d'eaux souterraines et des débits des sources supérieurs à la moyenne, voire parfois élevés. Les niveaux des cours d'eau sont surtout montés fortement durant les intempéries des 7 et 8 août, intensifiant ainsi l'infiltration d'eaux de surface dans les eaux souterraines. En conséquence, les niveaux des eaux souterraines alimentées par l'Emme et celles qui longent l'Aar depuis l'embouchure de l'Emme jusqu'au Rhin ont suivi une hausse rapide. En Suisse orientale, les précipitations sont demeurées dans la moyenne, de sorte que les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont affiché des valeurs normales. Avec son régime pluvio-nival, le sud des Alpes a enregistré des précipitations modestes, si bien que les niveaux des eaux souterraines sont restés bas.

2008
Les précipitations ont affiché des valeurs moyennes de sorte que les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources sont en général restés conformes à la normale. Le nord de la Suisse ayant été considérablement arrosé en avril, les stations de mesure à régime pluvial ou nivo-pluvial ont enregistré des niveaux et des débits parfois élevés. Vu les précipitations exceptionnellement abondantes qui sont tombées sur le sud du pays en avril et en mai, les niveaux et les débits mesurés dans les stations à régime pluvio-nival sont demeurés élevés durant le reste de l'année.

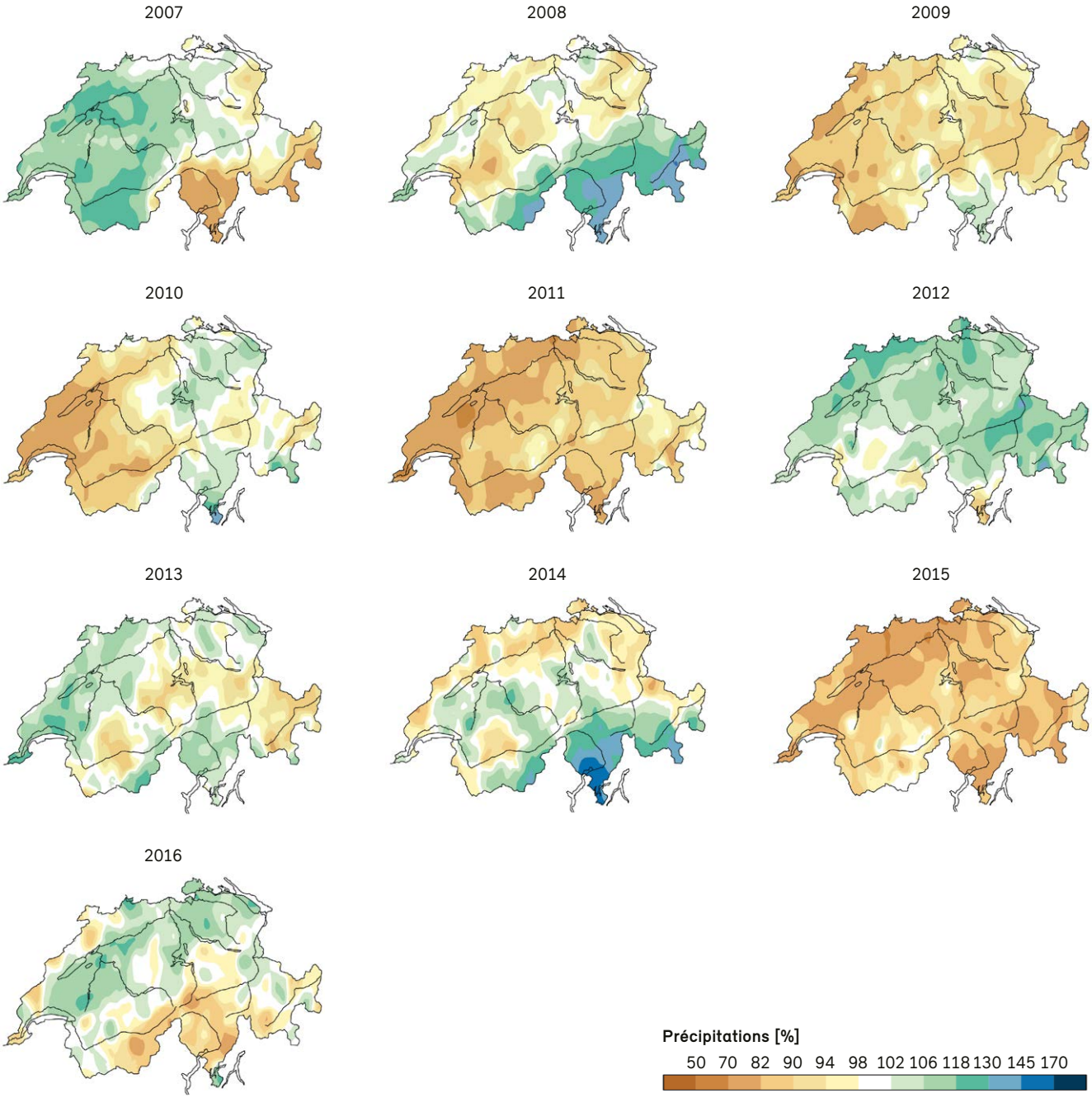
2009
Compte tenu de précipitations inférieures à la moyenne, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources sont demeurés dans la normale aux stations de mesure à régime pluvial ou nivo-glaciaire. Sous l'effet de la sécheresse qui a marqué le second semestre de l'année, ils ont affiché des valeurs basses dans la région à régime pluvio-nival des Préalpes, mais atteint des valeurs élevées au sud des Alpes, où les précipitations ont atteint des valeurs supérieures à la moyenne.

2010
En Suisse occidentale, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont affiché des valeurs normales, voire basses, car les précipitations sont restées faibles. En Suisse orientale et au sud des Alpes, ils n'ont guère quitté les valeurs normales, ou ne les ont que dépassé localement et par moments, malgré des précipitations supérieures à la moyenne et de fortes intempéries.

Figure 5.1

Précipitations (2007 à 2016)

Somme annuelle de précipitations en pourcentage de la moyenne pluriannuelle (1981 à 2010).



Source : MétéoSuisse

2011
Dès les mois de mai et juin, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont affiché des valeurs inférieures à celles de l'été caniculaire de 2003. Dans les vallées des petits cours d'eau du Jura, du Plateau (régime pluvial) et des Préalpes, y compris au Tessin (régime pluvio-nival), les eaux souterraines ont enregistré des niveaux bas durant ces deux mois. Dans les vallées des grandes rivières alpines (régime nivo-glaciaire), des niveaux bas ont également été mesurés, car les précipitations et la fonte des neiges et des glaciers sont restées faibles. À la suite d'un automne peu arrosé, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources se sont souvent maintenus à des valeurs basses.

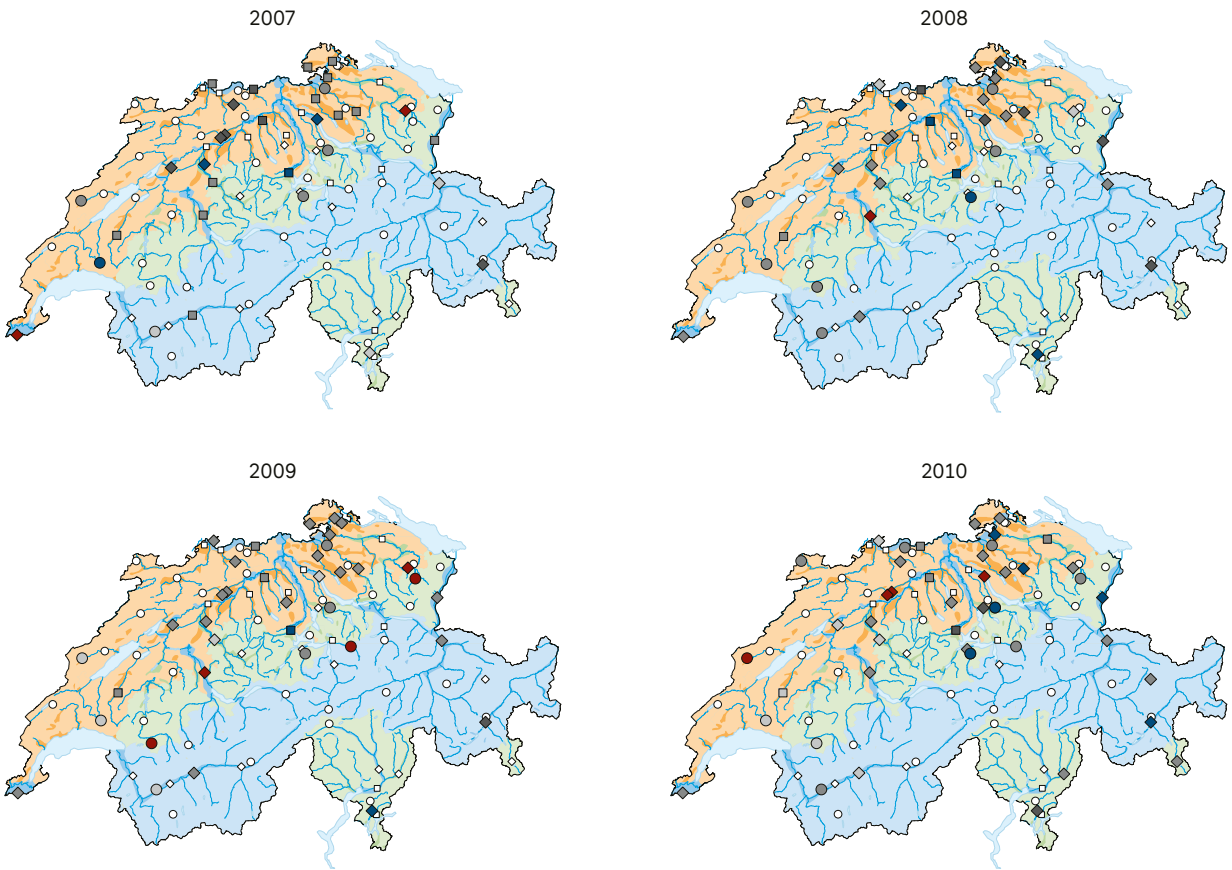
2012
Les précipitations supérieures à la moyenne du début de l'année ont dans l'ensemble permis d'obtenir des valeurs normales pour les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources, qui avaient atteint des valeurs basses fin 2011. Les précipitations élevées du second semestre ont encore augmenté les niveaux et les débits au nord des Alpes, région à régime pluvial ou pluvio-nival. En décembre, ces valeurs ont même par endroits atteint de nouveaux records.

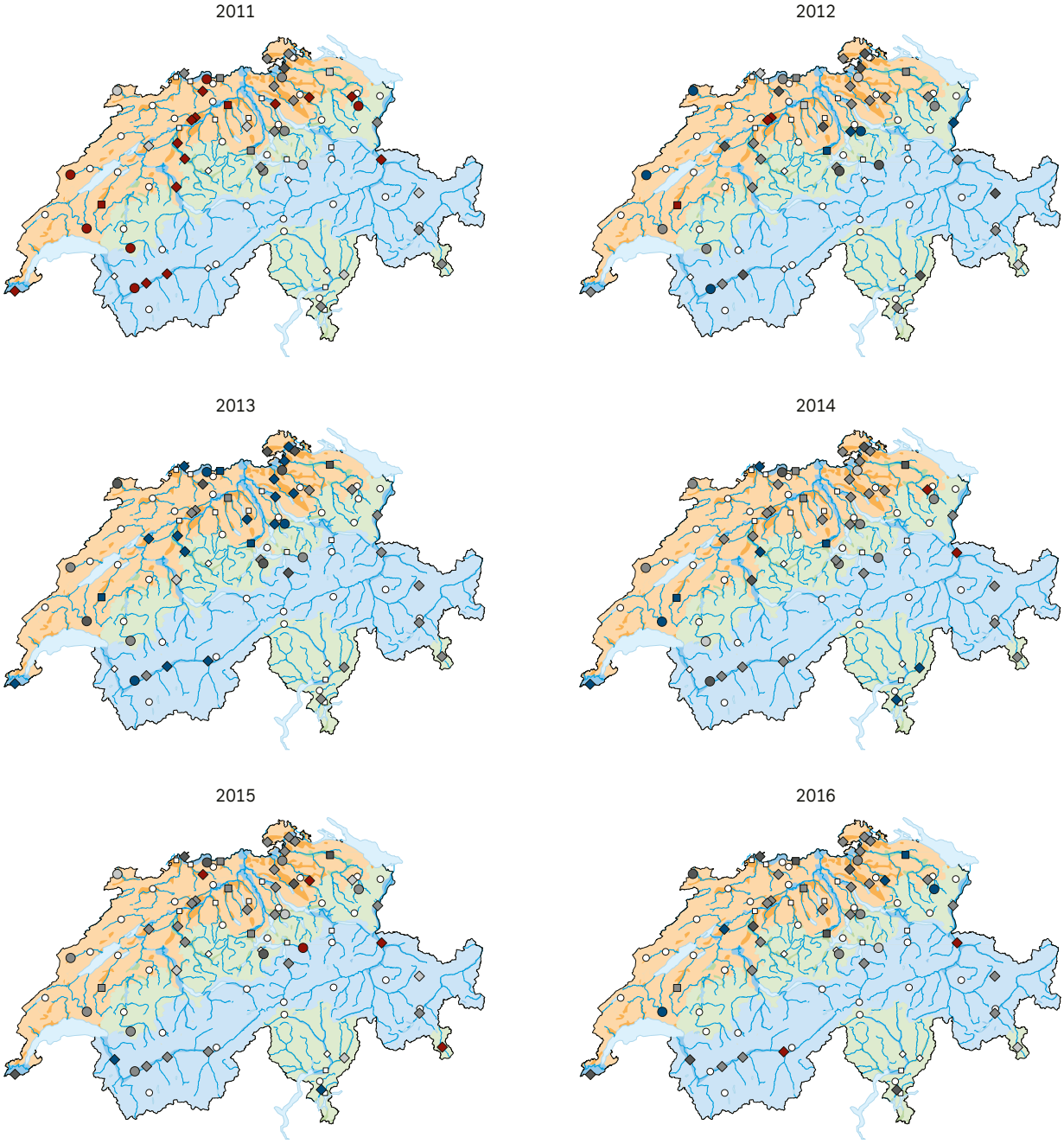
2013
S'ajoutant aux eaux de la fonte des neiges et des glaciers, les fortes précipitations de début juin ont intensifié l'infiltration le long des cours d'eau (Aar, Limmat, Reuss

Figure 5.2

Niveaux des eaux souterraines et débits des sources (2007 à 2016) ainsi que régime d'eaux souterraines

Moyenne annuelle par station de mesure NAQUA comparée à la moyenne des vingt années précédentes. Niveaux des eaux souterraines et débits des sources bas : < 10e centile ; inférieurs à la moyenne : centiles 10-25 ; moyens : centiles 25-75 ; supérieurs à la moyenne : centiles 75-90 ; élevés : > 90e centile.




2011
2012
2013
2014
2015
2016
Niveau des eaux souterraines/ débit des sources
élevé
supérieur à la moyenne
moyen
inférieur à la moyenne
bas
série de données incomplète
Station de mesure
Puits exploité
Piézomètre
Source
Régime d'eaux souterraines par région géographique
pluvial
pluvio-nival
nivo-glaciaire
dans le fond des vallées
pluvial
pluvio-nival
nivo-glaciaire

et haut Rhin), de sorte que les niveaux des eaux souterraines sont encore montés. En automne, les niveaux et les débits ont atteint des valeurs élevées dans le Jura et sur le Plateau sous l'effet de précipitations supérieures à la moyenne.

2014

Les précipitations correspondant à la moyenne, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont affiché des valeurs normales dans tout le pays. En juillet, de fortes précipitations ont temporairement augmenté les niveaux le long de l'Aar (régime nivo-glaciaire) et, sous l'effet des intempéries de novembre, les niveaux des eaux souterraines ont atteint de nouveaux records pour ce mois au Tessin (régime pluvio-nival).

2015

Les fortes précipitations tombées au début du mois de mai ont considérablement augmenté les niveaux des cours d'eau au nord des Alpes et dans l'ouest de la Suisse, de sorte qu'un volume d'eau plus important s'est infiltré dans les eaux souterraines à proximité. En raison de la période de sécheresse qui s'est installée à partir de mi-juillet, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont le plus souvent affiché des valeurs basses dans les petites vallées du Jura et du Plateau de même que dans les Préalpes. La canicule a toutefois intensifié la fonte des neiges et des glaciers, si bien que des volumes d'eau supérieurs à la moyenne se sont infiltrés dans les eaux souterraines le long des cours d'eau alpins.

2016

En raison des fortes précipitations enregistrées d'avril à juin, les niveaux d'eaux souterraines et les débits des sources ont affiché des valeurs élevées un peu partout. À partir de juillet, les précipitations sont ensuite restées faibles, de sorte que les niveaux et les débits n'ont cessé de s'abaisser dans le Jura (régime pluvial), dans les Alpes (régime nivo-glaciaire) et au Tessin (régime pluvio-nival). Fin décembre, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources enregistraient des valeurs basses dans une station de mesure sur trois.

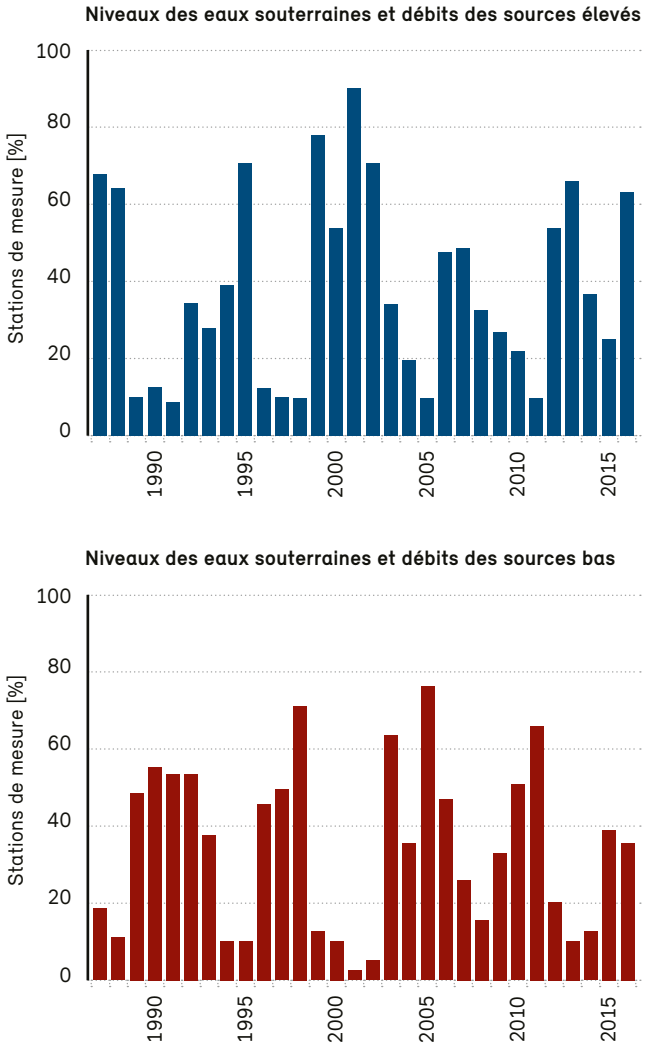
5.4 Évolution

Des variations pluriannuelles

Outre les fluctuations annuelles (régime d'eaux souterraines), le monitoring à long terme des niveaux des eaux souterraines et des débits des sources met en évidence de nettes variations pluriannuelles, qui présentent une certaine périodicité. Ces quatre dernières décennies, les eaux souterraines suisses ont ainsi connu à intervalles réguliers des périodes où leurs niveaux étaient soit bas, soit élevés.

Figure 5.3

Indicateurs de la quantité des eaux souterraines (1987 à 2016)



Niveaux des eaux souterraines et débits des sources élevés

Durant les années 1987/1988, 1995, 1999 à 2002, 2006/2007, 2012/2013 et 2016, l'indicateur « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources élevés » (fig. 5.3) a le plus souvent nettement dépassé 50 %. En d'autres termes, la plupart des stations de mesure ont alors enregistré des niveaux et des débits élevés pendant un nombre de jours supérieur à la moyenne. Des valeurs exceptionnellement élevées de cet indicateur ont été atteint lors de la crue de 1999, de l'excédent pluviométrique qui a persisté de 2000 à 2002 ainsi que des intempéries de 2013 et de 2016.

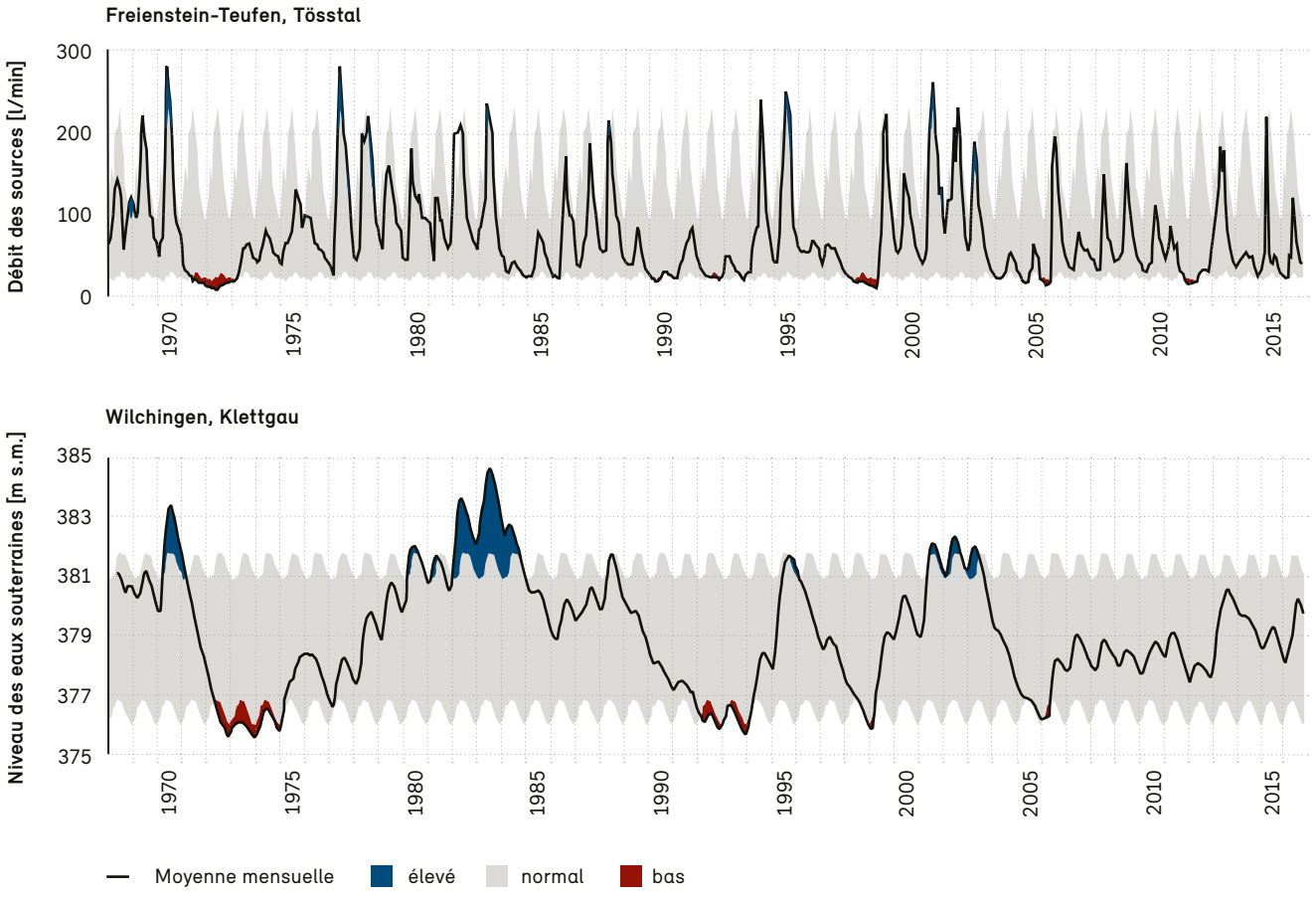
Niveaux des eaux souterraines et débits des sources bas

Au cours des années 1990-1992, 1997/1998, 2003, 2005 et 2010/2011, l'indicateur « Niveaux des eaux souterraines et débits des sources bas » (fig. 5.3) a dépassé 50 %. Autrement dit, la plupart des stations de mesure ont enregistré des niveaux et des débits bas pendant un nombre de jours supérieur à la moyenne. Cet indicateur a affiché des valeurs exceptionnellement élevées sous l'effet de la canicule de l'été 2003, des déficits de précipitations qui ont persisté de 2003 à 2005 (OFEFP/OFEG/MétéoSuisse 2004) et de la longue période de sécheresse en 2011.

Figure 5.4

Niveaux des eaux souterraines ou débits des sources (1968 à 2016) à une sélection de stations de mesure

Moyenne mensuelle par station de mesure NAQUA. Valeurs de référence : moyenne pluriannuelle (1968 à 2016) pour chaque mois. Niveaux des eaux souterraines ou débits des sources bas : < 10e centile ; normaux : centiles 10-90 (« domaine normal ») ; élevés : > 90e centile. Les deux stations se trouvent dans le nord-est de la Suisse (régime pluvial).



Phase de transition
Les périodes où les niveaux et les débits sont élevés ou bas, avec des valeurs extrêmes pour les deux indicateurs, sont souvent séparées par une phase de transition. Durant celle-ci, les niveaux et les débits n'affichent ni des valeurs extrêmement élevées ni extrêmement basses (conformément à la définition des indicateurs). À titre d'exemples de telles phases, mentionnons les années 1993/1994, 2004, 2008 et 2014.

Rôle des caractéristiques de l'aquifère
Selon les caractéristiques de l'aquifère, les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources peuvent afficher des valeurs plus ou moins marquées. Dans le cas d'aquifères qui réagissent rapidement à la recharge, c'est la variation annuelle, c'est-à-dire le régime d'eaux souterraines, qui prédomine, les tendances pluriannuelles ne jouant qu'un rôle secondaire. C'est ce que l'on observe notamment pour les sources situées dans des roches meubles, telles les alluvions de couverture de l'Irchel (station de « Freienstein-Teufen, Tösstal », fig. 5.4). À l'inverse, les eaux souterraines dans des roches meubles dotées d'une couche de couverture non saturée de forte épaisseur, à l'instar de celle de Klettgau, épaisse de 35 mètres (station de « Wilchingen, Klettgau », fig. 5.4), réagissent avec un décalage de quelques mois et les variations annuelles y sont atténuées. Dans ces aquifères, l'évolution à long terme est dominée par les périodes où les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources sont bas ou élevés, ces périodes interférant largement avec les variations saisonnières du régime d'eaux souterraines.

5.5 Analyse

L'évolution régulière naturelle sur l'année du niveau des eaux souterraines ou du débit de la source caractérise le régime de l'aquifère correspondant. De plus, les variations de ces paramètres présentent le plus souvent une périodicité pluriannuelle avec des phases persistantes de valeurs basses, normales et élevées.

Un volume stable
Les variations des niveaux des eaux souterraines ne représentent en général qu'une part très faible du volume total des eaux souterraines suisses (Sinreich et al. 2012). Dans les eaux souterraines productives des aquifères en roches meubles, les fluctuations naturelles des niveaux sont de l'ordre du centimètre ou du décimètre, alors que l'épaisseur totale de l'aquifère équivaut le plus souvent à plusieurs dizaines de mètres. De fortes variations des débits des sources, en particulier dans les aquifères karstiques, peuvent cependant témoigner d'une forte modification du taux de remplissage de tels aquifères. Les courbes récurrentes que suit l'évolution des niveaux des eaux souterraines et des débits des sources dans chacun des régimes d'eaux souterraines reflètent le renouvellement régulier et complet des ressources en eaux souterraines. Du point de vue quantitatif, il est possible d'affirmer que l'état de ces dernières reste stable, du moins dans un bilan pluriannuel.

Quantités suffisantes dans l'ensemble
Comme les aquifères suisses, le plus souvent proches de la surface, se réalimentant rapidement après une période de sécheresse, le pays dispose en général d'eau potable et d'eau industrielle en suffisance durant toute l'année. D'un point de vue purement quantitatif, le volume total prélevé dans les eaux souterraines suisses ne représente qu'une petite partie du volume théorique durablement exploitable (chap. 4). L'urbanisation croissante restreint cependant le volume des ressources effectivement accessibles. Dans les régions alimentées par des sources peu productives qui proviennent d'aquifères en roches meubles ou cohérentes situés en dehors des vallées du Plateau, du Jura et des Préalpes, les périodes de sécheresse engendrent régulièrement des pénuries d'eau locales et temporaires. La mise en réseau des services des eaux constitue un moyen de garantir l'approvisionnement en eau potable et industrielle même dans ces situations-là.

Changement climatique : impact plutôt modeste
Les études hydrologiques et climatologiques, comme CH2014 et le PNR 61 (2015), prévoient que des sécheresses estivales deviendront plus fréquentes à l'avenir, tandis que l'augmentation des précipitations et la hausse de la limite des chutes de neige devraient intensifier la réalimentation des eaux souterraines durant l'hiver. Ces études tendent par ailleurs à poser comme hypothèse que le changement climatique augmentera à long terme

la fréquence et l'intensité des fortes précipitations. En conséquence, les réservoirs qui réagissent rapidement, c'est-à-dire les aquifères karstiques et ceux en roches meubles proches de la surface, devraient assister plus souvent à des hausses soudaines des niveaux des eaux souterraines et des débits des sources. Selon les conclusions du projet CCHydro (OFEV 2012), les ressources en eau de la Suisse, réservoirs d'eaux souterraines compris, ne devraient pas subir de grand changement à l'avenir. Au niveau local, voire régional, un décalage saisonnier dans la répartition des précipitations et des débits pourrait cependant accroître la fréquence des problèmes d'approvisionnement.

6 Isotopes de l'eau

6.1 Bases

Isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène
Les isotopes sont des formes différentes d'un atome, dont les noyaux comptent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. Dans l'eau, l'hydrogène et l'oxygène possèdent chacun trois isotopes : les isotopes ^{1}H et ^{2}H *(deutérium)* de l'hydrogène et les isotopes ^{16}O, ^{17}O et ^{18}O de l'oxygène sont stables, c'est-à-dire qu'ils ne se décomposent pas. L'isotope ^{3}H de l'hydrogène *(tritium)* est instable et se désintègre avec une durée de demi-vie de 12,43 ans. Les isotopes légers ^{1}H et ^{16}O de la molécule d'eau sont nettement plus fréquents dans la nature que les isotopes lourds des mêmes atomes. Dans un échantillon, les analyses déterminent le rapport ($\delta^{2}H$) entre ^{1}H et ^{2}H, isotopes stables de l'hydrogène, et le rapport ($\delta^{18}O$) entre ^{16}O et ^{18}O, isotopes stables de l'oxygène, par rapport à un standard. Exprimés en pour mille négatifs, ces rapports sont appelés ci-après *deutérium* et *oxygène 18*.

Signature isotopique des précipitations
Étant donné que les molécules d'eau présentent des poids différents, les isotopes se séparent dans le cycle de l'eau. En effet, les molécules plus légères s'évaporent plus facilement de la surface de l'eau, tandis que les plus lourdes se condensent plus rapidement lors de la formation des précipitations. *Deutérium* et *oxygène 18* sont donc corrélés dans la molécule d'eau. Plus la température de l'air est élevée durant la condensation, plus les précipitations s'enrichissent de molécules lourdes de l'eau (effet de température). La signature isotopique des précipitations présente dès lors des variations annuelles similaires à celles de la température de l'air au moment des précipitations. Par ailleurs, comme la température de l'air diminue en général avec l'altitude, les précipitations deviennent plus pauvres en isotopes lourds lorsque l'altitude s'accroît (effet d'altitude).

Datation des eaux souterraines à l'aide du tritium
Sous l'effet du rayonnement cosmique, du *tritium* radioactif se forme naturellement en petites quantités dans l'atmosphère. Les essais d'armes nucléaires dans les années 1950 et 1960 en ont toutefois diffusé en abondance dans l'atmosphère et dès lors dans le cycle de l'eau. L'activité du *tritium* dans les précipitations étant consignée à l'échelle mondiale par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), il était possible de déterminer avec précision l'âge des eaux souterraines, soit le temps moyen de l'eau dans le sous-sol, en comparant l'activité du *tritium* mesurée dans les eaux souterraines avec celle dans les précipitations. Aucun essai nucléaire n'ayant été réalisé à la surface de la Terre depuis 1980, le *tritium* présent dans l'atmosphère s'est désintégré, de sorte que son activité dans les précipitations n'a cessé de diminuer et se rapproche de plus en plus de son niveau naturel.

Isotopes stables dans la pratique et la recherche
Les isotopes stables sont utilisés comme traceurs naturels, en particulier dans les études hydrogéologiques, hydrologiques et climatologiques. Dans le domaine hydrogéologique, le *deutérium* et l'*oxygène 18* servent surtout à déterminer l'altitude moyenne de bassins d'alimentation des eaux souterraines et à distinguer les différents composants des eaux souterraines et des cours d'eau (Etcheverry 2002).

OEaux : aucune exigence chiffrée
L'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) ne définit aucune exigence relative aux isotopes de l'eau. Les eaux souterraines doivent néanmoins, le cas échéant après un procédé de traitement simple, remplir les exigences de la législation sur les denrées alimentaires. Selon l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD), l'eau potable doit respecter une valeur indicative de 100 Bq/l pour le *tritium,* soit environ 840 UT (unités-tritium). L'OEaux renvoyant à l'OPBD, les valeurs maximales définies dans cette dernière sont considérées, dans le cadre de l'OEaux, comme des exigences chiffrées applicables aux eaux souterraines exploitées ou destinées à l'être.

Isotopes stables comme paramètres climatiques
L'AIEA a lancé en 1953 la mise en place d'un Réseau global des isotopes dans les précipitations (GNIP), afin d'observer la dynamique du cycle de l'eau à l'aide de ces

traceurs naturels. Le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les cours d'eau (GNIR) a vu le jour par la suite. Le Système national d'observation du climat (GCOS Suisse) utilise depuis 2007 les isotopes de l'eau comme variable climatique essentielle (MétéoSuisse 2018). Le module ISOT livre les données de référence de la Suisse au GNIP, au GNIR et au GCOS Suisse.

6.2 Relevé des données

Stations de mesure
L'institut de physique du climat et de l'environnement de l'Université de Berne a commencé à analyser les isotopes dans le cycle de l'eau de la Suisse dès les années 1960. En 1992, les stations de mesure représentatives des précipitations et des cours d'eau utilisées par l'établissement ont été reprises pour être intégrées dans l'Observation nationale des isotopes (aujourd'hui le module ISOT de NAQUA).

Deutérium et oxygène 18
Dans le cadre du module ISOT, le *deutérium* et l'*oxygène 18* sont aujourd'hui analysés à treize stations de mesure des précipitations et neuf stations de mesure des eaux de surface (chap. 3). Les analyses portent, pour les précipitations, sur des échantillons composites mensuels et, pour les cours d'eau, sur des échantillons composites sur quatre semaines proportionnels au débit de même que des échantillons prélevés tous les quinze jours. De plus, le *deutérium,* l'*oxygène 18* et le *tritium* ont été analysés jusqu'en 2009 à trois stations de mesure des eaux souterraines.

Arrêt des analyses de tritium en 2009
Les relevés du *tritium* entrepris dans le module ISOT ont pris fin en 2009, car les valeurs mesurées ne constituaient plus un moyen approprié pour déterminer l'âge des eaux souterraines. Dans le cadre du programme national de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) continue toutefois à analyser cet isotope de l'hydrogène (OFSP 2017).

Étude pilote de 2006 à 2013
Dans le cadre d'une étude pilote, le *deutérium* et l'*oxygène 18* ont été analysés entre 2006 et 2013 aux 50 stations de mesure des eaux souterraines du module TREND. Cette étude visait ainsi à décrire la dynamique de la recharge des eaux souterraines et les interactions entre celles-ci et les eaux de surface. À cet effet, deux à quatre échantillons ont été prélevés par année à chaque station.

Statistiques : valeurs moyennes et maximales
Les études statistiques des isotopes stables se basent sur les valeurs moyennes du *deutérium* et de l'*oxygène 18* de chaque station de mesure, celles du *tritium* radioactif sur les valeurs maximales de l'activité à la station étudiée. L'activité du *tritium* est exprimée en unités-*tritium* (UT). Le présent rapport analyse et fournit les données disponibles et validées du monitoring à long terme jusqu'à fin 2016 ainsi que les résultats de l'étude pilote « Isotopes de l'eau dans les eaux souterraines » (2006 à 2013).

6.3 État

Deutérium et oxygène 18 dans les précipitations
Aux stations de mesure des précipitations du Jura et du Plateau, les valeurs annuelles moyennes de 1980 à 2016 pour le *deutérium* et l'*oxygène 18* ont avoisiné –70 ‰ (δ^2H) et –10 ‰ ($\delta^{18}O$). Dans les Alpes (au Grimsel), elles se sont situées à environ –100 ‰ et à –13 ‰. Les valeurs les plus élevées ont été mesurées au sud des Alpes et dans le nord-est de la Suisse (fig. 6.1).

Deutérium et oxygène 18 dans les eaux souterraines
La répartition moyenne de *deutérium* et d'*oxygène 18* dans les eaux souterraines correspond dans l'ensemble aux moyennes régionales de ces isotopes dans les précipitations (fig. 6.1). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les régions de Bâle et de Genève ainsi qu'au Tessin, ces mesures signifiant que les eaux de ces régions tendent à s'enrichir d'isotopes lourds. Les résultats sont en général inférieurs dans le Jura et sur le Plateau. Les valeurs les plus basses de *deutérium* et d'*oxygène 18,* c'est-à-dire les eaux les plus pauvres en isotopes lourds ont été observées dans les Alpes (régime nivo-glaciaire). Aux stations de mesure des eaux souterraines proches des cours d'eau, le long de l'Aar et du Rhin

Figure 6.1

Deutérium et oxygène 18 dans les précipitations, les cours d'eau et les eaux souterraines (2013), ainsi que région géographique et régime des eaux souterraines dans le fond des vallées

Moyenne de δ^2H et de $\delta^{18}O$ par station de mesure NAQUA. Stations de mesure des précipitations et des eaux de surface du module ISOT, stations de mesure des eaux souterraines du module TREND.

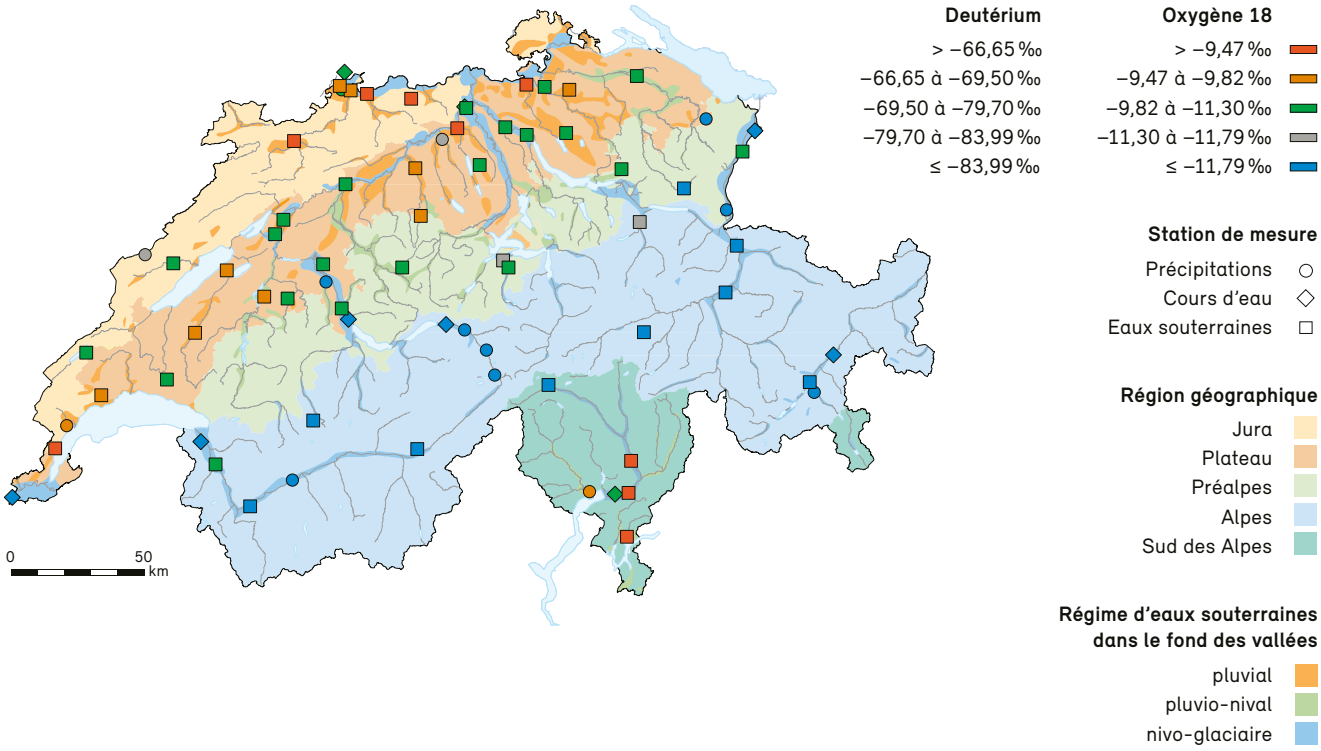
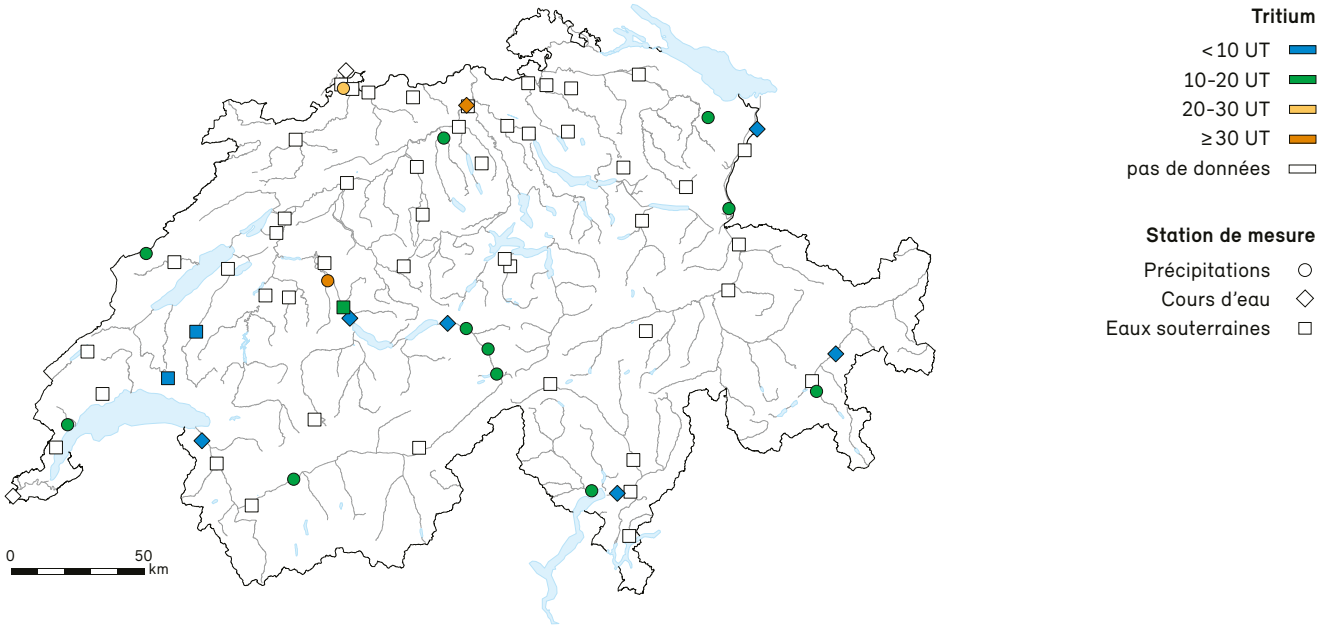


Figure 6.2

Tritium dans les précipitations, les cours d'eau et les eaux souterraines (2009)

Valeur maximale de l'activité du tritium par station de mesure NAQUA. Stations de mesure des précipitations et des eaux de surface du module ISOT, stations de mesure des eaux souterraines du module TREND.



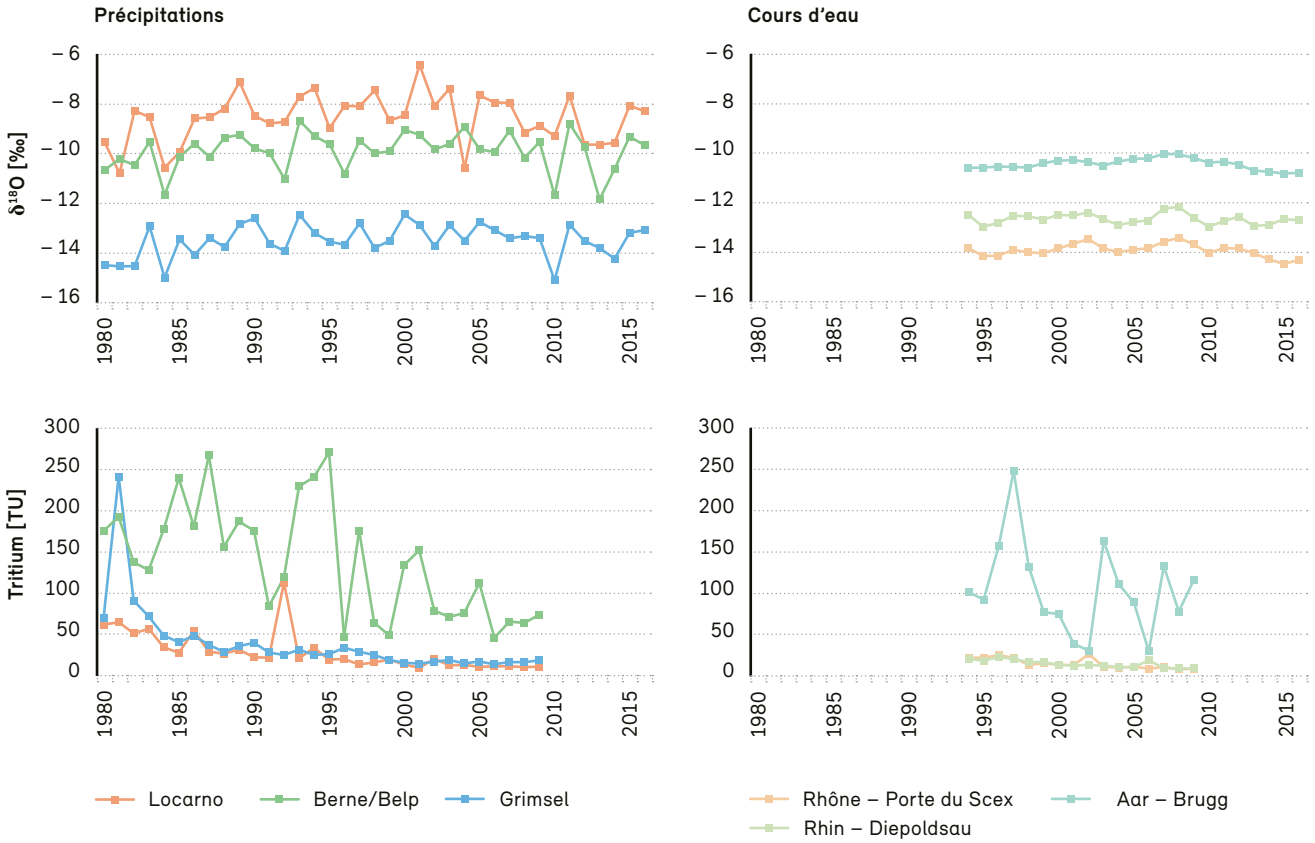
par exemple, les relevés ont parfois révélé des valeurs faibles pour les deux isotopes observés sur le Plateau. Le régime nivo-glaciaire est en effet importé par les cours d'eau jusque dans cette région et y est transmis par infiltration dans les eaux souterraines (chap. 5).

Tritium : valeurs légèrement accrues sur le Plateau
L'activité la plus faible du *tritium* (moins de 8 UT) a été mesurée en Haute-Engadine, au Tessin et en Bas-Valais (fig. 6.2). Elle était en général quelque peu plus élevée (entre 8 et 10 UT) dans les Alpes, les Préalpes et l'ouest de la Suisse. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les précipitations à Berne et à Vaduz (plus de 60 UT) ainsi que dans l'Aar près de Brugg (plus de 100 UT).

6.4 Évolution

Deutérium et oxygène 18 : valeurs hétérogènes
De 1980 à 2005 environ, les valeurs du *deutérium* et de l'*oxygène 18* ont affiché une tendance à la hausse dans toutes les stations de mesure ; aucune évolution uniforme n'est perceptible par la suite (fig. 6.3). Dans l'Aar et le Rhône, les valeurs de ces deux isotopes se sont aussi quelque peu accrues jusqu'en 2008, puis ont à nouveau diminué pour se situer en 2016 à un niveau inférieur à celui du début des relevés. À la station de mesure des eaux souterraines de Savigny, elles ont également affiché une légère tendance à la hausse entre 1996 et 2009, avant de reculer là aussi. Dans la plupart des stations de mesure des eaux souterraines analysées de 2006 à 2013 dans le cadre de l'étude pilote « Isotopes de l'eau dans les eaux souterraines », les valeurs du *deutérium* et de l'*oxygène 18* ont atteint leur maximum entre 2008 et 2010.

Figure 6.3
Oxygène 18 et tritium dans les précipitations et les cours d'eau à une sélection de stations de mesure (1980 à 2016)
Valeur moyenne de $\delta^{18}O$ et valeur maximale de l'activité du tritium, par station de mesure NAQUA et par an.



Tritium : tendance à la baisse
Entre 1980 et 2009, l'activité du *tritium* a diminué à toutes les stations de mesure des précipitations, passant de valeurs comprises entre 60 et 180 UT à des valeurs situées entre 10 et 70 UT (fig. 6.3). Durant toute la période de mesure allant de 1994 à 2009, l'activité de cet isotope a également reculé dans les stations de mesure des cours d'eau. Dans les eaux souterraines, où elle était déjà faible, elle a encore légèrement diminué entre 1996 et 2009.

6.5 Analyse

Isotopes stables de l'eau : traceurs naturels
Les signatures des isotopes dans les précipitations et les cours d'eau sont transférées vers les eaux souterraines lors de leur recharge et peuvent dès lors servir comme traceur naturel de ce processus. Le long des grands cours d'eau, l'infiltration des eaux de surface peut constituer une part considérable de la recharge. Les valeurs du *deutérium* et de l'*oxygène 18* dans les eaux souterraines diffèrent de celles mesurées dans les précipitations locales si le bassin versant du cours d'eau se situe à une altitude plus élevée. Sur la base de calcul du mélange des eaux, les valeurs de ces deux isotopes permettent de déterminer la part des eaux de surface dans la recharge d'un aquifère. Cette méthode a été utilisée pour caractériser les bassins d'alimentation des stations de mesure du module TREND.

Isotopes stables : variations atténuées dans les cours d'eau
Dans les cours d'eau, les valeurs du *deutérium* et de l'*oxygène 18* varient nettement moins au cours d'une année que dans les précipitations ; leurs variations sont en effet atténuées par le mélange d'eaux de différentes provenances et par la taille des bassins d'alimentation (fig. 6.3).

Tritium : nettement inférieure à la valeur de l'OPBD
L'activité du *tritium* observée jusqu'en 2009 dans les précipitations de même que dans les cours d'eau et les eaux souterraines est faible. Se situant entre 10 et 70 UT dans les précipitations et entre 10 et 140 UT dans les cours d'eau, elle s'avère considérablement inférieure à la valeur indicative de 100 Bq/l (soit environ 840 UT) fixée par l'OPBD pour l'eau potable.

Arrêt des essais nucléaires atmosphériques
Depuis l'arrêt des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, en 1980, le *tritium* présent dans l'air s'est désintégré, de sorte que son activité dans les précipitations, les cours d'eau et les eaux souterraines a diminué pour retrouver son niveau naturel (fig. 6.3). Des valeurs légèrement accrues au niveau local, voire régional, dans les précipitations (Berne et Vaduz) ou dans les cours d'eau (Aar à Brugg) sont à mettre sur le compte de *tritium* provenant de l'industrie (émissions des centrales nucléaires ou de la production de peintures luminescentes, p. ex. ; OFSP 2017).

7 Température des eaux souterraines

7.1 Bases

La température est l'une des caractéristiques essentielles des eaux souterraines de même qu'un facteur qui exerce une influence déterminante sur leur état hydrochimique et biologique. Elle a un impact sur la proportion d'oxygène dissous dans l'eau ainsi que sur le degré de minéralisation de l'eau. Une température accrue peut par ailleurs stimuler l'activité microbienne dans les eaux souterraines (Garnier 2012).

Facteurs d'influence
La température de l'eau dans les eaux souterraines proches de la surface du sol subit l'influence de la température de l'air. Dans les réservoirs aquifères alimentés par un cours d'eau, elle dépend aussi de la température des eaux d'infiltration. À partir de 30 à 50 m de profondeur, le rôle de la surface cesse d'être perceptible et ce sont surtout les flux géothermiques qui déterminent la température des eaux souterraines (Burger et al. 1985). Dans les zones urbanisées, elle subit de plus l'influence d'infrastructures, comme les sondes géothermiques, les installations de refroidissement ou de chauffage et les ouvrages souterrains (tunnels, sous-sols de bâtiments, conduites, etc.).

OEaux : caractéristiques proches de l'état naturel
Conformément aux objectifs écologiques pour les eaux souterraines, définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), la température des eaux souterraines doit présenter des caractéristiques proches de l'état naturel. Selon l'annexe 2, l'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température naturelle des eaux du sous-sol de plus de 3 °C, les fluctuations de température localement très limitées étant réservées.

7.2 Relevé des données

Relevés dans les modules QUANT et TREND
La température des eaux souterraines fait l'objet de relevés systématiques dans les modules QUANT et TREND (chap. 3). À cet effet, les stations de mesure de ces modules ont progressivement été équipées de sondes thermométriques depuis 1999. En 2016, la température a été mesurée en continu dans un total de 93 stations à intervalles de 5 minutes. L'observation est assurée par des sondes à plusieurs paramètres qui enregistrent simultanément la conductivité électrique et la température. Deux différents types d'appareils sont utilisés, qui présentent une résolution de 0,01 °C ou de 0,1 °C et une précision de ±0,2 °C.

Valeurs de référence
Le classement de la température des eaux souterraines dans l'évolution à long terme se fonde sur un domaine dit « normal ». Ce domaine correspond à la marge de fluctuation dans laquelle s'inscrira, selon la plus grande probabilité statistique, la température des eaux souterraines dans une station de mesure. Il englobe toutes les valeurs situées entre les centiles 10 et 90 des valeurs de référence. Les centiles sont toujours calculés à partir des moyennes mensuelles de la période de mesure considérée. Les températures des eaux souterraines sont dites élevées lorsqu'elles dépassent le domaine normal (et sont donc supérieures au 90^{e} centile), c'est-à-dire lorsque le résultat du relevé est compris dans les 10 % de valeurs les plus élevées enregistrées au cours de la période de mesure pour le mois considéré. À l'inverse, les températures des eaux souterraines sont dites basses lorsqu'elles se situent en deçà du domaine normal (et sont donc inférieures au 10^{e} centile), c'est-à-dire lorsque le résultat du relevé s'inscrit dans les 10 % des valeurs les plus basses enregistrées durant la période de mesure pour le mois en question.

Statistique : valeurs moyennes
L'évaluation statistique se fonde sur la moyenne mensuelle de la température des eaux souterraines par station de mesure, cette moyenne étant établie à partir des moyennes journalières. L'analyse de tendances pluriannuelles utilise les valeurs mesurées de 2000 à 2016, période pour laquelle des séries de données continues existent pour un total de 48 stations de mesure. Les séries

de données disponibles pour toutes les autres stations en service en 2016 portaient sur une période plus brève.

7.3 État

Variations annuelles caractéristiques

Dans les réservoirs d'eaux souterraines proches de la surface, la température a affiché des variations annuelles caractéristiques, avec un minimum en mars-avril et un maximum en septembre-octobre. Elle a atteint ses valeurs les plus basses et les plus élevées environ deux mois après la température de l'air. Des fluctuations annuelles ont été observées dans tous les types d'aquifères (en roches meubles, karstiques et fissurés) et dans tous les régimes d'eaux souterraines (pluvial, pluvio-nival et nivo-glaciaire). L'amplitude des variations diminue avec la profondeur et celles-ci n'étaient plus guère perceptibles au-delà de 30 m environ.

Variations maximales dans les roches meubles

Selon la station de mesure considérée, la température des eaux souterraines a varié dans une fourchette allant d'un à plusieurs degrés Celsius au cours de l'année 2016. Dans les roches meubles, où la température des eaux souterraines est mesurée dans des puits de pompage et des piézomètres, c'est-à-dire généralement dans la partie supérieure de l'aquifère, elle a affiché des variations nettement plus grandes que dans les stations situées dans les sources d'aquifères fissurés ou karstiques (fig. 7.1).

Altitude

Dans l'ensemble, la température moyenne des eaux souterraines s'est située entre 5 °C et 15 °C dans les différentes stations de mesure (fig. 7.1 et fig. 7.2). Conformément à l'altitude des bassins d'alimentation, les valeurs les plus basses (inférieures à 10 °C) ont été enregistrées dans le Jura et les Alpes. Sur le Plateau et au sud des Alpes, elles ont varié entre 10 et 13 °C. Les températures les plus élevées (supérieures à 13 °C) ont été relevées dans les centres urbains, comme Bâle et Zurich.

Figure 7.1

Température des eaux souterraines et sa variabilité (2016) dans les aquifères en roches meubles, fissurés et karstiques

Base : moyenne par station de mesure NAQUA et par mois. Les stations sont classées de gauche à droite par altitude ascendante.

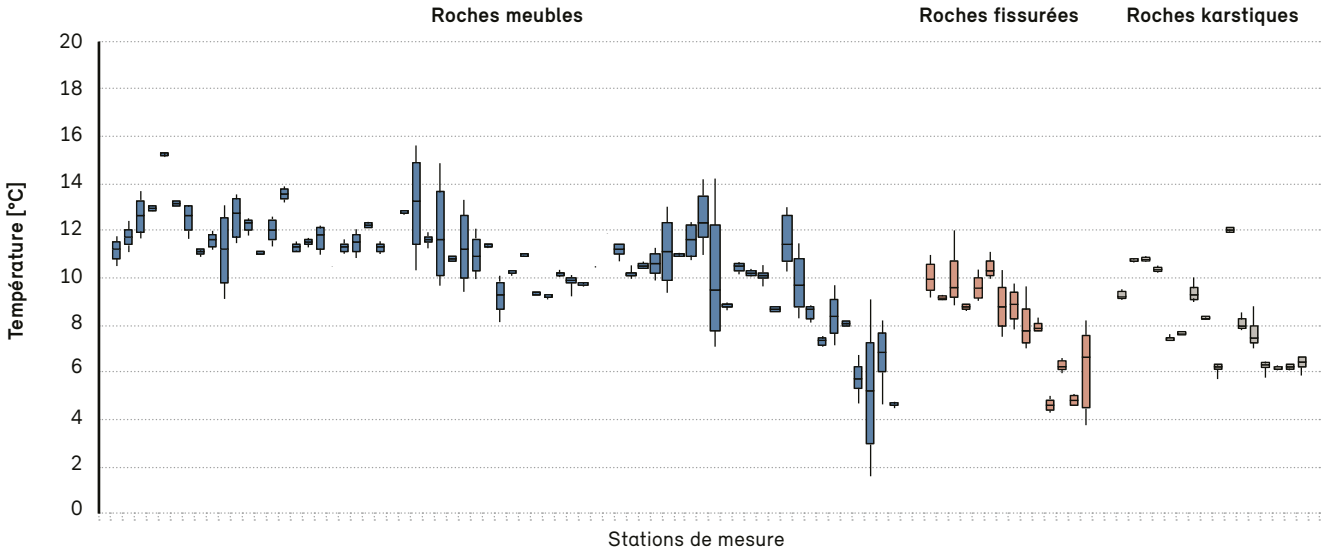
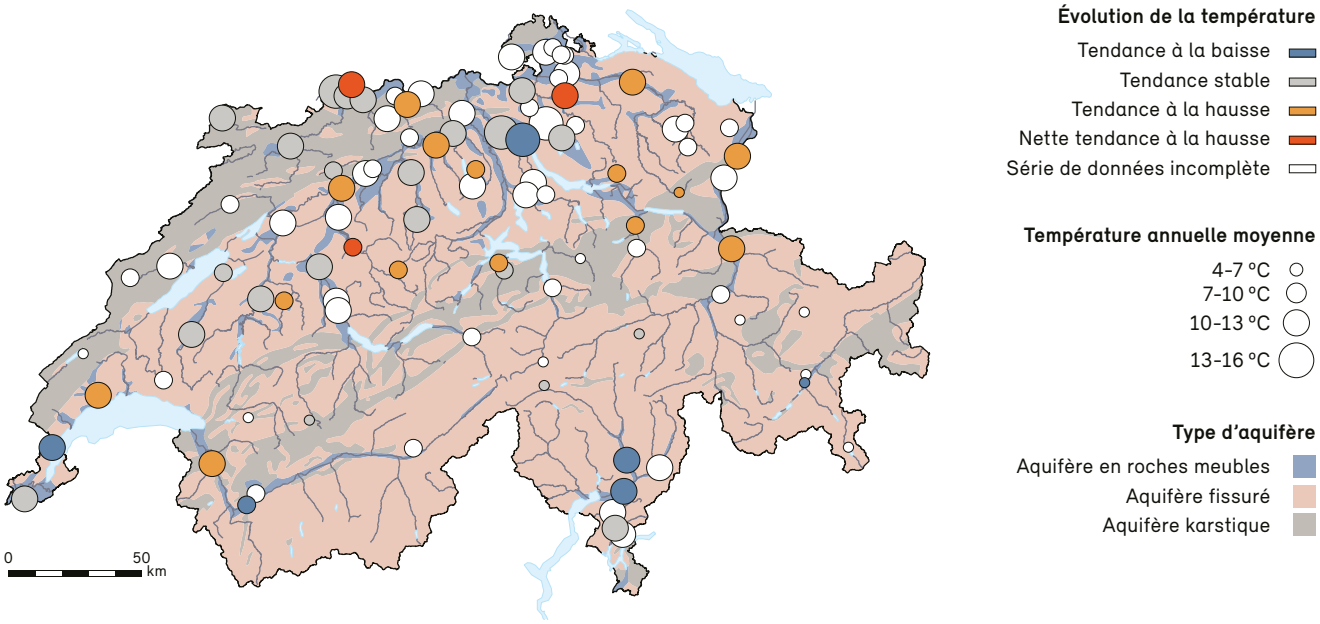


Figure 7.2

Température des eaux souterraines (2016), son évolution (2000 à 2016) et type d'aquifère

Moyenne par station de mesure NAQUA. Évolution de 2000 à 2016 : tendance à la baisse : ≤ –0,2 °C sur dix ans ; tendance stable : > –0,2 °C sur dix ans et < 0,2 °C sur dix ans ; tendance à la hausse : ≥ 0,2 °C sur dix ans et < 0,6 °C sur dix ans ; nette tendance à la hausse : ≥ 0,6 °C sur dix ans. Série de données incomplète : série de données couvrant moins de dix ans.



7.4 Évolution

Tendance : stable ou en légère hausse

Les stations de mesure ont été réparties dans quatre groupes selon la tendance (établie par calcul) que dénote la température annuelle moyenne sur une période de dix ans (fig. 7.2) :

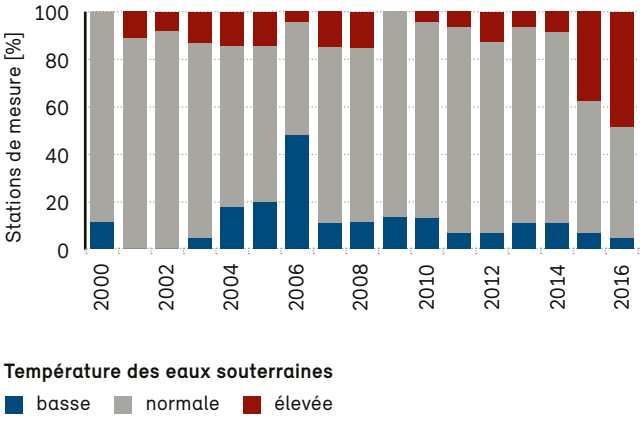
- tendance à la baisse : ≤ –0,2 °C sur dix ans ;
- tendance stable : > –0,2 °C sur dix ans et < 0,2 °C sur dix ans ;
- tendance à la hausse ≥ 0,2 °C sur dix ans et < 0,6 °C sur dix ans ;
- nette tendance à la hausse : ≥ 0,6 °C sur dix ans.

Dans 46 % des stations de mesure, la température des eaux souterraines est demeurée largement inchangée ces dix dernières années, c'est-à-dire qu'il n'a pas été possible de déceler une hausse ou une baisse significative à moyen terme. Elle a augmenté de plus de 0,2 °C sur dix ans dans 45 % des stations et diminué de plus de 0,2 °C sur dix ans dans 9 % des stations.

Figure 7.3

Température des eaux souterraines (2000 à 2016)

Base : moyenne par station de mesure NAQUA et par an comparée avec la moyenne pluriannuelle (2000 à 2016). Température des eaux souterraines basse : < 10e centile de la moyenne pluriannuelle ; normale : centiles 10-90 (domaine « normal ») ; élevée : > 90e centile. Ont uniquement été prises en compte les 48 stations de mesure où la température des eaux souterraines a fait l'objet de relevés complets durant la période considérée.



Variations d'une année à l'autre

Dans les différentes stations de mesure, les températures moyennes des eaux souterraines ont légèrement varié d'une année à l'autre. Par rapport à la période de référence (2006 à 2016), elles ont ainsi enregistré des valeurs basses, c'est-à-dire inférieures à la normale pluriannuelle, dans près d'une station sur cinq pour les années 2004/2005 et dans une station sur deux environ en 2006 (fig. 7.3). En 2015 et en 2016, les eaux souterraines ont affiché des températures élevées, donc supérieures à la normale pluriannuelle, dans au moins une station sur trois et, respectivement, dans une station sur deux.

Type d'aquifère

Selon le type d'aquifère, les températures des eaux souterraines mesurées dans les stations de mesure ont évolué différemment entre 2000 et 2016 (fig. 7.4). Dans environ 10 % des 36 stations situées dans un aquifère en roches meubles, ce paramètre a affiché une tendance à la baisse, dans 50 % une tendance stable, dans 30 % une tendance à la hausse et dans 10 % une nette tendance à la hausse. Ces pourcentages n'ont par ailleurs connu que des variations minimes entre janvier et décembre. Dans la plupart des cinq stations situées dans un aquifère fissuré et des sept stations dans un aquifère karstique, les températures sont demeurées inchangées. Une à deux des stations situées dans un aquifère fissuré et une à trois des stations situées dans un aquifère karstique ont enregistré une tendance à la hausse durant l'été.

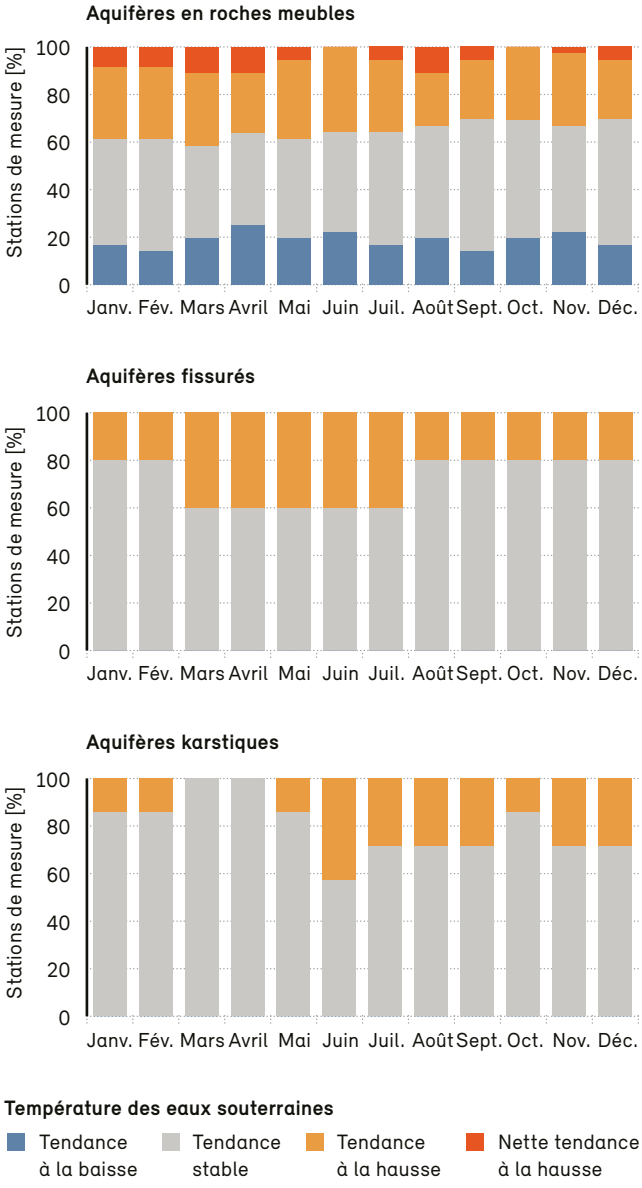
Régimes des eaux souterraines

Dans les aquifères en roches meubles, les tendances ont par ailleurs varié en fonction du régime des eaux souterraines. Entre 2000 et 2016, la température des eaux souterraines a plutôt suivi une tendance stable ou à la hausse dans les stations de mesure influencées par un cours d'eau dont le bassin versant se trouve dans le Jura ou sur le Plateau (régime pluvial) ou encore dans les Préalpes (régime pluvio-nival). Dans les aquifères en roches meubles alimentés par des cours d'eau alpins (régime nivo-glaciaire), la température des eaux souterraines a cependant aussi dénoté des tendances à la baisse (fig. 7.2).

Figure 7.4

Évolution à long terme des variations annuelles de la température des eaux souterraines (2000 à 2016) dans les aquifères en roches meubles, fissurés et karstiques

Base : moyenne par station de mesure NAQUA et par mois. Évolution de la température des eaux souterraines : tendance à la baisse : ≤ -0,2 °C sur dix ans ; tendance stable : > -0,2 °C sur dix ans et < 0,2 °C sur dix ans ; tendance à la hausse : ≥ 0,2 °C sur dix ans et < 0,6 °C sur dix ans ; nette tendance à la hausse : ≥ 0,6 °C sur dix ans. Ont été prises en compte les 48 stations de mesure où la température des eaux souterraines a fait l'objet de relevés annuels durant la période considérée. Nombre de stations de mesure par type d'aquifère : aquifère en roches meubles : 36 ; aquifère fissuré : 5 ; aquifère karstique : 7.



7.5 Analyse

Sites typiques
Sur la base des données disponibles, il s'avère impossible de soumettre la température des eaux souterraines et son évolution à une analyse statistiquement significative et représentative à l'échelle du pays. L'étude des sites typiques pour la Suisse permet néanmoins de mettre en évidence les facteurs d'influence naturels et anthropiques. Région géographique, altitude, climat, exposition, échanges entre eaux de surface et eaux souterraines, utilisation du sol et exploitation du sous-sol ont un impact sur la température des eaux souterraines proches de la surface.

Influences selon la région et l'utilisation
L'importance de chacun de ces facteurs varie selon les différentes régions de la Suisse. Sur le Plateau, les réservoirs aquifères alimentés par les cours d'eau se trouvent au fond des vallées, tout comme les centres urbains et les voies de communication. C'est donc là que l'influence anthropique sur la température des eaux souterraines est potentiellement la plus grande. La densité de la population est nettement plus faible dans le Jura et l'espace alpin. Le relief y est cependant plus accidenté et les conditions météorologiques dès lors plus extrêmes. Le sud des Alpes possède ses caractéristiques propres : des plaines occupées par des centres urbains et des voies de communication, un relief accidenté et des périodes de précipitations abondantes.

Altitude : facteur décisif
La moyenne pluriannuelle de la température des eaux souterraines dépend en premier lieu de l'altitude du bassin d'alimentation. Elle reflète par ailleurs la moyenne annuelle de la température de l'air de ce dernier. Les eaux souterraines affichant la température la plus basse (inférieure à 10 °C) se situent dans le Jura (altitude moyenne entre 500 et 1150 m) et dans les Alpes (800 à 1900 m). Sur le Plateau (500 à 850 m), leur température oscille entre 10 et 13 °C.

Influence notable des cours d'eau
Les eaux souterraines qui sont en contact assez direct avec la surface en raison de leurs caractéristiques hydrogéologiques, tels les aquifères en roches meubles reliés à un cours d'eau, sont en général plus sensibles aux influences externes que les aquifères isolés et plus profonds.

Influences anthropiques perceptibles
Dans certaines stations de mesure, surtout celles qui se situent dans les aquifères en roches meubles du fond des vallées, la température des eaux souterraines est accrue sous l'effet des activités anthropiques. Les températures élevées enregistrées dans les zones densément peuplées, comme la région bâloise, sont à mettre sur le compte des infrastructures et des constructions dans les eaux souterraines (Epting et al. 2017). D'autres influences directes propres aux zones urbaines peuvent toutefois produire un effet inverse ; c'est le cas notamment des prélèvements de chaleur opérés dans le cadre de l'exploitation géothermique du sous-sol.

Pas de hausse générale
Jusqu'ici, la température des eaux souterraines n'a pas enregistré de hausse significative et générale en Suisse, même si le changement climatique la laissait présager et qu'une telle hausse est perceptible en Autriche (Umweltbundesamt 2011). Ce constat n'exclut pas que la température des eaux souterraines suive par endroits une augmentation sur plusieurs années. Dans les aquifères soumis à un régime nivo-glaciaire, l'intensification de la fonte des glaciers due au climat peut même, à moyen terme, diminuer la température des eaux souterraines. C'est le cas lorsque l'eau provenant de la fonte abaisse la température des eaux de surface qui s'infiltrent dans le sous-sol. Vers la fin des années 1980, la température des eaux souterraines a par ailleurs affiché des hausses soudaines, car l'oscillation arctique et dès lors le climat d'une vaste portion de l'hémisphère Nord ont connu un changement abrupt (Figura et al. 2011). Or de tels phénomènes doivent également être pris en compte pour interpréter l'évolution de la température des eaux souterraines.

Valeur des longues séries de données

Les séries de données que NAQUA a réunies au fil des quinze dernières années ne suffisent toutefois pas encore pour tirer des conclusions probantes quant à l'éventuelle influence du changement climatique et d'autres facteurs anthropiques sur la température des eaux souterraines. Pour connaître l'impact de ces phénomènes à moyen et à long terme, il faut encore attendre les relevés des années à venir. La température des eaux souterraines continuera donc de faire partie intégrante de l'observation à long terme de NAQUA. En plus des données NAQUA, une collaboration avec la Société suisse d'hydrogéologie (SSH) a permis d'établir ponctuellement de longues séries de données sur la température des eaux souterraines auprès des communes et des services des eaux et de les stocker sous forme numérisée (Schürch et al. 2018).

Une grande précision des mesures est requise

Dans certaines stations de mesure, l'ampleur des variations annuelles de la température des eaux souterraines ou de son évolution sur le long terme a été inférieure à la marge d'erreur des sondes utilisées (±0,2 °C). Pour être à même de déceler même de faibles écarts de température, les nouvelles sondes doivent atteindre une précision de ±0,1 °C. Dans le cadre du renouvellement de l'équipement technique des réseaux de mesure hydrologique, les stations NAQUA seront donc dotées de nouvelles sondes.

8 Éléments majeurs

8.1 Bases

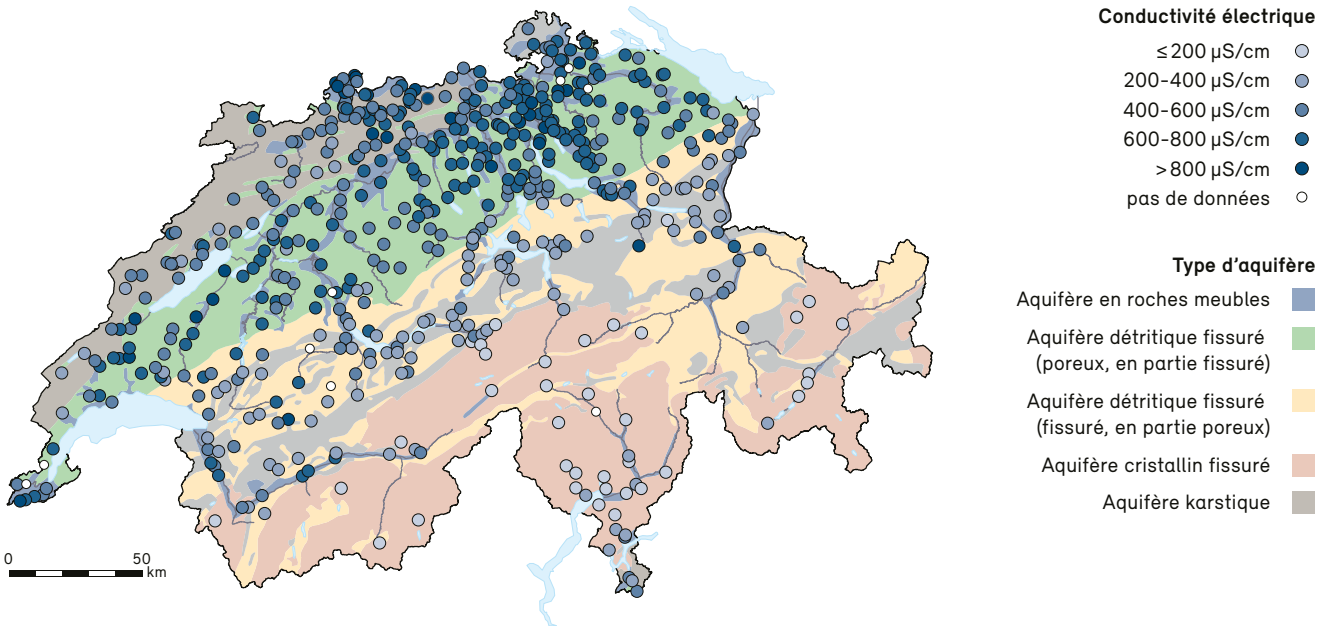
Milligramme par litre
Les éléments chimiques présents dans les eaux en concentrations de l'ordre du milligramme par litre sont appelés éléments majeurs. Ils comprennent en priorité les cations *calcium, magnésium, sodium et potassium,* les anions *bicarbonates, sulfates, chlorures* et *nitrates* (chap. 10) et le *silicium.*

Solubilité et temps de séjour
La concentration des différents éléments majeurs dans les eaux souterraines dépend des interactions de l'eau d'infiltration avec les particules du sol et la réaction des eaux souterraines avec la roche. De nombreux facteurs jouent ici un rôle déterminant, en particulier le type de roche, à savoir la solubilité des minéraux qui la constituent, et le temps de séjour de l'eau dans le sous-sol. Certains éléments majeurs peuvent en outre provenir de sources anthropiques, tels les engrais, le sel de déneigement, les eaux industrielles et domestiques ou encore les lixiviats de décharge.

Conductivité électrique selon la minéralisation
La conductivité électrique fournit une indication de la quantité de cations et d'anions dissous dans l'eau. Plus elle est élevée, plus la concentration d'ions est importante.

OEaux : 40 mg/l pour les sulfates et les chlorures
En ce qui concerne les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être, l'annexe 2 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) définit une exigence chiffrée de 40 mg/l pour les *sulfates* et les *chlorures ;* des exceptions étant admises en cas de conditions naturelles particulières. Les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004) définissent par ailleurs des valeurs indicatives pour d'autres éléments majeurs (*calcium, magnésium, sodium, potassium* et *acide silicique*), ces valeurs pouvant signaler une pollution anthropique problématique.

Figure 8.1
Conductivité électrique des eaux souterraines (2007 à 2014) et type d'aquifère
Moyenne par station de mesure NAQUA.



8.2 Relevé des données

Éléments majeurs dans le module TREND
Les différents éléments majeurs sont analysés depuis 1997 aux 50 stations de mesure du module TREND (chap. 3). De 2007 à 2014, deux à quatre échantillons ont été prélevés par an et par station. Depuis lors, les relevés sont en principes réalisés deux fois par année à ces stations de mesure.

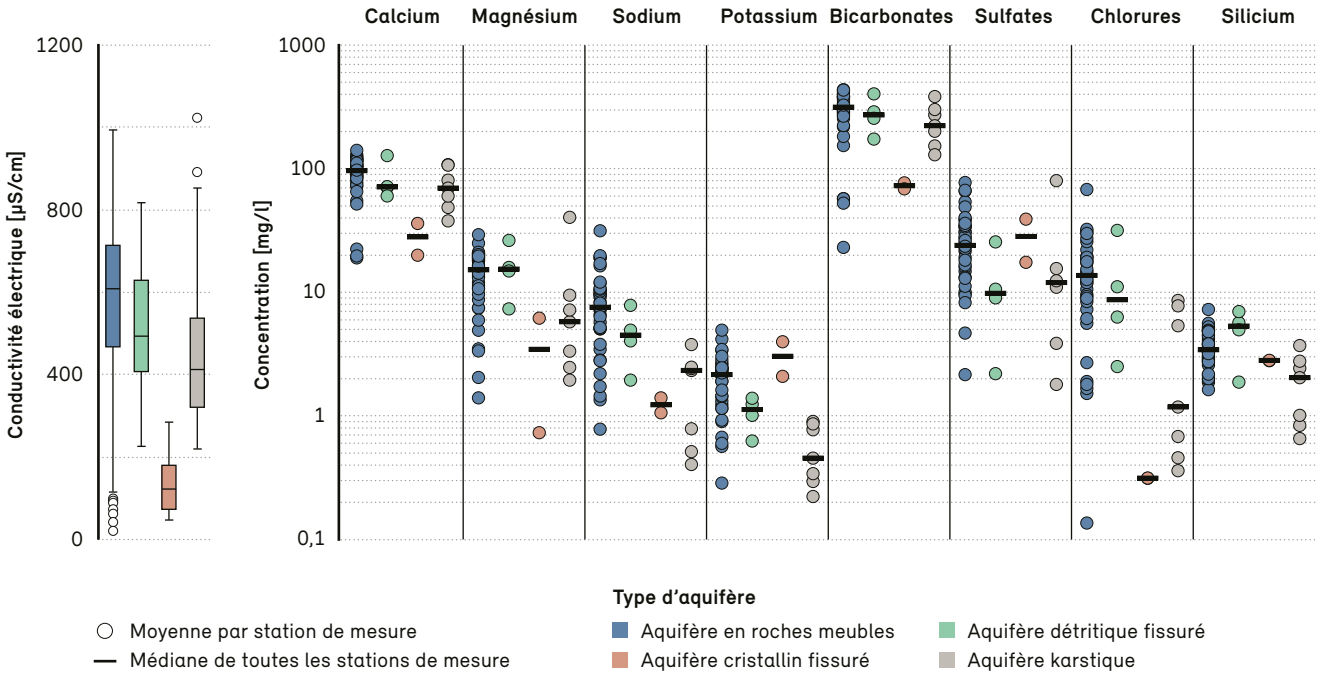
Conductivité : des données à l'échelle nationale
La conductivité électrique est mesurée aussi bien aux 50 stations de mesure du module TREND qu'aux presque 500 stations de mesure du module SPEZ. Pour toutes ces stations, elle est déterminée une à quatre fois par an sur place ou en laboratoire. Ce paramètre est de plus enregistré en continu, de manière automatique, aux stations du module TREND.

Statistiques : valeurs moyennes et maximales
Les études statistiques se fondent toujours sur la concentration moyenne des différents éléments majeurs par station de mesure pendant la période allant de 2007 à 2016. La conductivité électrique fait exception : ses analyses tiennent compte de la moyenne des données disponibles et validées jusqu'à fin 2014. Une comparaison avec l'exigence chiffrée de l'OEaux utilise les concentrations maximales par station de mesure au cours des années 2007 à 2016.

8.3 État

Conductivité électrique et types d'aquifères
Sur l'ensemble du pays, la conductivité électrique a varié entre 20 et 1020 µS/cm. Elle a affiché des valeurs faibles, c'est-à-dire inférieures à 200 µS/cm, dans les aquifères cristallins fissurés des Alpes et du sud des Alpes, des valeurs élevées, soit supérieures à 600 µS/cm, principalement dans les aquifères en roches meubles du Pla-

Figure 8.2
Conductivité électrique (2007 à 2014) et éléments majeurs (2007 à 2016) dans les eaux souterraines par rapport au type d'aquifère
Conductivité électrique moyenne et concentration moyenne des différents éléments majeurs par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par type d'aquifère : aquifères en roches meubles : 363 (conductivité électrique) et 37 (éléments majeurs) ; aquifères détritiques fissurés : 54 et 4 ; aquifères cristallins fissurés : 18 et 2 ; aquifères karstiques : 101 et 7.



teau (fig. 8.1 et fig. 8.2) et des valeurs en général entre 200 et 600 µS/cm dans les aquifères détritiques fissurés (grès molassiques et schistes lustrés, p. ex.) et dans les aquifères karstiques.

Éléments majeurs et types d'aquifères

Les concentrations de *calcium* et de *bicarbonates* se sont en général situées entre 10 et 400 mg/l, celles de *magnésium,* de *sodium,* de *sulfates* et de *chlorures* entre 0,1 et 100 mg/l et celles de *potassium* et de *silicium* sont restées inférieures à 10 mg/l (fig. 8.2). Le *calcium* et les *bicarbonates* ont atteint des concentrations élevées en particulier dans les aquifères en roches meubles, dans les aquifères détritiques fissurés ainsi que dans les aquifères karstiques (fig. 8.2). Outre ces deux composants minéraux, les aquifères détritiques fissurés présentaient également des concentrations de *magnésium* et de *silicium* aussi élevées que dans les aquifères en roches meubles.

Figure 8.3

Sulfates et chlorures dans les eaux souterraines (2016) par rapport à l'utilisation principale du sol

Concentration maximale de sulfates et de chlorures par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par type d'utilisation principale du sol : zones urbanisées et voie de communication : 11 ; grandes cultures : 20 ; autres : 19. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure.

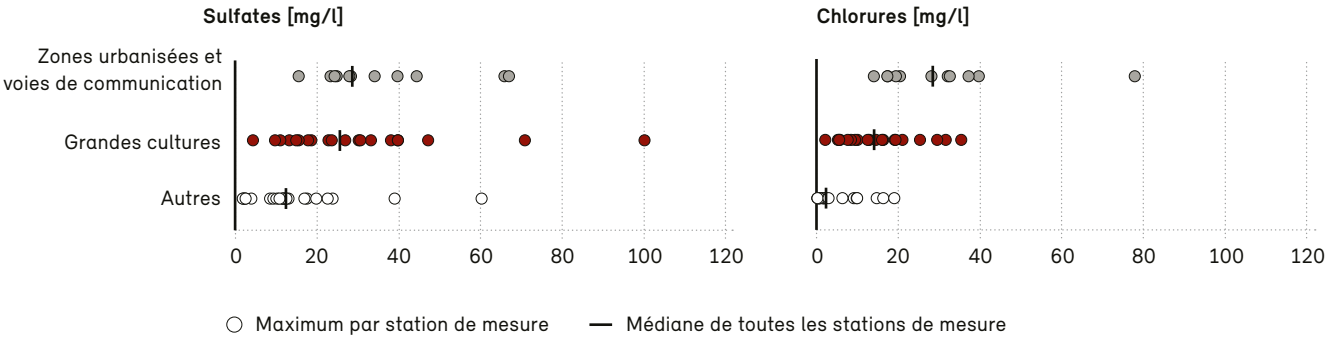


Tableau 8.1

Chlorures et sulfates dans les eaux souterraines (2007 à 2016) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux

Base : concentrations maximales de chlorures et de sulfates par station de mesure NAQUA et par an. 50 stations du module TREND (sauf en 2008 et en 2009 : 49 stations échantillonnées).

Éléments majeurs	Origine	Stations de mesure [nombre]										
		Concentration > 40 mg/l										
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2007-2016
Chlorures		1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	3
Sulfates	Total	12	12	8	10	10	12	12	8	9	7	15
	Surtout anthropiques	3	3	2	2	2	2	3	2	2	1	3
	Surtout géogènes	9	9	6	8	8	10	9	6	7	6	12

Exigence chiffrée de l'OEaux : 40 mg/l (sauf en cas de conditions naturelles)

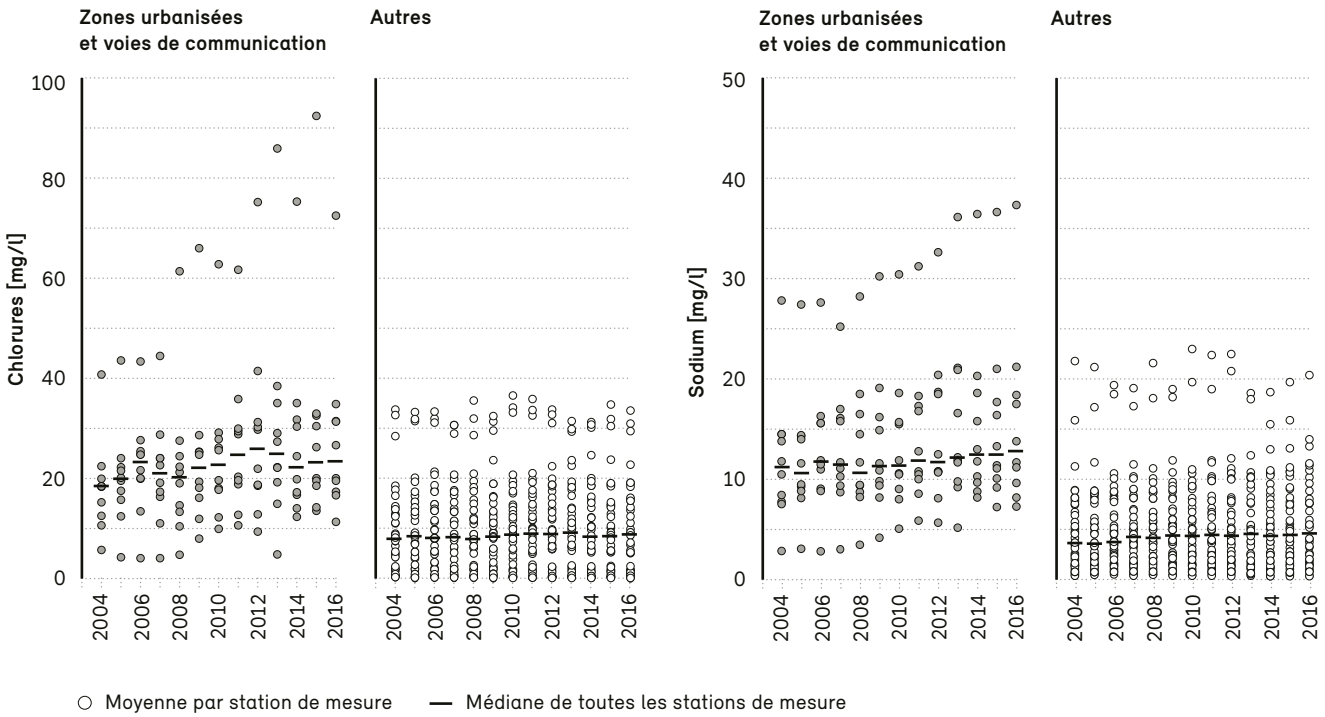
Sulfates et chlorures : dépassements isolés de l'OEaux
De 2007 à 2016, l'exigence chiffrée de 40 mg/l définie par l'OEaux pour les *sulfates* et les *chlorures* a été respectée à pratiquement toutes les stations de mesure : une valeur plus élevée n'a été enregistrée qu'à une seule station en 2016 (tab. 8.1). Les années précédentes, ces deux composés avaient dépassé l'exigence chiffrée à une voire à deux autres stations. De plus, des concentrations de *sulfates* supérieures à 40 mg/l ont été mesurées chaque année dans six à dix autres stations de mesure. Dans ces cas-là, les concentrations accrues étaient exclusivement ou en majeure partie d'origine naturelle, c'est-à-dire géogène, et ne constituaient donc pas des dépassements de l'exigence chiffrée de l'OEaux.

Sulfates et chlorures : valeurs accrues dans les zones urbanisées et les grandes cultures
Les concentrations moyennes de *sulfates* et de *chlorures* les plus élevées ont été enregistrées aux stations de mesure où l'utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation appartient à la catégorie « zones urbanisées et voies de communication » (fig. 8.3). Aux stations classées dans la catégorie « grandes cultures », les concentrations étaient dans l'ensemble également plus élevées qu'ailleurs.

8.4 Évolution

Chlorures et sodium : hausses dans les zones urbanisées
La conductivité électrique et la plupart des composés principaux ne dénotent pas de tendance significative à long terme. Cependant, les concentrations de *chlorures* et de *sodium* ont suivi au fil du temps une évolution clairement perceptible, surtout dans les zones urbanisées, la progression du *sodium* étant toutefois moins manifeste. Après avoir connu une légère hausse entre 2004 et 2006

Figure 8.4
Chlorures et sodium dans les eaux souterraines (2004 à 2016) par rapport à l'utilisation principale du sol
Concentration moyenne de chlorures et de sodium par station de mesure NAQUA et par an. Ont uniquement été prises en compte les stations qui ont fait l'objet d'au moins un prélèvement par an durant la période considérée. Nombre de stations par type d'utilisation principale du sol : zones urbanisées et voies de communication : 10 ; autres : 38. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure.



dans la plupart des stations de mesure dont l'utilisation principale du sol appartient à la catégorie « zones urbanisées et voies de communication », les concentrations de *chlorures* ont reculé en 2007 et en 2008, puis augmenté à nouveau jusqu'en 2012 pour diminuer de nouveau par la suite (fig. 8.4). Aux stations présentant une autre utilisation principale du sol, ces variations étaient très atténuées.

8.5 Analyse

8.5.1 Facteurs géogènes

Sites typiques

Selon le type d'aquifère et les spécificités géologiques, les eaux souterraines affichent des valeurs caractéristiques pour la conductivité électrique et leurs différents éléments majeurs (fig. 8.1 et fig. 8.2). Seules les données sur la conductivité électrique permettent cependant de procéder à une analyse statistique significative à l'échelle nationale. Compte tenu du faible nombre de stations de mesure, les résultats sont basés sur une analyse des sites individuels typiques des eaux souterraines en Suisse.

Aquifères en roches meubles

Dans les aquifères en roches meubles, les concentrations des éléments majeurs et donc la conductivité électrique des eaux souterraines sont relativement élevées. Ces valeurs s'expliquent, d'une part, par la faible vitesse d'écoulement, celle-ci augmentant le temps de séjour de l'eau dans la roche, ainsi que par la grande surface de contact entre l'eau et cette dernière (chap. 4). D'autre part, les roches meubles, surtout celles du Plateau, sont riches en carbonates et dès lors en général bien solubles. Par ailleurs, la majorité de ces aquifères se trouvent en basse altitude, où la température des eaux souterraines (chap. 7) et l'activité microbienne dans des sols bien développés sont assez élevées. Dans ces conditions, les eaux d'infiltration contiennent une concentration accrue de dioxyde de carbone et accélèrent ainsi la dissolution des carbonates dans les eaux souterraines. Si l'aquifère en roches meubles est au contraire principalement formé de roches cristallines peu solubles, comme dans la vallée de la Léventine, au Tessin, les eaux souterraines affichent des concentrations d'éléments majeurs et une conductivité électrique plus faibles. Aux stations de mesure proches d'un cours d'eau, l'infiltration d'eau peu minéralisée diminue en général la conductivité électrique des eaux souterraines.

Aquifères cristallins fissurés

Dans les aquifères cristallins fissurés, les eaux souterraines affichent les concentrations les plus basses d'éléments majeurs ainsi que la conductivité électrique la plus faible. Ce constat est d'une part imputable au fait que de tels aquifères sont essentiellement formés de roches cristallines peu solubles et que les eaux souterraines s'y écoulent relativement rapidement en suivant un réseau de fissures (chap. 4). D'autre part, compte tenu de l'altitude assez élevée (> 1200 m), la température des eaux souterraines est plus basse, d'où une minéralisation plus faible des eaux.

Aquifères détritiques fissurés

Dans les aquifères détritiques fissurés très poreux, tels les grès molassiques, les eaux souterraines affichent une conductivité électrique nettement plus élevée que dans les aquifères cristallins fissurés. Si l'eau circule rapidement dans les fissures, elle s'écoule lentement dans les pores du grès (chap. 4). Une plus grande surface de contact et un temps de séjour plus long favorisent la dissolution des minéraux contenus dans la roche. Étant donné que ces roches renferment le plus souvent une forte concentration en carbonates et en silicates, les eaux souterraines enregistrent des concentrations aussi élevées de *calcium,* de *magnésium,* de *bicarbonates* et de *silicium* que celles des aquifères en roches meubles.

Aquifères karstiques

Les aquifères karstiques sont formés de roches carbonatées et évaporitiques, comme le calcaire, la dolomie ou le gypse / l'anhydrite. Leurs eaux souterraines contiennent par conséquent une forte proportion de *calcium* et de *bicarbonates* ou de *sulfates.* Étant donné qu'une bonne partie de l'eau ne reste que très brièvement dans le sous-sol karstique (chap. 4) et du fait de la composition de la roche, la concentration d'éléments majeurs dans les eaux souterraines – à l'exception du *calcium* et des *bicarbonates* – est relativement faible, malgré leur bonne solubilité. La conductibilité électrique, quant à elle, est moyenne.

8.5.2 Facteurs anthropiques

Pour la grande majorité des stations de mesures, la concentration des éléments majeurs est déterminée par la roche qui forme le sous-sol (facteur géogène). Seules quatre des 50 stations ont affiché de 2007 à 2016 des concentrations accrues de *sulfates* et/ou de *chlorures,* dont la présence est avant tout à mettre sur le compte d'activités humaines.

Sources de sulfates : engrais, canalisations, décharges

Les trois stations de mesure où la concentration de *sulfates* a dépassé au moins une fois l'exigence chiffrée de l'OEaux (40 mg/l) entre 2007 et 2016 sont situées dans une zone soit agricole soit urbanisée. Voici les sources anthropiques potentielles de *sulfates :* engrais minéraux contenant du soufre, fuites dans le réseau d'égouts, décharges et remblais comprenant une forte proportion de déchets de chantier.

Source de chlorures : sel de déneigement

Les *chlorures* d'origine anthropique parviennent dans les eaux souterraines principalement en hiver, lorsque l'eau de chaussée contenant du sel de déneigement dissous s'infiltre dans le sous-sol. Aux stations de mesure des zones urbanisées, l'évolution de la concentration de *chlorures* (fig. 8.4) correspond largement aux moyennes annuelles des températures et aux ventes de sel de déneigement (Salines suisses 2017) : un hiver froid implique toujours une consommation accrue de sel de déneigement et coïncide avec une hausse de la concentration de *chlorures* dans les eaux souterraines. Le *chlorure* étant presque entièrement lessivé dans le sol et parvenant par conséquent presque sans entrave jusque dans les eaux souterraines, le *sodium* est en partie retenu dans la zone non saturée. Les concentrations de *sodium* varient donc moins que celles de *chlorures.*

8.5.3 Perspectives

Étude pilote « Éléments majeurs » 2018/2019

Afin d'améliorer la base de données sur les éléments majeurs, jusqu'ici peu significative du point de vue statistique, une étude pilote est menée en 2018 et 2019 aux quelque 500 stations de mesure du module SPEZ.

9 Éléments traces

9.1 Bases

Nanogramme et microgramme par litre
Les éléments chimiques présents naturellement en concentrations très faibles dans la croûte terrestre sont appelés éléments traces. Leur concentration dans les eaux souterraines est de l'ordre du nanogramme par litre (ng/l) ou du microgramme par litre (µg/l).

Sources principalement géogènes
Les éléments traces parviennent principalement dans les eaux souterraines avec l'érosion des roches. Comme ces éléments entrent de plus dans la composition de nombreux produits d'usage courant, leur apport dans l'environnement peut également être d'origine anthropique. Voici leurs sources et leurs voies d'apport dans les eaux souterraines : infiltration de cours d'eau contenant des eaux usées traitées ou des eaux provenant de déversoirs d'orage, épandage d'engrais de ferme et minéraux de même que, de manière ponctuelle, canalisations défectueuses, sites contaminés et décharges. Quelques éléments traces peuvent par ailleurs parvenir dans le sous-sol avec les eaux des précipitations qui s'écoulent sur les toits, les places et les routes, en particulier lorsqu'elles s'infiltrent par le biais d'installations dépourvues d'une couche de sol filtrante.

Valeurs indicatives
L'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) ne prévoit pas d'exigence chiffrée spécifique pour les éléments traces dans les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. Ces eaux doivent cependant, le cas échéant après un procédé de traitement simple, remplir les exigences de la législation sur les denrées alimentaires. Les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004 ; ci-après aussi Instructions pratiques) contiennent des valeurs indicatives pour un certain nombre d'éléments traces (tab. 9.1) dont le dépassement pourrait entraîner une pollution problématique d'origine anthropique. Les valeurs accrues dues à des conditions naturelles particulières (facteurs géogènes) ne constituent toutefois pas des dépassements. L'*antimoine* et l'*uranium*, non mentionnés dans les Instructions pratiques, sont régis par l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) : leur concentration dans l'eau potable ne doit pas dépasser 5 µg/l et, respectivement, de 30 µg/l. Puisque l'OEaux renvoie à l'OPBD, toutes les valeurs maximales de cette dernière équivalent à des exigences chiffrées de l'OEaux pour les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être.

9.2 Relevé des données

Éléments traces dans le module TREND
Les éléments traces font l'objet d'analyses depuis 1997 aux 50 stations de mesure du module TREND (chap. 3). À cet effet, un échantillon a été prélevé par année à chaque station de 2007 à 2014 (tab. 9.1). Depuis, ces éléments ne sont analysés que tous les quatre ans. Leur limite de quantification se situe entre 0,2 et 10 µg/l.

Trois études pilotes
Entre 2006 et 2012, trois études pilotes ont par ailleurs été consacrées aux éléments traces enregistrés aux 50 stations de mesure du module TREND. Pour ces études, la limite de quantification a été fixée à un niveau inférieur (jusqu'à deux unités plus bas) que dans le monitoring à long terme. Ces études ont de plus analysé des éléments traces qui n'avaient pas encore fait l'objet de travaux dans le cadre du module TREND (tab. 9.1). L'étude pilote « Antimoine » (2006/2007) a porté sur une analyse ponctuelle de cet élément et de douze autres éléments traces à chaque station. Les études pilotes « Éléments traces » (2007/2008) et « Radioactivité naturelle et éléments traces » (2012) ont prélevé deux échantillons à chaque station afin d'analyser une vingtaine d'éléments traces.

Tableau 9.1

Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014)

Base : concentration maximale de chaque élément trace par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND (sauf pour le zinc : 48 stations). Monitoring à long terme et études pilotes.

Élément trace		Monitoring à long terme		Étude pilote			Limite de quantification	Stations de mesure [nombre]				Valeur indicative*
									Concentration			
		Début	Fin	2006/2007	2007/2008	2012	[µg/l]	Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> Valeur indicative*	[µg/l]
Métaux alcalins et alcalino-terreux												
Baryum	$_{56}$Ba	1997		–	x	–	0,2-10	50	–	50	–	500***
Béryllium	$_{4}$Be	1997		–	–	–	1	50	50	–	/	/
Lithium	$_{3}$Li	1997		–	x	x	0,0001-1	50	–	50	/	/
Strontium	$_{38}$Sr	1997		–	–	–	10	50	–	50	/	/
Métaux (de transition)												
Cadmium	$_{48}$Cd	1997		x	x	x	0,005-0,2	50	18	32	2	0,05**
Chrome	$_{24}$Cr	1997		x	x	–	0,07-0,1	50	1	49	4	2
Cobalt	$_{27}$Co	1997		x	x	x	0,01-1	50	–	50	/	/
Cuivre	$_{29}$Cu	1997		x	x	x	0,01-2	50	–	50	12	2**
Étain	$_{50}$Sn	1997	1998	x	x	x	0,01-0,2	50	47	3	/	/
Gallium	$_{31}$Ga	–		–	–	x	0,002	50	5	45	/	/
Molybdène	$_{42}$Mo	1997	2000	x	–	–	0,01	50	–	50	/	/
Nickel	$_{28}$Ni	1997		–	x	x	0,09-1	50	1	49	–	5**
Plomb	$_{82}$Pb	1997		x	x	x	0,01-2	50	10	40	2	1**
Scandium	$_{21}$Sc	–		–	x	–	0,06	50	48	2	/	/
Thallium	$_{81}$Tl	1997	2000	–	x	–	0,07	50	49	1	/	/
Thorium	$_{90}$Th	–		–	–	x	0,001	50	24	26	/	/
Titane	$_{22}$Ti	1997		–	–	–	1	50	50	–	/	/
Vanadium	$_{23}$V	1997	1999	x	x	–	0,01-0,09	50	–	50	/	/
Yttrium	$_{39}$Y	–		–	x	x	0,001-0,08	50	–	50	/	/
Zinc	$_{30}$Zn	1997		x	x	x	0,01-1	48	–	48	15	5**
Semi-métaux												
Antimoine	$_{51}$Sb	–		x	x	–	0,005-0,06	50	–	50	/	/
Arsenic	$_{33}$As	1997		x	x	x	0,01-0,5	50	–	50	1	5
Sélénium	$_{34}$Se	1997		x	x	x	0,01-1	50	–	50	–	5
Lanthanides												
Cérium	$_{58}$Ce	–		–	x	x	0,002-0,02	50	14	36	/	/
Lanthane	$_{57}$La	–		–	x	x	0,001-0,01	50	–	50	/	/
Actinides												
Uranium	$_{92}$U	–		x	x	x	0,001-0,05	50	–	50	/	/
Halogènes												
Fluorure	$_{9}$F^{-}	1997		–	–	–	0,01	50	–	50	–	500***

LQ limite de quantification
* Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004)
** sous forme dissoute
*** valeur supérieure à une situation proche de l'état naturel
/ absence de valeur indicative

Assurance qualité de l'échantillonnage
Pour éviter une contamination des échantillons par les substances employées dans les captages d'eau, les échantillons destinés à l'analyse des éléments traces ont si possible été prélevés à l'aide d'une pompe spéciale directement dans le puits de pompage. Les données de deux stations de mesure où l'échantillonnage n'a pas pu être opéré de cette manière et dont les résultats ont pu être faussés par des installations galvanisées ont été exclues de l'analyse statistique des relevés concernant le zinc.

Statistiques : concentrations maximales
Les analyses statistiques se fondent toujours sur la concentration maximale des différents éléments traces par station de mesure. Sont présentées ici les données disponibles et validées du monitoring à long terme jusqu'à fin 2014 ainsi que les résultats des études pilotes.

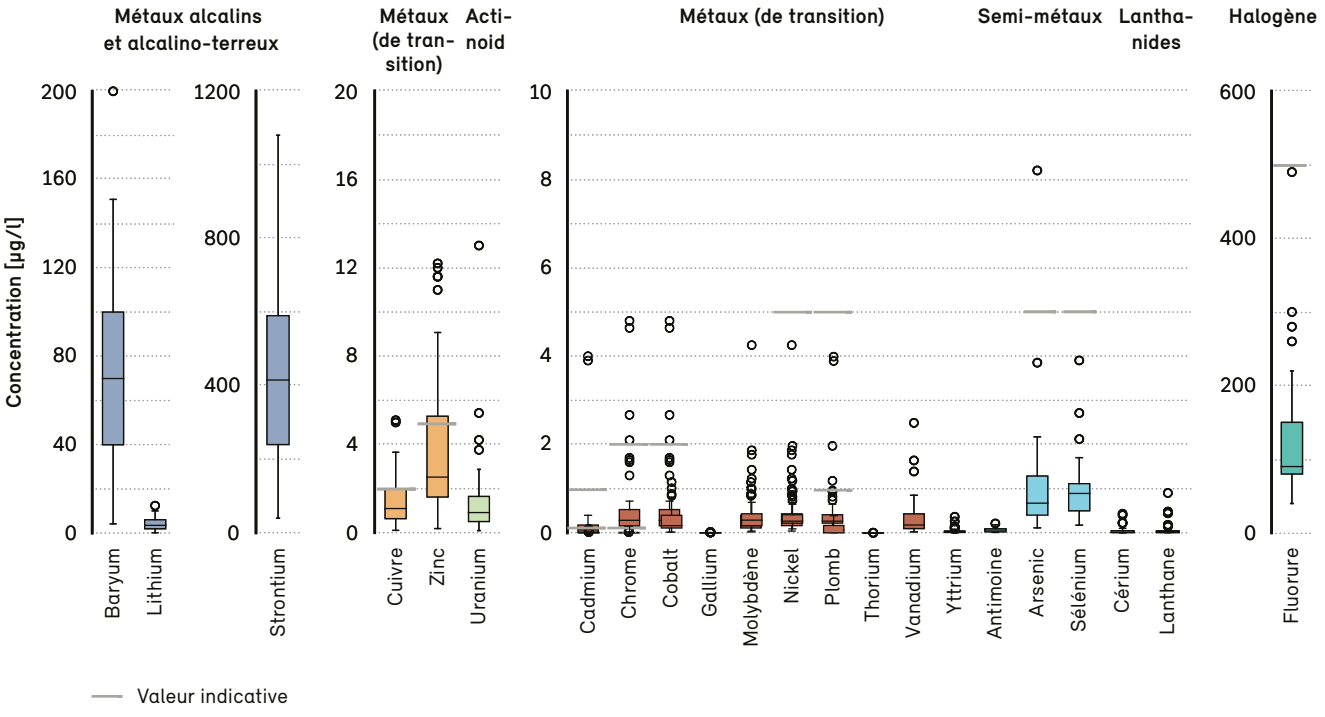
9.3 État

Valeurs indicatives dépassées par le zinc et le cuivre
Entre 2006 et 2014, six éléments traces ont chacun dépassé une fois au moins les valeurs indicatives des Instructions pratiques. Ces dépassements sont le plus souvent dus aux concentrations de *zinc* (quinze stations de mesure) et de *cuivre* (douze stations de mesure). Le *chrome* a dépassé la valeur indicative à quatre stations, le *cadmium* et le *plomb* chacun à deux stations et l'*arsenic* à une station (tab. 9.1 et fig. 9.1). Dans plus de la moitié des stations concernées cependant, les dépassements recensés durant cette période n'ont été enregistrés que dans un seul échantillon. Le *baryum,* le *nickel,* le *sélénium* et le *fluorure* n'ont jamais dépassé la valeur indicative des Instructions pratiques.

Figure 9.1

Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014)

Concentration maximale de chaque élément trace par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND (sauf pour le zinc : 48 stations). La figure représente les éléments traces qui ont été détectés à plus de 50 % des stations. Si un élément trace n'a pas été décelé à une station, celle-ci est néanmoins prise en compte au moyen de la limite de quantification correspondante. Valeur indicative : selon les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004).



Antimoine et uranium : en deçà de la valeur de l'OPBD
À toutes les stations de mesure, la concentration d'*antimoine* est restée inférieure à 0,25 µg/l, donc nettement en dessous de la valeur maximale de l'OPBD (fixée à 5 µg/l). L'*uranium* n'a pas non plus dépassé la valeur maximale de l'OPBD (30 µg/l) ; il a le plus souvent affiché une concentration inférieure à 3 µg/l. Les autres éléments traces n'ont pas non plus dépassé leur valeur maximale selon l'OPBD.

Chrome : légèrement accru sur le Plateau occidental
Alors que le *cuivre* et le *zinc* dépassaient les valeurs indicatives dans tout le pays, en particulier aux puits de pompage, des concentrations accrues de *chrome* ont été enregistrées presque exclusivement sur le Plateau occidental (fig. 9.2).

Cuivre, plomb et antimoine : dans les zones urbanisées
Le *cuivre,* le *plomb* et l'*antimoine* ont eu tendance à afficher des concentrations légèrement plus élevées aux stations de mesure où l'utilisation principale du bassin d'alimentation appartient à la catégorie « zones urbanisées et voies de communication » qu'aux autres stations (fig. 9.3). L'une des concentrations les plus élevées d'*antimoine* a cependant été détectée dans une source isolée des Alpes grisonnes.

Uranium : dans les zones urbanisées et les grandes cultures
Les stations de mesure où l'utilisation principale du sol est classée dans la catégorie « zones urbanisées et voies de communication » ou « grandes cultures » ont de plus enregistré des concentrations d'*uranium* légèrement plus élevées qu'aux autres stations (fig. 9.3). La concentration maximale de cet élément a toutefois été mesurée à une source valaisanne située en forêt.

9.4 Évolution

Les données disponibles ne permettent pas d'identifier des modifications ou des tendances significatives à long terme pour les différents éléments traces.

Figure 9.2

Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014) et type d'aquifère

Concentration maximale de chaque élément trace par station de mesure NAQUA. Stations du module TREND. Valeur indicative : selon les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004).

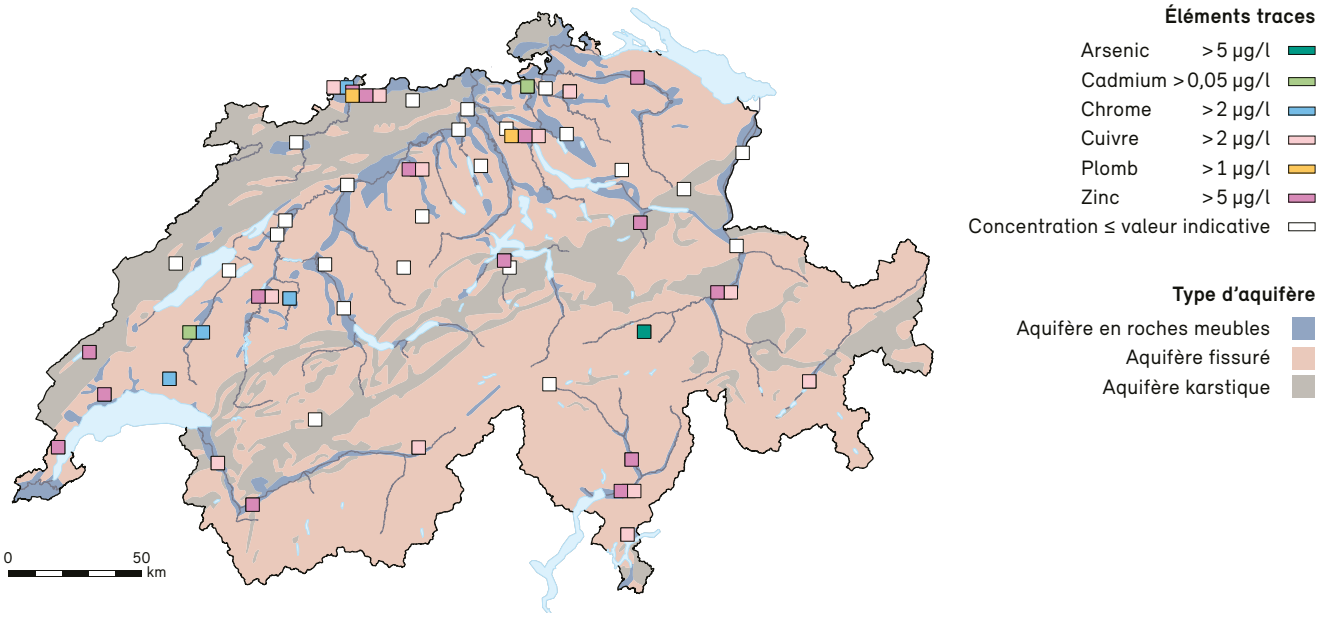
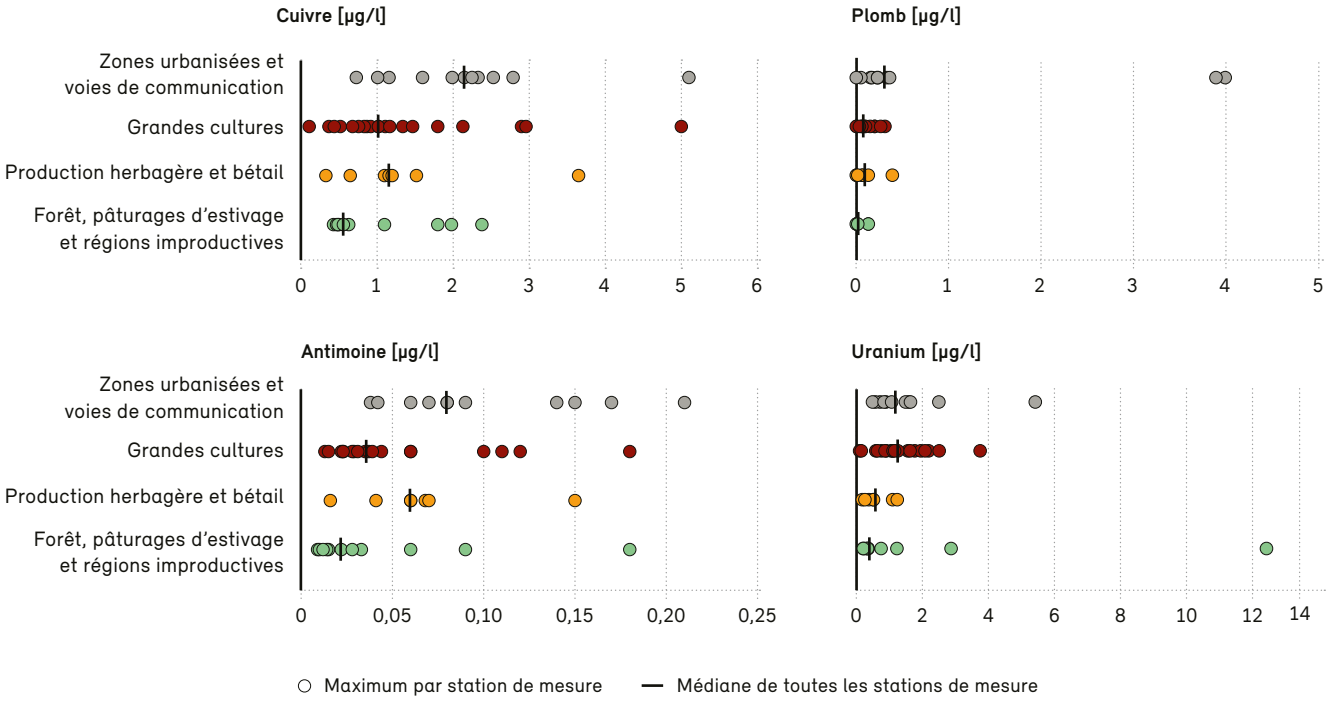


Figure 9.3

Cuivre, plomb (2006 à 2014), antimoine (2006 à 2008) et uranium (2006 à 2008 et 2012) dans les eaux souterraines par rapport à l'utilisation principale du sol

Concentration maximale de chaque élément trace par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par utilisation principale du sol : zones urbanisées et voies de communication : 11 (zinc : 10) ; grandes cultures : 20 ; production herbagère et bétail : 7 ; forêt, pâturage d'estivage et régions improductives : 11 (zinc : 10). L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure. Si un élément trace n'a pas été décelé à une station, celle-ci est néanmoins prise en compte au moyen de la limite de quantification correspondante.



9.5 Analyse

Concentrations naturelles

Dans l'ensemble, les concentrations des éléments traces analysés sont très faibles et correspondent surtout aux valeurs naturelles dans les eaux souterraines. Même diverses concentrations accrues mesurées sur le Plateau et dans les Alpes sont très probablement d'origine géogène. Le *chrome* est par exemple présent naturellement en concentrations plus élevées dans la molasse marine supérieure de l'ouest de la Suisse, tandis que l'*arsenic,* l'*antimoine* et l'*uranium* le sont dans les roches cristallines des massifs du Gothard et de l'Aar.

Sources anthropiques

Les concentrations accrues de *zinc,* de *cuivre,* de *cadmium* et de *plomb* ainsi que du *chrome,* dans un cas isolé, sont au contraire sans doute d'origine anthropique. Ce sont surtout le *cuivre* et le *plomb* qui tendent à afficher des concentrations plus élevées dans les zones urbanisées qu'en dehors de celles-ci.

Zinc, cuivre et plomb

Le *zinc,* le *cuivre* et le *plomb* présents dans les eaux souterraines proviennent avant tout des toits, des façades, des voies de chemin de fer et des routes (glissières de sécurité, abrasion des garnitures de frein, des pneus et des revêtements routiers). Le *zinc* et le *cuivre* peuvent également provenir des engrais de ferme. Malgré toutes les précautions prises lors du prélèvement des échantil-

lons, il est impossible d'exclure totalement que les installations galvanisées de certaines stations de mesure ou des conduites contenant du *cuivre* ou du *plomb* aient faussé certains résultats d'analyse.

Cadmium
Le *cadmium* parvient dans l'atmosphère principalement via les émissions de l'industrie ainsi que lors de la combustion de produits fossiles ou de l'incinération de déchets. Les engrais phosphatés en contiennent également de faibles concentrations. Les deux stations de mesure où la valeur indicative des Instructions pratiques est dépassée se trouvent dans un bassin d'alimentation principalement voué à l'agriculture.

Chrome
Les apports de *chrome* dans les eaux souterraines des zones urbanisées peuvent provenir de sites d'exploitation pollués, de décharges ou de fuites dans les canalisations.

Antimoine
L'*antimoine,* mesuré en concentrations légèrement plus élevées surtout dans les onze stations de mesure des zones urbanisées (fig. 9.3), adopte un comportement plus mobile que beaucoup d'autres éléments traces dans le sol et les eaux souterraines. Ce semi-métal entre notamment dans la production de batteries, de câbles et des minutions au plomb ; il est également utilisé comme catalyseur et stabilisateur dans les plastiques, comme lubrifiant dans les garnitures de freins et comme agent ignifuge (Mathys et al. 2007). Dans sept des neuf stations de mesure où la concentration d'*antimoine* est supérieure à 0,1 µg/l, les analyses ont aussi révélé la présence dans les eaux souterraines d'EDTA, un indicateur d'eaux usées. Cette observation pourrait signifier que l'*antimoine* parvient dans les eaux souterraines, en partie du moins, par l'infiltration d'eaux de surface contenant des eaux usées ou par des fuites dans les canalisations. Que ce soit par ces voies-là ou par l'infiltration directe d'eaux de chaussées, l'abrasion des garnitures de freins peut également être à l'origine de l'*antimoine* présent dans les eaux souterraines. Dans trois des sept stations dont le bassin d'alimentation abrite des pare-balles de stands de tir, l'*antimoine* a dépassé la concentration de 0,1 µg/l dans les eaux souterraines. L'indicateur d'eaux usées EDTA a également été décelé à deux de ces stations de mesure.

Uranium
L'*uranium* constitue une « impureté » dans les engrais phosphatés. Ses concentrations dans les sols voués aux grandes cultures sont en moyenne de 16 % plus élevées que dans les sols réservés aux pâturages et aux prairies (Bigalke et al. 2016). Selon les connaissances actuelles, les engrais minéraux contribuent à moins de 0,1 à 3 µg/l à la concentration d'*uranium* dans les eaux souterraines (OFSP 2014). À la plupart des 50 stations de mesure échantillonnées, les concentrations d'*uranium* s'en tiennent à ces valeurs très faibles. Les stations des régions de grandes cultures et des zones urbanisées enregistrent des concentrations moyennes légèrement plus élevées que les autres. Il n'est cependant pas possible de déterminer clairement si, et le cas échéant dans quelle mesure, on peut attribuer ces concentrations à des activités agricoles dans le bassin d'alimentation. Le travail intensif du sol pourrait à lui seul accroître la solubilité de l'*uranium,* qui y est naturellement présent, et expliquer les différences observées. L'analyse des isotopes permettrait d'identifier l'origine de l'*uranium* contenu dans les eaux souterraines, à condition que la concentration d'origine géogène soit faible (Kiefer et Fischer 2013).

Étude pilote « Éléments traces » 2018
Afin d'établir un jeu de données statistiquement significatif sur les éléments traces à l'échelle nationale, environ 25 éléments traces ont été analysés une à deux fois en 2018 à chaque station de mesure des modules TREND et SPEZ dans le cadre de l'étude pilote « Éléments traces ». Les résultats de ces travaux devraient aussi déterminer si, et le cas échéant dans quelle mesure, le *cadmium* et l'*uranium* qui entrent dans la composition d'engrais minéraux parviennent dans les eaux souterraines.

10 Nitrates

10.1 Bases

Émissions d'azote

À l'état naturel, les eaux souterraines contiennent très peu de *nitrates*, puisque la roche et les sols non fertilisés sont pauvres en *nitrates* ou en azote aisément mobilisable. C'est le recours à de grandes quantités d'engrais azotés en agriculture (qu'ils soient de ferme, de recyclage ou minéraux), qui conduit à l'accumulation d'azote dans le sol. Des composés azotés peuvent également parvenir dans le sol à plus faibles doses via l'atmosphère et les précipitations. Il s'agit entre autres de différents oxydes d'azote, qui sont émis lors de la combustion de carburants ou de combustibles, ainsi que d'ammoniac. Ce dernier gaz se dégage en masse des excréments des animaux de rente, de sorte que ses émissions dans l'environnement proviennent principalement des bâtiments d'élevage et des aires d'exercice de même que du stockage et de l'épandage des engrais de ferme. Dans les zones urbanisées, de l'azote peut aussi pénétrer dans le sol et les eaux souterraines, mais plus localement, en raison de la fertilisation de terrains de sport, d'espaces verts et de jardins privés ou encore de fuites dans le réseau de canalisation. Les eaux usées traitées constituent une autre source d'azote dans les aquifères en roches meubles proches d'un cours d'eau. En effet, une fois déversées dans un cours d'eau, elles parviennent dans les eaux souterraines lors de l'infiltration de ce dernier. Cet apport dans les eaux souterraines a désormais perdu de son importance, puisque de nombreuses stations d'épuration ont été équipées d'une étape de traitement supplémentaire destinée à éliminer l'azote.

Nitrates très mobiles dans le sol

Dans le sol, les divers composés azotés sont décomposés par des microorganismes et en grande partie transformés en *nitrates*, en fonction de la température, de l'humidité et de l'aération. Le travail de la terre, en particulier le labour, accélère considérablement ce processus. Les *nitrates* sont très solubles, se lient peu aux particules du sol et sont donc particulièrement mobiles. Les *nitrates* en excédent, qui ne sont pas assimilés par des plantes, peuvent être rapidement lessivés et percolent vers les eaux souterraines avec l'eau d'infiltration. Une fois parvenus dans les eaux souterraines, c'est-à-dire en dehors du sol biologiquement actif, ils ne se décomposent plus guère. La concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines ne diminue qu'en conditions anoxiques qui favorisent la réduction de *nitrates* en nitrites ou en azote élémentaire. Par exfiltration des eaux souterraines, des composés azotés, notamment des *nitrates*, rejoignent les eaux de surface, puis sont charriés vers la mer du Nord, la Méditerranée ou la mer Noire, où l'azote contribue à l'eutrophisation, surtout à proximité des côtes.

L'agriculture à l'origine des émissions d'azote

En Suisse, les émissions de *nitrates* proviennent en majeure partie de l'agriculture (OFAG 2008). Chaque année, plus de 34 000 t d'azote nitrique excédentaire (Heldstab et al. 2010), soit plus de 150 000 t de *nitrates*, passent des terres agricoles dans les eaux. Les excédents d'azote dans l'agriculture ne sont nullement à la baisse : en effet, les pertes d'azote excédentaire stagnent à un niveau élevé depuis le début du millénaire (OFAG 2016a).

Apport de l'azote de l'atmosphère en diminution

L'apport de l'azote de l'atmosphère dans le sol tend à diminuer, car les mesures de protection de l'air ont permis ces dernières années de réduire sensiblement les émissions d'oxydes d'azote issues des transports et des installations de combustion (Heldstab et al. 2010). Les émissions d'ammoniac dans l'atmosphère dues à l'agriculture restent par contre élevées depuis plus de quinze ans et avoisinent 48 000 t d'azote ammoniacal par an (OFAG 2016a). Conformément à l'objectif environnemental pour l'agriculture fondé sur le droit environnemental en vigueur, les émissions d'ammoniac doivent être limitées à environ 25 000 t par an (OFEV/OFAG 2016).

OEaux : exigence chiffrée de 25 mg/l

Selon l'annexe 2 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), une exigence chiffrée de 25 mg/l de *nitrates* s'applique aux eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être.

Engagements internationaux
Dans le cadre de la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (OSPAR 1992) et de la Commission internationale pour la protection du Rhin (CIPR 1999), la Suisse s'est engagée à réduire de moitié ses apports d'azote dans les eaux de surface par rapport à 1985. Elle contribue ainsi à la diminution de l'eutrophisation en aval de son territoire et assume sa responsabilité comme riverain d'amont.

Indicateur clé
Les « *Nitrates* dans les eaux souterraines » sont l'un des indicateurs clés de l'OFEV pour apprécier l'état des eaux. Le relevé à long terme des concentrations de *nitrates* réalisé à l'échelle nationale dans le cadre de NAQUA permet d'illustrer la qualité des eaux souterraines et son évolution sur l'ensemble du territoire helvétique, et d'identifier les influences problématiques exercées par l'agriculture et les zones urbanisées. Au niveau national, la concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines est également utilisée par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) en tant qu'indicateur agro-environnemental (OFAG 2016a, OFAG 2014, p. ex.). L'Office fédéral du développement territorial (ARE) se sert quant à lui de ce paramètre comme indicateur de durabilité dans le cadre du Cercle Indicateurs pour évaluer le développement durable aux plans cantonal et national (ARE 2015, p. ex.). Au niveau international, les analyses et les statistiques relatives aux *nitrates* sont intégrées dans les rapports de la Suisse à l'Organisation mondiale de la santé (OMS ; OSAV/OFEV 2016, p. ex.), à l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE ; OCDE 2013, p. ex.) et à l'Organisation des Nations Unies (ONU ; CH 2016, p. ex.). Certaines données sont également transmises à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE ; AEE 2018, p. ex.).

10.2 Relevé des données

Relevés à l'échelle nationale
Des données de *nitrates* dans les eaux souterraines sont relevées depuis 2002 à l'échelle nationale dans le cadre du monitoring à long terme de NAQUA. Les nitrates sont analysés dans les échantillons prélevés une à quatre fois par an aux quelque 550 stations de mesure des modules TREND et SPEZ (chap. 3). Pour chaque station, la fréquence du prélèvement dépend de la contamination et de la variabilité temporelle de la concentration de *nitrates* y enregistrées. Les stations qui affichent des valeurs élevées ou variables sont échantillonnées plus souvent que celles où les concentrations stagnent à un faible niveau. Les stations dont le bassin d'alimentation entre dans la catégorie d'utilisation principale du sol « grandes cultures » font l'objet d'analyses au moins deux fois par an.

Statistiques : concentrations maximales
Les évaluations statistiques se basent sur la concentration maximale de *nitrates* par station de mesure et par an. L'analyse de l'évolution à long terme ne prend en compte que les stations où des analyses ont été entreprises au moins une fois par an pendant la période considérée. Sont présentées et analysées ici les données disponibles et validées du monitoring à long terme jusqu'à fin 2014.

10.3 État

Dépassements fréquents de l'exigence de l'OEaux
Entre 2007 et 2014, jusqu'à 105 stations par année (soit 15 à 20 % de la totalité des stations de mesure) ont enregistré des concentrations de *nitrates* supérieures à l'exigence chiffrée de l'OEaux, fixée à 25 mg/l (tab. 10.1). La valeur maximale de 40 mg/l prévue par l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) a également été dépassée dans 2 à 4 % des stations.

Concentrations sensiblement accrues sur le Plateau
C'est surtout sur le Plateau, voué à une agriculture intensive, que les concentrations de *nitrates* dans les eaux souterraines ont dépassé 25 mg/l (fig. 10.1). Des valeurs supérieures à 40 mg/l ont été décelées entre autres à plusieurs stations de mesure du Plateau occidental, par exemple dans le Seeland et la plaine de la Broye, ainsi que dans l'Unterland et le Weinland zurichois. Alors que 80 % des stations du Plateau affichaient plus de 10 mg/l, les concentrations restaient en général inférieures à cette valeur dans les Alpes. Au sud de celles-ci et dans une grande partie du Jura, elles n'ont pas dépassé 25 mg/l.

Régions de grandes cultures : 40 % des stations dépassent 25 mg/l

La concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines dépend directement de l'utilisation du sol dans le bassin d'alimentation correspondant. C'est aux stations de mesure situées en zone de grandes cultures que l'exigence chiffrée de l'OEaux a été dépassée le plus fréquemment. En 2014, 40 % de ces stations ont affiché des concentrations supérieures à 25 mg/l, 12 % enregistrant même plus de 40 mg/l (fig. 10.2). En revanche, les valeurs étaient généralement de 5 à 10 mg/l aux stations dont le bassin d'alimentation est situé en zone boisée. Dans les zones alpines peu utilisées à des fins agricoles, les concentrations sont restées sans exception inférieures à 5 mg/l. Dans de nombreux bassins d'alimentation, l'utilisation du sol est hétérogène et varie à petite échelle. C'est pourquoi même de petites surfaces présentant d'importants flux d'azote peuvent influer de manière significative sur la concentration de *nitrates* à une station de mesure.

Tableau 10.1

Nitrates dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Base : concentration maximale par station de mesure NAQUA et par an.

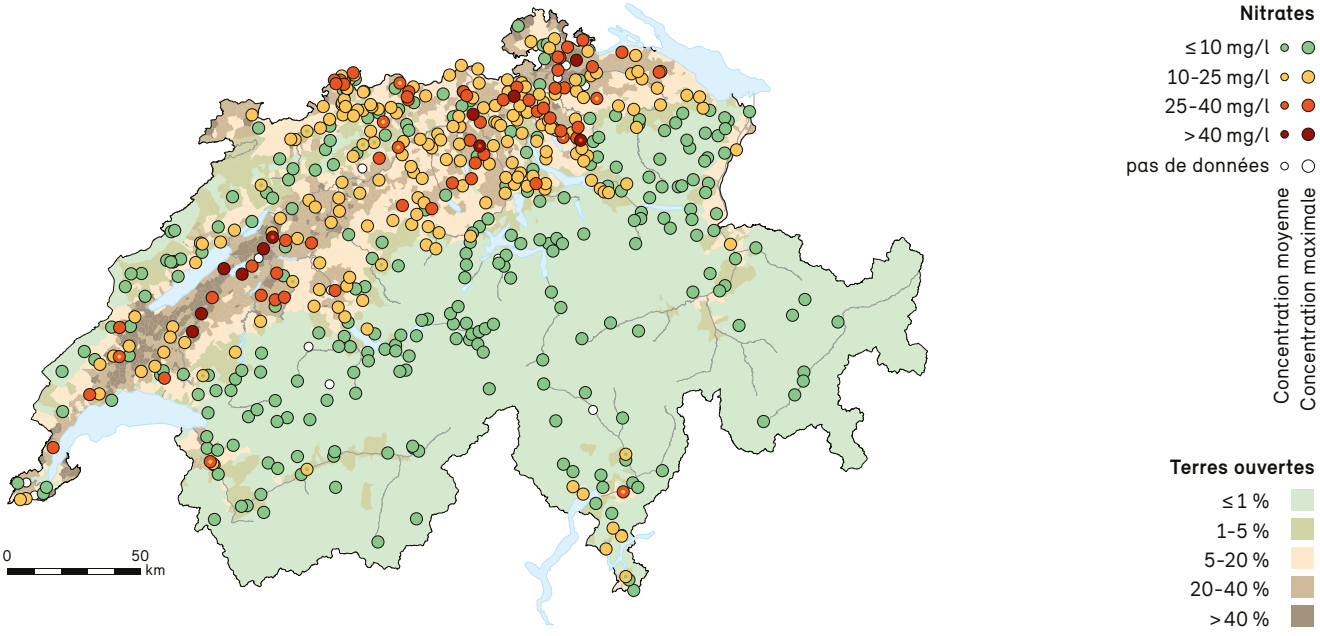
Année	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
		Concentration				Concentration
	Échantillonnées	≤ 10 mg/l	> 10 mg/l	> 25 mg/l	> 40 mg/l	> 25 mg/l
2007	482	186	296	105	22	21,8
2008	526	246	280	87	19	16,5
2009	531	253	278	89	15	16,8
2010	532	246	286	86	18	16,2
2011	531	262	269	87	17	16,4
2012	533	256	277	75	16	14,1
2013	531	246	285	81	16	15,3
2014	530	260	270	72	11	13,6

Exigence chiffrée de l'OEaux : 25 mg/l

Figure 10.1

Nitrates dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Concentration maximale et concentration moyenne par station de mesure NAQUA. Part de terres ouvertes par rapport à la surface communale.



Exigence chiffrée de l'OEaux : 25 mg/l

10.4 Évolution

Légère baisse depuis 2006

Après avoir augmenté dans nombre de stations entre 2003 et 2006 (OFEV 2009a), la concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines a diminué dans l'ensemble pour retrouver son niveau de 2002 (tab. 10.1).

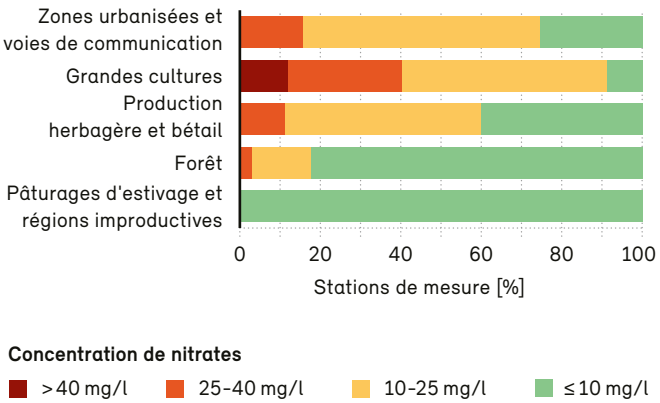
Des pics dans les régions de grandes cultures

L'augmentation la plus forte de la concentration de *nitrates* a été observée en 2006 aux stations de mesure situées dans des zones principalement occupées par de grandes cultures (fig. 10.3). Si près de 45 % des stations dont le bassin d'alimentation est voué aux grandes cultures ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux entre 2002 et 2005, cette proportion est passée à 60 % environ en 2006. Depuis lors, la concentration de *nitrates* était de nouveau en diminution. En 2014, elle est pour la première fois descendue légèrement en deçà du niveau enregistré en 2002 lors des premiers relevés nationaux de NAQUA.

Figure 10.2

Nitrates dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Base : concentration maximale par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par utilisation principale du sol : zones urbanisées et voies de communication : 90 ; grandes cultures : 92 ; production herbagère et bétail : 142 ; forêt : 159 ; pâturages d'estivage et régions improductives : 35. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure.



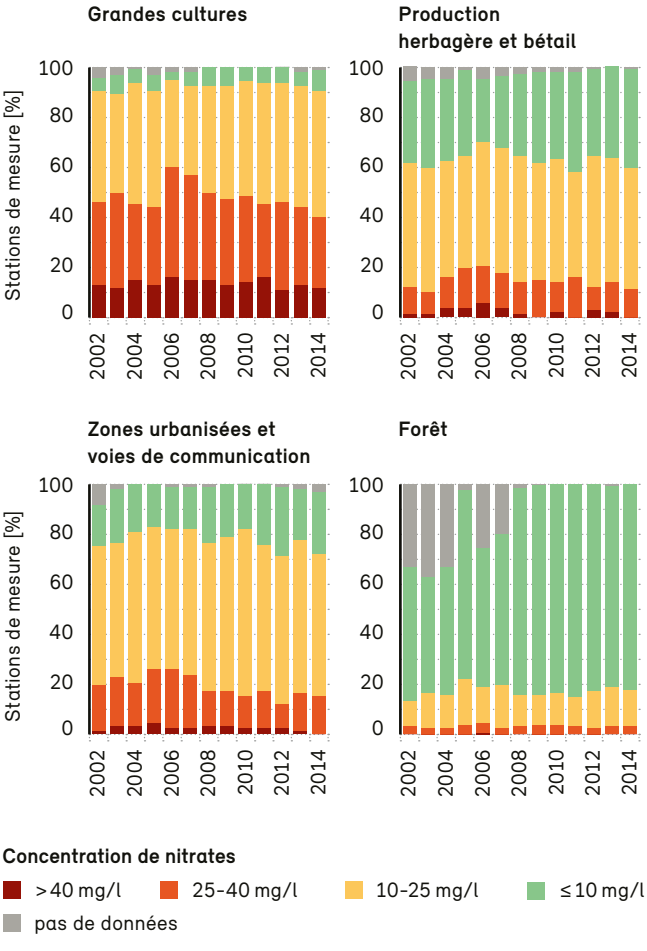
Tendances hétérogènes pour les autres utilisations du sol

Une tendance à la hausse en 2005 et/ou en 2006 a été notée même aux stations de mesure dont le bassin d'alimentation appartient principalement aux catégories « production herbagère et bétail », « zones urbanisées et voies de communication » ou « forêt » (fig. 10.3). Dans les zones urbanisées, les concentrations semblent avoir globalement diminué de 2002 à 2014, alors que dans les zones de production herbagère ou de forêt, les valeurs relevées en 2014 étaient semblables, voire légèrement supérieures, à celles des années 2002 et 2003.

Figure 10.3

Nitrates dans les eaux souterraines (2002 à 2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Base : concentration maximale par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par utilisation principale du sol : grandes cultures : 93 ; production herbagère et bétail : 143 ; zones urbanisées et voies de communication : 93 ; forêt : 159. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure.



10.5 Analyse

Principale atteinte
Chaque année, la concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines dépasse l'exigence de 25 mg/l dans près de 15 à 20 % des stations de mesure. Cette substance est ainsi de loin la cause la plus fréquente des dépassements des exigences chiffrées de l'OEaux observés dans les eaux souterraines. Cette exigence est même surpassée à 40 % des stations dont le bassin d'alimentation est prédominé par les grandes cultures.

Pollution due à l'excédent d'azote de l'agriculture
Le principal facteur qui détermine la concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines est l'excédent de *nitrates* ou d'azote dans le sol. Les concentrations sont sensiblement accrues dans les bassins d'alimentation qui font l'objet d'une exploitation agricole intensive et où des engrais azotés organiques ou minéraux sont épandus en quantités bien supérieures à la capacité d'absorption des cultures. Le risque de lessivage des *nitrates* est particulièrement élevé lorsque les terres sont labourées puis laissées en jachère en l'absence de tout couvert végétal. L'azote qui s'est accumulé dans le sol pénètre ainsi en grandes quantités dans les eaux souterraines sous forme de *nitrates*, en particulier pendant l'hiver, lorsque les précipitations sont abondantes.

Augmentation due à la sécheresse
Les longues périodes de sécheresse contribuent à l'accumulation d'azote dans le sol, en interrompant presque entièrement la croissance de nombreuses cultures et leur assimilation de *nitrates*. Si des précipitations abondantes détrempent ensuite les sols en profondeur, l'eau peut mobiliser en peu de temps des quantités importantes de *nitrates* et les transporter vers les eaux souterraines. L'augmentation des concentrations de *nitrates* dans les eaux souterraines, qui a débuté en 2003 à de nombreuses stations de mesure et culminé en 2006, résulte ainsi probablement d'une succession d'années très sèches (OFEV 2009). Entre 2003 et 2005, les quantités de précipitations sont en effet restées nettement inférieures à la moyenne pluriannuelle, de sorte que les niveaux des eaux souterraines et les débits des sources ont accusé des niveaux bas à bon nombre de stations (chap. 6).

Le recul prend plusieurs années
Le recul des concentrations de *nitrates* observé depuis 2007 est sans doute également lié aux conditions hydrologiques. Au cours des années suivantes, celles-ci ont dans l'ensemble été conformes à la moyenne pluriannuelle et ont entraîné un lessivage relativement régulier des excédents de *nitrates* du sol. La vitesse à laquelle la concentration de *nitrates* évolue aux différentes stations de mesure dépend de la durée pendant laquelle l'eau d'infiltration demeure dans la zone non saturée du sol et du taux de recharge des eaux souterraines. À de nombreuses stations, la concentration de *nitrates* n'a donc retrouvé un niveau semblable à celui de 2002/2003 qu'après plusieurs années.

Pas de nouvelle diminution en vue
Pour l'heure, il ne faut pas s'attendre à une nouvelle baisse significative des concentrations de *nitrates* dans les eaux souterraines à l'échelle nationale. L'excédent d'azote dans l'agriculture n'a guère diminué depuis la fin des années 1990 et dépasse encore 70 % (OFAG 2016a). L'utilisation d'engrais minéraux stagne et les importations de fourrages contenant de l'azote ont même fortement augmenté. Par ailleurs, aucune nouvelle mesure n'a été prise ces dernières années pour réduire efficacement les excédents d'azote dans l'agriculture.

Aggravation possible en cas de sécheresse
Les modèles climatiques (MétéoSuisse 2014) laissent présager des périodes de sécheresse plus longues en Suisse, surtout en été. Celles-ci pourraient provoquer des hausses de la concentration de *nitrates* dans les eaux souterraines, notamment dans les régions présentant déjà une certaine atteinte.

Élément clé du monitoring à long terme
En raison de la concentration élevée de *nitrates* dans de nombreux aquifères, ce paramètre continuera d'être un élément clé du monitoring à long terme de NAQUA.

11 Produits phytosanitaires

11.1 Bases

Substances actives
Au sens strict, les produits phytosanitaires sont des substances actives utilisées pour protéger des plantes contre des organismes nuisibles ou pour détruire des végétaux indésirables. Sont également classées parmi les produits phytosanitaires les substances qui servent à réguler la croissance des plantes.

Produits phytosanitaires + biocides = pesticides
Avec les biocides, les produits phytosanitaires forment une catégorie de substances appelées pesticides. Les biocides sont des substances actives appliquées en dehors des secteurs de la production végétale et de l'horticulture dans le but d'agir contre les organismes nuisibles ; ils servent souvent à protéger des matériaux ou des biens de consommation. Les biocides comprennent par exemple les produits de protection du bois, les produits antifouling et les désinfectants. Diverses substances actives sont employées aussi bien comme produit phytosanitaire que comme biocide. L'observation des eaux souterraines se concentre sur les produits phytosanitaires, car ceux-ci sont, contrairement aux biocides, utilisés à large échelle dans l'environnement.

Groupes de substances
Les produits phytosanitaires sont par ailleurs classés selon leur utilisation ou selon les organismes qu'ils combattent. Parmi les principaux groupes figurent les herbicides, qui servent à lutter contre les plantes indésirables (appelées mauvaises herbes), les fongicides, qui agissent contre les attaques de champignons, et les insecticides, qui permettent de combattre les insectes. De nombreux produits sont disponibles sur le marché. Certains associent plusieurs substances actives et contiennent en outre des adjuvants.

Ventes stables de 2008 à 2016
Selon les indications de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), plus de 2000 t de substances actives de produits phytosanitaires sont commercialisées chaque année en Suisse (OFAG 2016a). Les fongicides et les herbicides, environ 50 % et 30 % respectivement, représentent la majeure partie des volumes vendus. Les insecticides se placent en troisième position, avec 15 % environ des quantités écoulées ; ils sont souvent très puissants et donc généralement utilisés à des dosages relativement faibles. Le volume des substances actives vendues restait dans l'ensemble constant de 2008 à 2016. L'application de fongicides a quelque peu augmenté, tandis que celle des herbicides a légèrement diminué.

Plus de 300 substances actives approuvées
Quelque 300 substances organiques de synthèse sont approuvées en Suisse en tant que substances actives de produits phytosanitaires. L'approbation de ces substances relève de l'OFAG. L'office examine l'approbation de nouvelles substances actives, décide du retrait de l'approbation d'anciennes substances et définit le cas échéant des contraintes liées à l'utilisation de produits phytosanitaires afin de protéger l'environnement. Toutes les substances actives de produits phytosanitaires approuvées en Suisse sont énumérées dans l'ordonnance sur les produits phytosanitaires (OPPh, annexe 1) ainsi que dans l'Index des produits phytosanitaires (OFAG 2019a, p. ex.). D'après l'OFAG, 55 nouvelles substances chimiques actives ont été approuvées entre 2006 et 2015. Durant la même période, l'approbation de 71 « anciennes » substances actives a été retirée.

Agriculture et zones urbanisées
Les produits phytosanitaires ne sont utilisés à grande échelle que dans l'agriculture. Alors que l'application d'herbicides prédomine sur beaucoup de grandes cultures, l'arboriculture et la viticulture recourent assez souvent aux fongicides (Spycher et Daniel 2013). Les cultures de betterave à sucre sont celles où le traitement aux herbicides est le plus intensif (OFAG 2016a) : en moyenne, plus de 5 kg d'herbicides par hectare et par an. Dans l'ensemble, le traitement des champs de betteraves représente presque un quart du total d'herbicides appliqués par l'agriculture suisse. Les produits phytosanitaires sont également utilisés dans les zones urbanisées, notamment dans les jardins privés et les espaces verts.

Application interdite sur les surfaces imperméabilisées
L'utilisation de produits phytosanitaires en tant qu'herbicides (lutte contre les « mauvaises herbes ») est interdite depuis 1986 sur les routes, les voies et les places communales ainsi que sur les routes cantonales et nationales. Cette interdiction a été étendue aux places et chemins privés en 1999. Sur les talus et les bandes herbeuses longeant les routes, seul le traitement plante par plante de végétaux problématiques reste autorisé à titre exceptionnel. Par ailleurs, l'emploi de produits phytosanitaires est notamment interdit en forêt ainsi que dans les cours d'eau et le long ceux-ci, en particulier dans l'espace qui leur est réservé (pour plus de détails, cf. ORRChim, annexe 2.5, et OEaux, art. 41*c*, al. 3).

Utilisation sur les voies ferroviaires
L'application de produits phytosanitaires est également interdite sur les voies de chemin de fer et le long de celles-ci si ces dernières se trouvent en zones S2 ou S_h de protection des eaux souterraines, des dérogations pouvant le cas échéant être accordées à des conditions très restrictives. En dehors des zones S2 et S_h, une directive de l'Office fédéral des transports (OFT) concernant le contrôle des végétaux sur les voies ferrées n'autorise que l'application de quelques rares produits phytosanitaires pour le traitement plante par plante.

Utilisation dans les zones S2 et S_h
Les produits phytosanitaires susceptibles, en raison de leur mobilité ou de leur mauvaise dégradabilité, de dépasser une concentration de 0,1 µg/l dans les captages d'eau souterraine sont interdits dans les zones S2 et S_h de protection des eaux souterraines. L'OFAG publie une liste des substances actives visées par cette interdiction (OFAG 2018). Les diverses restrictions générales d'utilisation, les interdictions et les charges liées à l'utilisation de produits phytosanitaires sont décrites en détail dans la publication « Produits phytosanitaires dans l'agriculture – Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture » (OFEV/OFAG 2013). D'autres contraintes spécifiques liées à l'usage de certains produits phytosanitaires figurent dans l'Index des produits phytosanitaires de l'OFAG (OFAG 2019a, p. ex.).

Lessivage du sol
Les produits phytosanitaires qui ne sont pas entièrement décomposés ou retenus dans le sol après leur application sont lessivés vers les eaux souterraines. Les produits phytosanitaires persistants et mobiles sont ainsi particulièrement susceptibles de détériorer à grande échelle la qualité des eaux souterraines. Il en va de même pour les produits de dégradation, de réaction et de transformation, qui présentent une structure chimique semblable et qui sont réunis sous l'appellation générique de « métabolites ». Les résidus de produits phytosanitaires sont donc présents dans les eaux souterraines sous la forme de la substance active initiale ou sous forme de divers métabolites.

Apport par les eaux usées
Le long des cours d'eau, des résidus de produits phytosanitaires (et de biocides) peuvent de plus parvenir dans les eaux souterraines par l'infiltration des eaux de surface. Quant à l'apport de produits phytosanitaires dans les cours d'eau, il peut d'une part intervenir par ruissellement superficiel sur des terrains traités ainsi que par dérive directe au moment de l'application ; d'autre part, les produits phytosanitaires (et les biocides) parviennent dans les cours d'eau avec le déversement d'eaux usées traitées ou non traitées provenant de l'assainissement urbain. Dans les zones urbanisées, des égouts défectueux ou l'infiltration de l'eau des toits et des places peuvent être à l'origine d'un apport de pesticides dans les eaux souterraines. De manière plus ponctuelle, les produits phytosanitaires (et les biocides) qui parviennent dans les eaux souterraines peuvent provenir de la production industrielle ainsi que de sites contaminés ou de décharges.

OEaux : 0,1 µg/l pour les substances actives
Conformément aux objectifs écologiques pour les eaux définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. Pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être, l'annexe 2 de l'OEaux fixe de plus une exigence chiffrée de 0,1 µg/l (par substance) pour les pesticides organiques. Par ailleurs, les eaux souterraines doivent, le cas échéant après avoir subi un procédé de traitement simple, répondre aux exigences de la

législation sur les denrées alimentaires. Outre une valeur maximale de 0,1 µg/l pour les pesticides organiques, l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) fixe également une valeur maximale de 0,1 µg/l (par substance) pour les métabolites jugés pertinents dans le cadre de la procédure d'homologation. L'OEaux renvoyant à l'OPBD, cette valeur maximale s'applique également aux eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. Aux termes de l'OPPh, « un métabolite est jugé pertinent s'il y a lieu de présumer qu'il possède des propriétés intrinsèques comparables à celles de la substance mère en ce qui concerne son activité cible biologique, qu'il représente pour les organismes un risque plus élevé que la substance mère ou un risque comparable, ou qu'il possède certaines propriétés toxicologiques qui sont considérées comme inacceptables ». Ni l'OEaux ni l'OPBD ne prévoient une exigence chiffrée ou une valeur maximale pour les autres métabolites de produits phytosanitaires.

Plan d'action Produits phytosanitaires

Adopté en septembre 2017 par le Conseil fédéral, le « Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires » a pour objectif de réduire de 25 % à moyen terme les émissions de produits phytosanitaires, tout en divisant par deux les risques liés à ces produits (Conseil fédéral 2017). Outre le respect des exigences chiffrées définies par l'OEaux, le plan d'action préconise plus spécifiquement de réduire nettement, entre 2017 et 2027, la concentration dans les eaux souterraines de métabolites non pertinents de produits phytosanitaires. Le monitoring dans le cadre de NAQUA servira de base pour vérifier l'efficacité du plan d'action dans le domaine des eaux souterraines.

Indicateur clé

Les « Produits phytosanitaires dans les eaux souterraines » constituent l'un des principaux indicateurs de l'OFEV pour apprécier l'état des eaux. Le relevé à long terme et à l'échelle nationale des concentrations de différents résidus de produits phytosanitaires dans le cadre de NAQUA permet d'illustrer la qualité des eaux souterraines et son évolution sur l'ensemble du territoire helvétique, et d'identifier les influences problématiques exercées par l'agriculture et les zones urbanisées. L'OFAG utilise de plus la concentration de résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines au niveau national comme indicateur agro-environnemental (OFAG 2016a, OFAG 2014, p. ex.) afin de connaître l'impact des modes de production agricole sur les ressources en eaux souterraines. Au niveau international, les analyses et les statistiques correspondantes sont reprises dans les rapports que la Suisse adresse à l'Organisation mondiale de la santé (OMS ; OSAV/OFEV 2016) et à l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE ; OCDE 2013, p. ex.). Certaines données sont de plus transmises à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE ; AEE 2018, p. ex.).

11.2 Relevé des données

Relevés à l'échelle nationale

Des données sur les résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines sont relevées à l'échelle nationale depuis 2002 dans le cadre du monitoring à long terme de NAQUA. À chacune des quelque 550 stations de mesure des modules TREND et SPEZ (chap. 3), des échantillons sont prélevés une à quatre fois par an et analysés pour détecter la présence de résidus spécifiques de produits phytosanitaires. La fréquence du prélèvement dépend d'une part de la contamination connue à une station et d'autre part de son exposition potentielle à des produits phytosanitaires. Les stations dont le bassin d'alimentation est principalement voué aux grandes cultures ou occupé par des zones urbanisées font ainsi l'objet d'analyses au moins deux fois par an.

Sélection des substances

Le choix des substances retenues pour le monitoring à long terme se base sur des estimations du lessivage des substances actives de produits phytosanitaires et de leurs métabolites dans les eaux souterraines (Reinhardt et al. 2017). Elle prend en considération les données expérimentales concernant la mobilité (sorption) et la décomposition (demi-vie) des substances actives dans le sol (PPDB 2009) ainsi que les résultats des modélisations effectuées dans le cadre de la procédure d'homologation de substances actives (OFAG/OSAV 2019). Une priorisation supplémentaire est ensuite effectuée sur la base des quantités des substances actives qui sont vendues sur le

marché suisse et consignées chaque année par l'OFAG (OFAG 2016b).

Des études pilotes à certaines stations de mesure
Le choix des substances pour le monitoring à long terme s'appuie par ailleurs sur les données relevées dans le cadre d'études pilotes destinées à déceler et à identifier de manière précoce des substances susceptibles d'avoir un impact environnemental (dits « emerging pollutants ») à certaines stations de mesure. Limitées dans le temps, ces études se concentrent chacune sur quelques « nouvelles » substances et tiennent compte des connaissances et des méthodes scientifiques les plus récentes. Le choix des substances prend en outre en considération les données issues de la surveillance cantonale des eaux souterraines ainsi que des observations réalisées dans les pays voisins.

Étude pilote « Screening micropolluants » 2007/2008
Dans le cadre de l'étude pilote « Screening micropolluants », quelque 150 produits phytosanitaires, biocides et métabolites ont été analysés en 2007 et en 2008 (chap. 15). Alors que la limite de quantification se situe le plus souvent entre 0,01 et 0,02 µg/l dans le monitoring à long terme, une valeur nettement inférieure à 0,01 µg/l a été atteinte pour la plupart des paramètres dans le cadre de ce screening. Les prélèvements ont été opérés dans 22 stations sélectionnées du module TREND situées en zone de grandes cultures et en zone urbanisée.

Étude pilote « Dynamique des produits phytosanitaires » 2010/2011
Une autre étude pilote, réalisée en 2010 et en 2011, s'est focalisée sur la variabilité des concentrations de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines. En même temps, elle a recensé l'utilisation de ces produits dans le bassin d'alimentation des stations de mesure. Pour cette étude, des prélèvements n'ont été opérés qu'à quatorze stations spécifiques des modules TREND et SPEZ, dont le bassin d'alimentation présente une vulnérabilité particulièrement élevée et est en majeure partie voué à l'agriculture. À ces stations, les échantillonnages ont été opérés uniquement en été, à raison d'un échantillon par station toutes les deux semaines. Outre les substances faisant l'objet du monitoring à long terme, les échantillons ont également été analysés en vue de détecter le *glyphosate* et son métabolite *AMPA*.

Étude pilote « Glyphosate » 2016/2017
L'étude pilote la plus récente, réalisée en 2016/2017, a été spécifiquement dédiée au *glyphosate* et à son métabolite *AMPA.* Le *glyphosate* est de loin le produit phytosanitaire le plus souvent utilisé : en Suisse, environ 200 t de cette substance active sont vendues par an (OFAG 2019b). Le *glyphosate* a été porté à l'attention du public au printemps 2015 lorsque le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a classé cette substance active parmi les agents génotoxiques et « probablement cancérogènes » (CIRC 2015). Selon le rapport de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA 2015) et l'appréciation de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA 2017), les connaissances actuelles ne permettent toutefois pas de telles classifications. Dans le cadre de l'étude pilote, le *glyphosate* et l'*AMPA* ont été examinés à toutes les stations de mesure des modules TREND et SPEZ, un à deux échantillons ayant été analysés par station.

Substances soumises au monitoring à long terme
Lors du lancement des relevés à l'échelle nationale en 2002, le monitoring à long terme de NAQUA n'incluait que les triazines *atrazine, simazine* et *terbuthylazine,* leurs métabolites *déséthyl-atrazine* et *désisopropyl-atrazine,* ainsi que les phénylurées *diuron* et *isoproturon* (tab. 11.1). En 2005, l'éventail a été élargi à 20 nouvelles substances actives et métabolites, notamment des substances actives du groupe des chloroacétanilides, tels le *métolachlore* et le *métazachlore.* Sur la base des résultats de l'étude pilote « Pesticides et antibiotiques sulfamidés » (OFEV 2009a ; Hanke et al. 2007), d'autres substances, notamment les résidus de produits phytosanitaires comme le *2,6-dichlorobenzamide,* un métabolite des substances actives *dichlobénil* et *fluopicolide,* ou le *métolachlore ESA,* un métabolite du *métolachlore,* ont été ajoutées en 2006 au monitoring à long terme. Parmi ces « nouvelles » substances, certaines n'ont toutefois été analysées qu'à un nombre limité de stations de mesure jusqu'en 2008. Pour nombre d'entre elles, des données à l'échelle nationale ne sont dès lors disponibles que depuis 2009.

Tableau 11.1

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires inclus dans le monitoring à long terme (2002 à 2014)

Liste de toutes les substances analysées à l'échelle de la Suisse dans le cadre du monitoring à long terme de NAQUA ; indications concernant l'approbation des différentes substances actives (OFAG 2019a) et les quantités utilisées (OFAG 2016b) ainsi que le classement des métabolites lors de la procédure d'homologation (OFAG/OSAV 2019). Après retrait de l'approbation, les quantités en stock peuvent en général encore être écoulées et appliquées pendant plusieurs années.

Substance active	Métabolite	Monitoring à long terme		Retrait de l'approbation en tant que produit phytosanitaire	Quantité utilisée en 2014	Classement lors de la procédure d'homologation
		Début	Fin			
2,4-D		2005	2009		1-10 t	
Alachlore		2005	2008	2010	< 1 t (2010)	
(Alachlore)	Alachlore ESA*	2010				n. év.
(Alachlore)	Alachlore OXA*	2010				n. év.
Aldicarbe		2005	2008	2019	d.n.d.	
Atrazine		2002		2007	30-50 t (2007)	
(Atrazine)	Déséthyl-atrazine	2002				per.
(Atrazine, simazine)	Désisopropyl-atrazine	2002				per.
Bentazone		2006			1-10 t	
Bromacil		2005	2007	d.n.d.		
Chloridazone		2010			1-10 t	
(Chloridazone)	Desphényl-chloridazone	2010				n. per.
(Chloridazone)	Méthyl-desphényl-chloridazone	2010				n. per.
Chlortoluron		2005			1-10 t	
Cyanazine		2005		2008	< 1 t (2008)	
Diazinon*		2009		2011	10-30 t (2011)	
Dichlobénil*		2006	2008	2013	1-10 t (2013)	
(Dichlobénil, fluopicolide)	2,6-dichlorobenzamide	2006				n. per.
Dichlorprop		2005	2009		d.n.d.	
(Diméthachlore)	Diméthachlore ESA*	2010				n. per.
(Diméthachlore)	Diméthachlore OXA*	2010				n. per.
(Diméthénamide(-P))	Diméthénamide ESA	2006				n. per.
(Diméthénamide(-P))	Diméthénamide OXA	2006	2008			n. per.
Dinoseb		2005	2007	d.n.d.	10-30 t (2002)	
Diuron		2002			1-10 t	
Glyphosate		2005	2008		env. 300 t	
(Glyphosate)	AMPA	2005	2008			n. év.
Hexazinone		2005	2007	d.n.d.	.	
Isoproturon		2002		2018	10-30 t	
MCPA		2005			10-30 t	
Mécoprop		2005			10-30 t	
Mésotrione		2006	2008		1-10 t	
Métamitrone		2005	2008		50-100 t	
(Métazachlore)	Métazachlore ESA*	2010				n. per.

Substance active	Métabolite	Monitoring à long terme		Retrait de l'approbation en tant que produit phytosanitaire	Quantité utilisée en 2014	Classement lors de la procédure d'homologation
		Début	Fin			
(Métazachlore)	Métazachlore OXA*	2010				n. per.
Métolachlore		2005			30-50 t	
(Métolachlore)	Métolachlore ESA	2006				n. per.
(Métolachlore)	Métolachlore OXA	2006				n. per.
(Propachlore)	Propachlore ESA	2009	2013	2011		per.
Propazine		2005		-	-	
Simazine		2002		2007	1-10 t (2007)	
Sulcotrione		2006	2008		< 1 t	
Tébutame		2005	2008	2005	1-10 t (2003)	
Terbuthylazine		2002			10-30 t	
Terbutryne		2005		2008	< 1 t (2005)	
(Tolylfluanide, dichlofluanide)	N,N-diméthylsulfamide (DMS)*	2010				n. per.

(...) substance active du métabolite
* analyse facultative dans le monitoring à long terme, absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale
d.n.d. pas de données actuelles disponibles
- n'a jamais été homologuée
n. év. non évalué lors de la procédure d'homologation
per. jugé pertinent lors de la procédure d'homologation
n. per. jugé non pertinent lors de la procédure d'homologation

Métabolites de chloridazone depuis 2010

Grâce aux progrès des analyses chimiques, le monitoring à long terme a pu inclure en 2009 le *propachlore ESA,* un métabolite du *propachlore,* ainsi qu'en 2010 le *chloridazone* et ses deux métabolites, *desphényl-chloridazone* et *méthyl-desphényl-chloridazone*. Par ailleurs, le *tritosulfuron* et le *N,N-diméthylsulfamide* (*DMS*), un métabolite des fongicides *tolylfluanide* et *dichlofluanide,* sont étudiés dans le cadre du module TREND depuis 2010.

40 substances dans le monitoring à long terme

Entre 2007 et 2014, jusqu'à 26 substances actives et 14 métabolites de produits phytosanitaires ont été analysés par année dans le cadre du monitoring à long terme (tab. 11.1). Presque toutes les substances actives étaient des herbicides. Certaines substances qui n'avaient pas été décelées ou dont l'homologation avait été révoquée ont été éliminées du programme d'observation.

Des données sur quelque 400 substances

En plus des données du monitoring à long terme, des services cantonaux spécialisés et les deux laboratoires privés mandatés transmettent à l'OFEV des données sur d'autres substances actives et leurs métabolites. Ces données supplémentaires, ainsi que celles des études pilotes, constituent une base importante pour développer et, au besoin, adapter le monitoring à long terme. La banque de données de l'OFEV contient actuellement des informations sur plus de 400 substances actives et métabolites de produits phytosanitaires.

Statistiques : concentrations maximales

Les évaluations statistiques se basent sur les concentrations maximales des différentes substances enregistrées par station de mesure et par an. Les analyses portent sur les données disponibles validées du monitoring à long terme jusqu'à fin 2014, ainsi que sur les résultats des différentes études pilotes.

Séries chronologiques

L'éventail de substances faisant l'objet du monitoring à long terme est régulièrement adapté aux changements des conditions cadres. Voilà qui restreint l'appréciation globale de l'évolution au fil des ans de la qualité des eaux souterraines. L'analyse de l'évolution sur le long terme se limite par conséquent toujours à des substances spécifiques. Quant à leur évolution, elle est évaluée uniquement sur la base des résultats provenant des stations de mesure échantillonnées au moins une fois par an durant la période considérée.

11.3 État

11.3.1 Aperçu

Substances actives : exigence de l'OEaux dépassée à 2 % des stations

En 2014, les concentrations de substances actives de produits phytosanitaires ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (0,1 µg/l) à neuf stations de mesure (tab. 11.2), ce nombre correspondant à 2 % environ des stations.

Bentazone : les dépassements les plus fréquents

En 2014, cinq substances actives différentes ont été détectées dans les eaux souterraines en concentrations supérieures à 0,1 µg/l (fig. 11.1, tab. 11.3). La substance active qui a dépassé le plus souvent l'exigence chiffrée de l'OEaux a été la *bentazone,* suivi par l'*atrazine* et le *métolachlore.* Le *mécoprop* et le *métazachlore* ont chacun été décelés à une station de mesure à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l. Dans le cadre de l'étude pilote menée en 2016 et en 2017, la substance active *glyphosate* a de plus dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à deux stations ; lors de cette étude pilote, toutes les stations ont été échantillonnées une à deux fois.

Métabolites pertinents : valeur de l'OPBD dépassée à 1 % des stations

Des métabolites de produits phytosanitaires jugés pertinents lors de la procédure d'homologation ont dépassé en 2014 la valeur maximale de l'OPBD (0,1 µg/l) à cinq stations de mesure, soit à 1 % environ des stations (tab. 11.2). Ces dépassements ont été causés par une seule substance : la *déséthyl-atrazine,* un métabolite de l'*atrazine.*

Métabolites non pertinents : concentrations supérieures à 0,1 µg/l à 20 % des stations

Des métabolites jugés non pertinents lors de la procédure d'homologation et pour lesquelles l'OEaux ne fixe jusqu'ici pas d'exigence chiffrée étaient largement répandus dans les eaux souterraines et ont atteint des concentrations supérieures à 0,1 µg/l à plus de 100 stations de mesure, soit à 20 % environ des stations. Les métabolites en question sont issus de six substances actives différentes.

Desphényl-chloridazone : le métabolite dépassant le plus souvent 0,1 µg/l

Les métabolites du chloridazone (*desphényl-chloridazone* et *méthyl-desphényl-chloridazone*) sont ceux qui ont été détectés, et de loin, le plus souvent à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l (fig. 11.1). En 2014, les concentrations de *desphényl-chloridazone* ont dépassé 0,1 µg/l à 16 % des stations de mesure et 1 µg/l à 2 % des stations. Le *méthyl-desphényl-chloridazone* a quant à lui dépassé des concentrations de 0,1 µg/l à 5 % des stations, mais n'a jamais atteint des valeurs supérieures à 1 µg/l.

Métolachlore ESA : en deuxième place

Les deuxièmes métabolites à atteindre le plus souvent des concentrations accrues dans les eaux souterraines sont ceux de l'herbicide *métolachlore.* Les concentrations de *métolachlore ESA* dépassaient 0,1 µg/l à 6 % des stations de mesure et celles de *métolachlore OXA* à 0,4 % des stations.

2,6-dichlorobenzamide : en troisième place

Le *2,6-dichlorobenzamide,* un métabolite qui peut provenir de la décomposition de deux substances actives (*dichlobénil* et *fluopicolide*), occupe le troisième rang par ordre de fréquence. Ses concentrations dans les eaux souterraines ont dépassé 0,1 µg/l à 2 % des stations de mesure et sa concentration a même atteint une fois une valeur supérieure à 1 µg/l à une station.

Autres métabolites dépassant 0,1 µg/l

Les autres métabolites détectés en concentrations supérieures à 0,1 µg/l mais non consignées dans un jeu de données d'envergure nationale sont issus du *diméthachlore* et du *métazachlore* ainsi que du *dichlofluanide* ou du *tolylfluanide.* Il s'agit des métabolites suivants : *diméthachlore ESA, diméthachlore OXA, métazachlore ESA, métazachlore OXA* et *N,N-diméthylsulfamide* (tab. 11.3).

Figure 11.1

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Sont illustrées toutes les substances décelées en 2014 dans le cadre du monitoring à long terme. LQ : limite de quantification.

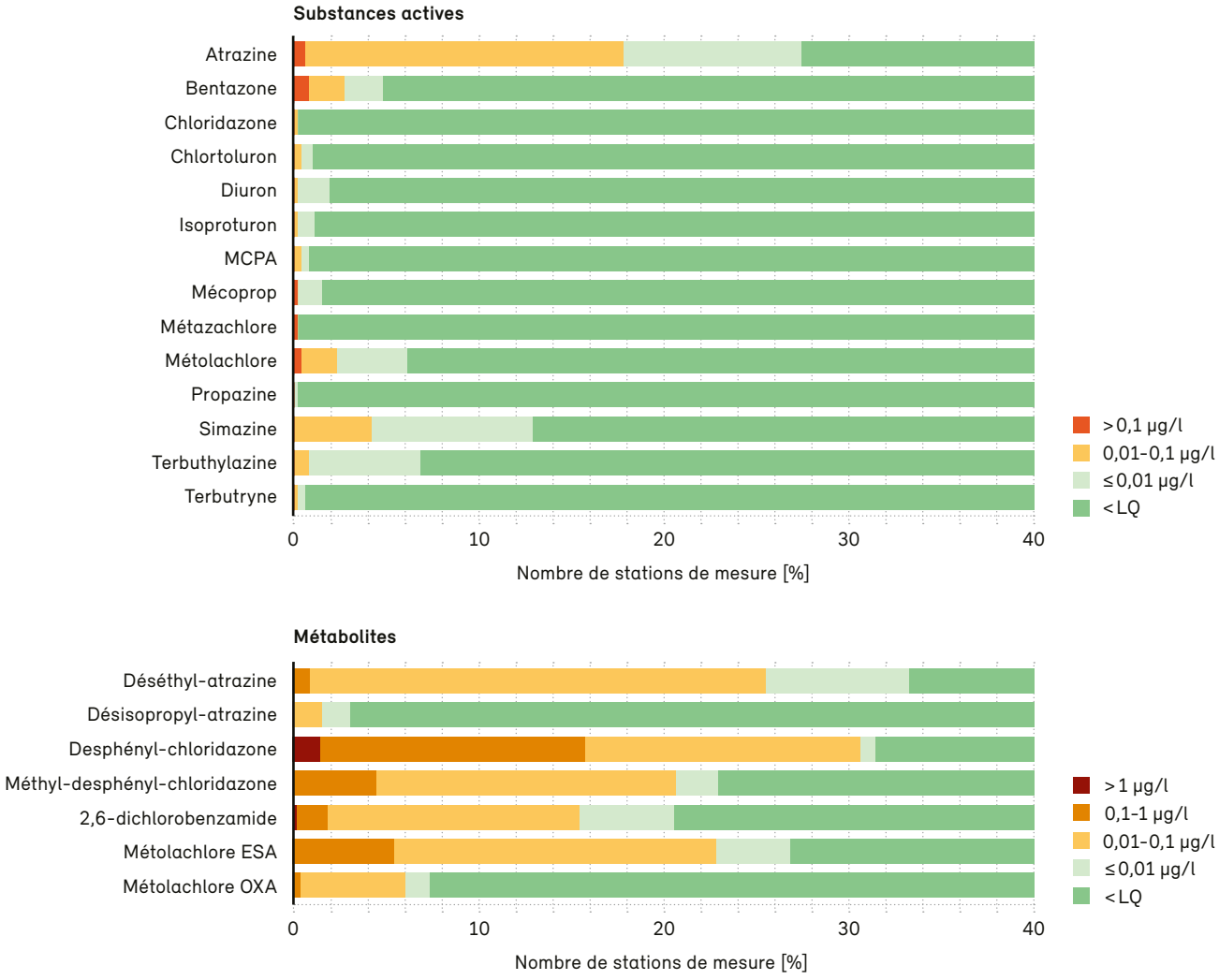


Tableau 11.2

Résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

	Stations de mesure [nombre]						Stations de mesure [%]
		Concentration					Concentration
	Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l	> 1 µg/l	> 0,1 µg/l
Substances actives	530	338	192	121	9	–	1,7
Métabolites	530	255	275	257	104	9	19,6
– jugés pertinents lors de la procédure d'homologation	530	351	179	138	5	–	0,9
– jugés non pertinents lors de la procédure d'homologation	530	282	248	231	104	9	19,6
– non évalués lors de la procédure d'homologation	430	412	18	17	–	–	–
Total	**530**	**231**	**299**	**264**	**107**	**9**	**20,2**

Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l
LQ limite de quantification

Tableau 11.3

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Sont énumérées toutes les substances décelées en 2014 ou analysées cette année-là dans le cadre du monitoring à long terme.

Substance active	Métabolite	Stations de mesure [nombre]								Stations de mesure [%]
			Concentration							Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l	> 0,3 µg/l	> 0,5 µg/l	> 1 µg/l	> 0,1 µg/l
Atrazine		530	385	145	94	3	–	–	–	0,6
(Atrazine)	2-hydroxy-atrazine*	166	149	17	16	–	–	–	–	*
(Atrazine)	Déséthyl-atrazine	530	353	177	136	5	–	–	–	0,9
(Atrazine)	Désisopropyl-atrazine	530	514	16	8	–	–	–	–	–
Bentazone		530	505	25	14	4	–	–	–	0,8
Chloridazone		530	529	1	1	–	–	–	–	–
(Chloridazone)	Desphnyl-chloridazone	530	363	167	163	84	33	22	8	15,8
(Chloridazone)	Méthyl-desphényl-chloridazone	530	408	122	110	24	4	3	–	4,5
Chlortoluron		530	525	5	2	–	–	–	–	–
Cyanazine		530	530	–	–	–	–	–	–	–
DEET*		283	267	16	8	–	–	–	–	*
Diazinon*		491	488	3	–	–	–	–	–	*
(Dichlobénil, fluopicolide)	2,6-dichloro-benzamide	529	420	109	82	10	2	2	1	1,9

Substance active	Métabolite	Stations de mesure [nombre]								Stations de mesure [%]
			Concentration							Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l	> 0,3 µg/l	> 0,5 µg/l	> 1 µg/l	> 0,1 µg/l
(Dichlofluanide, tolylfluanide)	N,N-diméthylsulfamide (DMS)*	206	189	17	17	5	1	–	–	*
Dichlorprop		530	529	1	–	–	–	–	–	–
(Diméthachlore)	Diméthachlore ESA*	96	95	1	1	1	1	–	–	*
(Diméthachlore)	Diméthachlore OXA*	96	95	1	1	1	–	–	–	*
(Diméthénamide)	Diméthénamide ESA	530	530	–	–	–	–	–	–	–
Diuron		530	520	10	1	–	–	–	–	–
Isoproturon		530	524	6	1	–	–	–	–	–
MCPA		530	526	4	2	–	–	–	–	–
Mécoprop		530	522	8	1	1	–	–	–	0,2
Métaldéhyde*		5	4	1	1	–	–	–	–	*
Métamitrone		530	523	7	–	–	–	–	–	–
Métazachlore		530	529	1	1	1	–	–	–	0,2
(Métazachlore)	Métazachlore ESA	362	349	13	13	1	–	–	–	*
(Métazachlore)	Métazachlore OXA*	323	314	9	9	1	–	–	–	*
Métolachlore		530	498	32	12	2	1	1	–	0,4
(Métolachlore)	Métolachlore ESA	530	388	142	121	29	9	2	–	5,5
(Métolachlore)	Métolachlore OXA	530	491	39	32	2	1	1	–	0,4
Métribuzine*		223	222	1	1	–	–	–	–	*
Metsulfuron–méthyl*		5	4	1	1	–	–	–	–	*
Oxadixyl*		272	270	2	2	–	–	–	–	*
Prométryne*		223	222	1	–	–	–	–	–	*
Propazine		530	529	1	–	–	–	–	–	–
(Propazine)	2-hydroxypropazine*	91	90	1	1	–	–	–	–	*
Propiconazole*		232	231	1	1	–	–	–	–	*
Simazine		530	462	68	22	–	–	–	–	–
Terbuthylazine		530	494	36	4	–	–	–	–	–
(Terbuthylazine)	Déséthyl–terbuthylazine*	174	171	3	3	–	–	–	–	*
Terbutryne		530	527	3	1	–	–	–	–	–

Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

LQ limite de quantification
(...) substance active du métabolite
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

Près de 40 substances détectées
En 2014, cinq substances actives et onze métabolites (ces derniers sont issus de sept substances actives différentes) ont été décelés en concentrations supérieures à 0,1 µg/l dans les eaux souterraines (tab. 11.3). Par ailleurs, 19 substances actives et quatre métabolites ont été présents à des concentrations inférieures à 0,1 µg/l. Au total, presque 40 substances actives et métabolites ont ainsi été décelés dans les eaux souterraines.

Résidus de produit phytosanitaires détectés à plus de 0,1 µg/l à 20 % des stations
À l'échelle nationale, des résidus de produits phytosanitaires – substances actives et métabolites – ont été détectés en 2014 à 107 stations de mesure NAQUA à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l (tab. 11.2), soit à plus de 20 % des stations. Tandis que les substances actives dépassaient l'exigence chiffrée de l'OEaux à 2 % environ des stations, les métabolites correspondants ont été détectés à des concentrations de plus de 0,1 µg/l à 20 % des stations. Des résidus de produits phytosanitaires ont été décelés dans les eaux souterraines à plus de la moitié de toutes les stations.

11.3.2 Distribution régionale

Concentrations accrues surtout sur le Plateau
Des résidus de produits phytosanitaires (substances actives et métabolites) étaient présents à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l surtout sur le Plateau, région densément peuplée et soumise à une exploitation agricole intensive (fig. 11.2, 11.3, 11.4). Des valeurs élevées ont par ailleurs été décelées à certaines stations de mesure du Jura tabulaire, dans le nord-ouest de la Suisse, ainsi que dans la région de Bâle, la vallée du Rhône et la plaine de Magadino. La répartition caractéristique des résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines était le résultat de l'utilisation des substances actives et de leur domaine d'application.

Métabolites de chloridazone : présence due à la betterave
Les résidus de *chloridazone* étaient présents uniquement dans les régions où est cultivée la betterave sucrière et fourragère (fig. 11.5). Des concentrations au-dessus de 0,1 µg/l ont été décelées notamment dans le Seeland ainsi que dans une région située entre la Glatt, la Töss et la Thur dans le nord-est du pays. En Suisse, les cultures de betterave sucrière et fourragère occupent une superficie totale de 20 000 ha (OFAG 2017).

Résidus de métolachlore très répandus sur le Plateau
Les résidus de *métolachlore* étaient largement répandus dans les eaux souterraines du Plateau (fig. 11.6). Des concentrations supérieures à 0,1 µg/l ont également été détectées au Tessin. Le *métolachlore* est en particulier appliqué sur les cultures de maïs. Les maïs vert et d'ensilage sont cultivés en Suisse sur une surface totale de 46 000 ha (OFAG 2017). La vaste présence de résidus de *métolachlore* reflète l'étendue des cultures où cette substance active est épandue.

Résidus d'atrazine : les plus répandus
Du point de vue spatial, ce sont les résidus d'*atrazine* qui ont été les plus répandus (fig. 11.7). De l'*atrazine* ou de la *déséthyl-atrazine* ont également été détectées dans la région de Bâle, dans le Jura et au Tessin ainsi que dans les vallées du Rhône et du Rhin. De plus, des résidus d'*atrazine* ont été décelés dans des vallées plus petites des Préalpes et des Alpes.

2,6-dichlorobenzamide : dans les zones d'herbages et près des agglomérations
Le *2,6-dichlorobenzamide,* un métabolite des substances actives *dichlobénil* et *fluopicolide,* a été décelé nettement moins souvent que les métabolites de *chloridazone* et de *métolachlore* dans les régions à forte proportion de grandes cultures. Des concentrations supérieures à 0,1 µg/l de cette substance ont principalement été présentes dans les zones d'herbages et de vignobles ainsi qu'à proximité d'agglomérations (fig. 11.8). Le *2,6-dichlorobenzamide* a surtout été détecté dans le nord-est de la Suisse, mais aussi dans les Préalpes, au bord du Léman et dans la vallée du Rhône.

Figure 11.2

Substances actives de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des terres ouvertes sur l'ensemble du territoire communal.

LQ : limite de quantification.

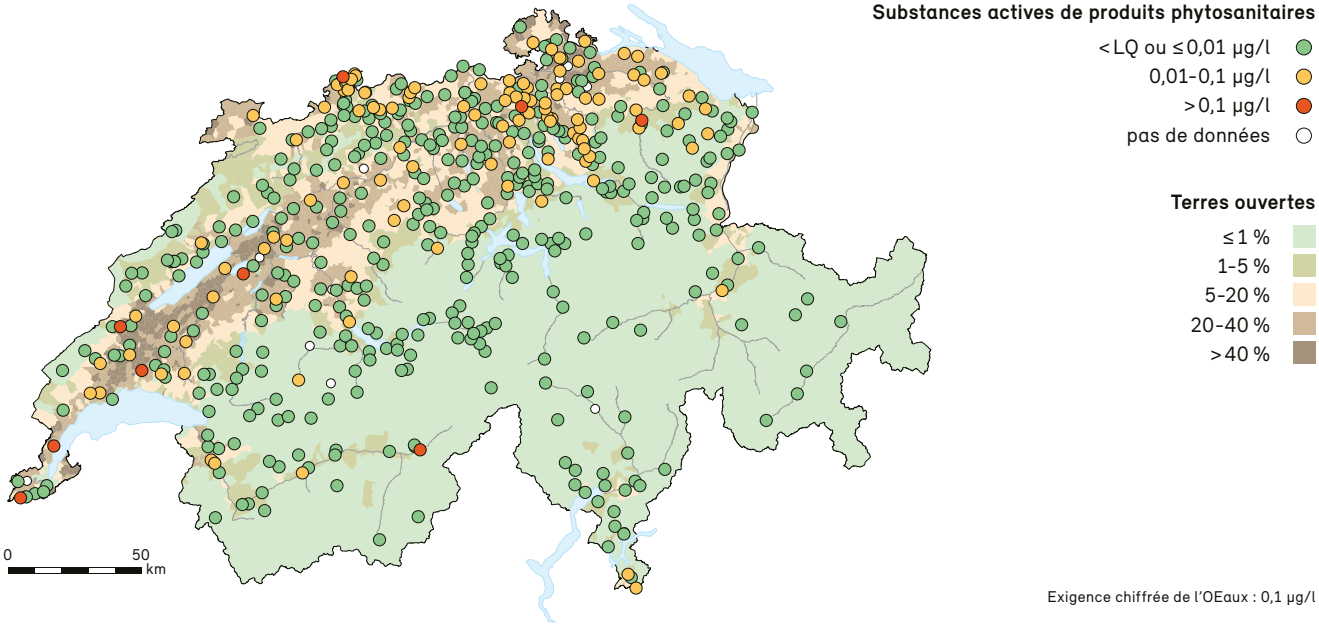


Figure 11.3

Métabolites de produits phytosanitaires jugés pertinents lors de la procédure d'homologation présents dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des terres ouvertes sur l'ensemble du territoire communal.

LQ : limite de quantification.

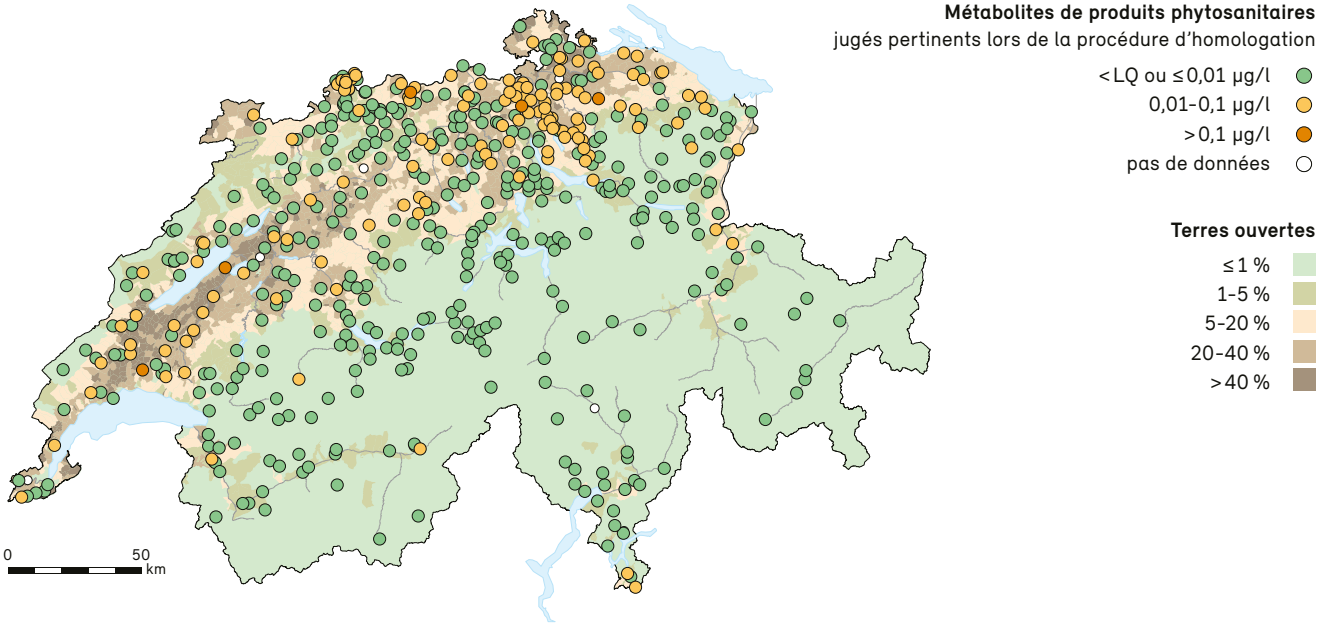


Figure 11.4

Métabolites de produits phytosanitaires jugés non pertinents lors de la procédure d'homologation présents dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des terres ouvertes sur l'ensemble du territoire communal. LQ : limite de quantification.

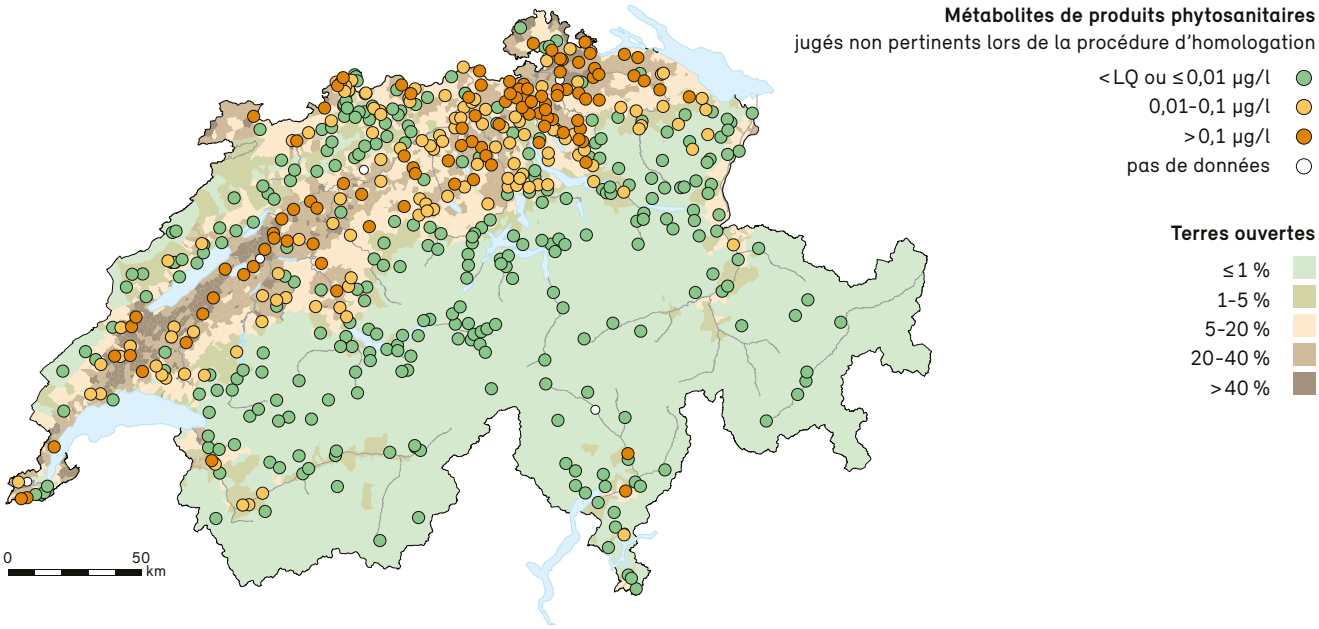
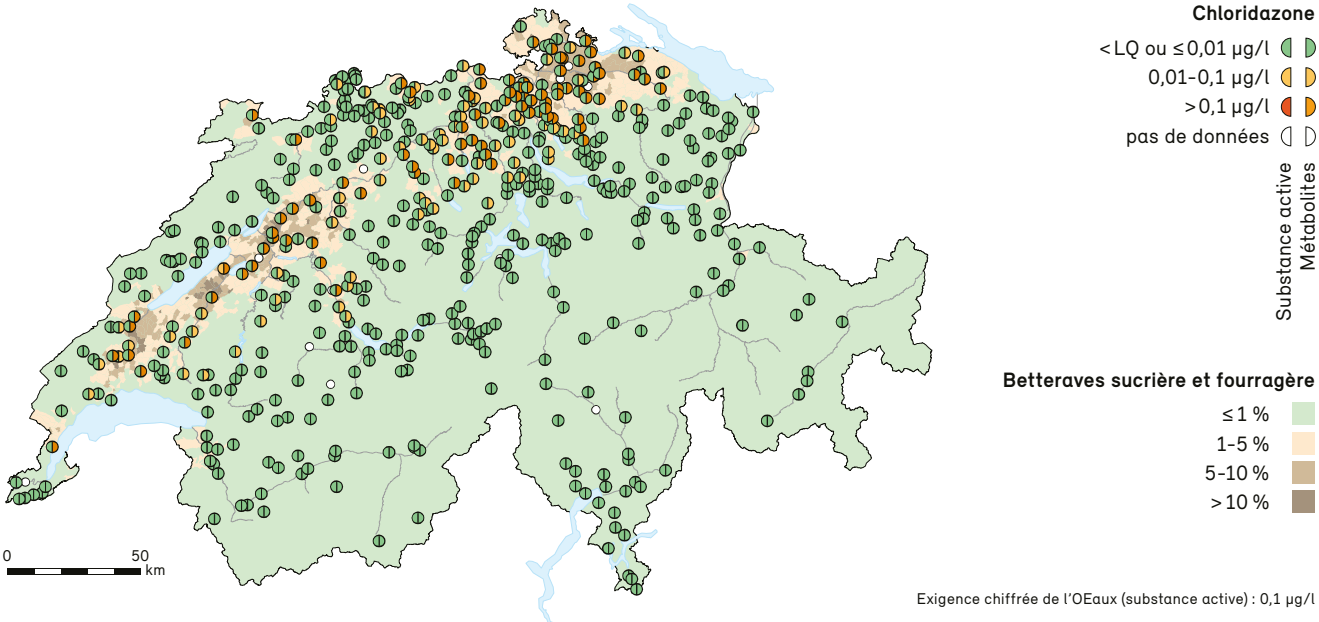


Figure 11.5

Résidus de chloridazone dans les eaux souterraines (2014) et cultures de betteraves sucrières et fourragères

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des cultures de betteraves sucrières et fourragères sur l'ensemble du territoire communal. LQ : limite de quantification.

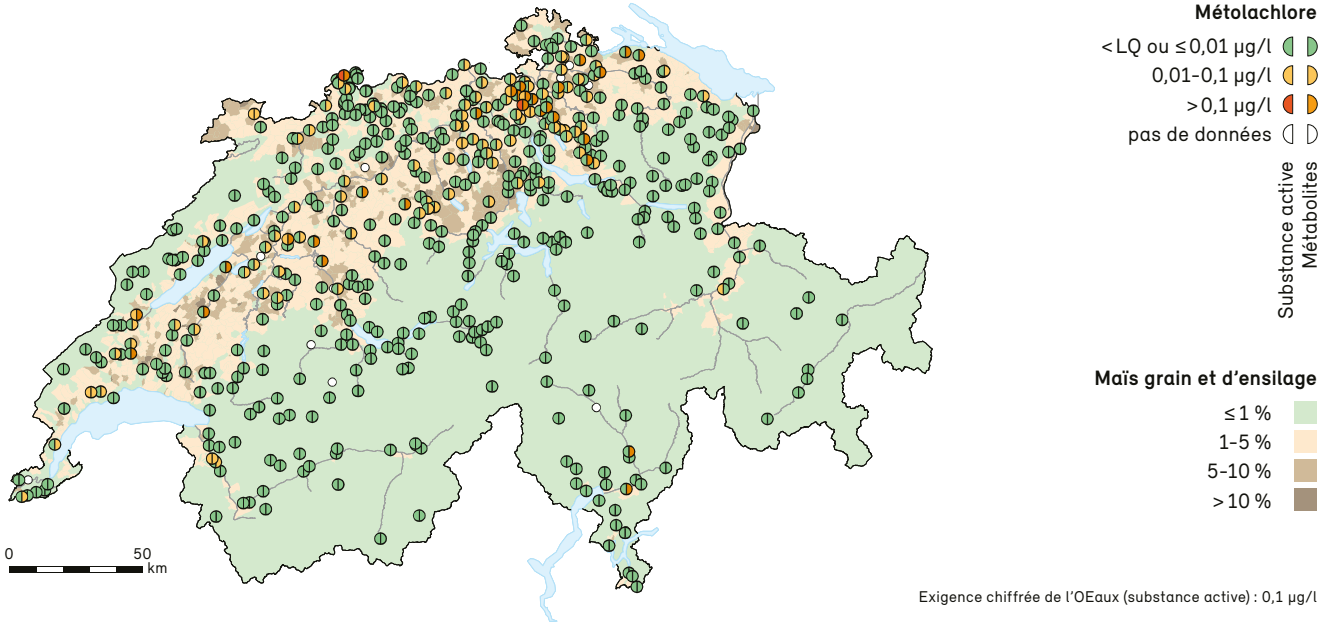


Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

Figure 11.6

Résidus de métolachlore dans les eaux souterraines (2014) et cultures de maïs vert et d'ensilage

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des cultures de maïs vert et d'ensilage sur l'ensemble du territoire communal. LQ : limite de quantification.

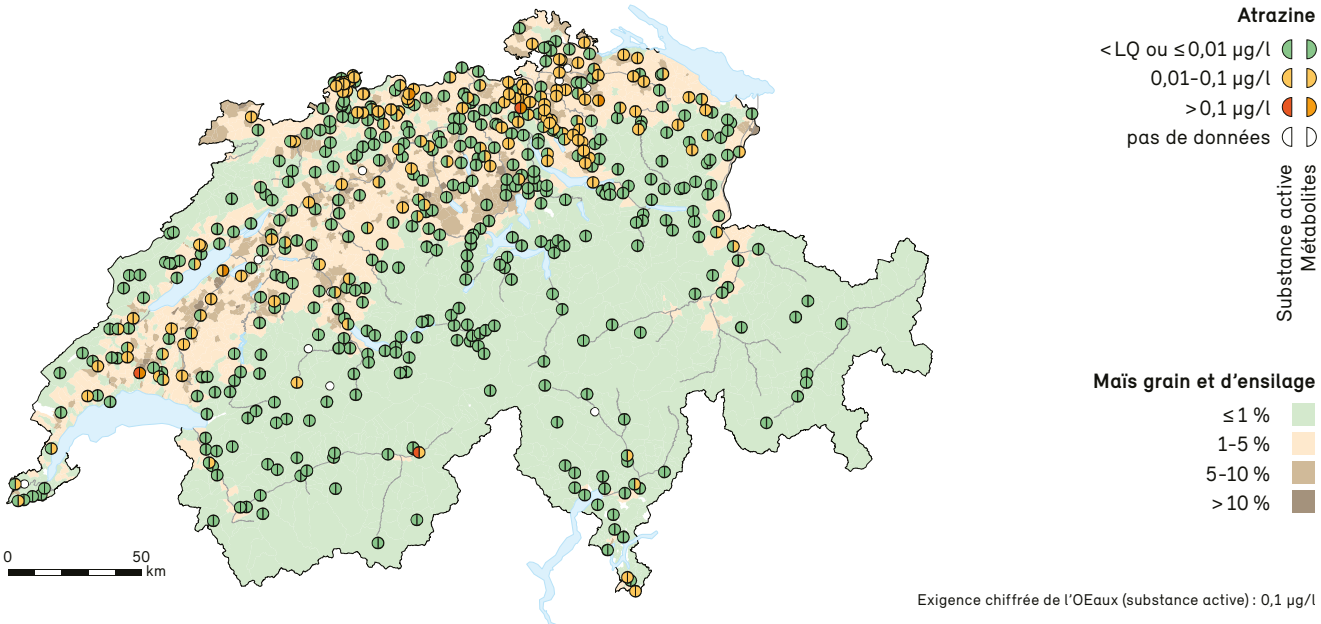


Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

Figure 11.7

Résidus d'atrazine dans les eaux souterraines (2014) et cultures de maïs vert et d'ensilage

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des cultures de maïs vert et d'ensilage sur l'ensemble du territoire communal. LQ : limite de quantification.

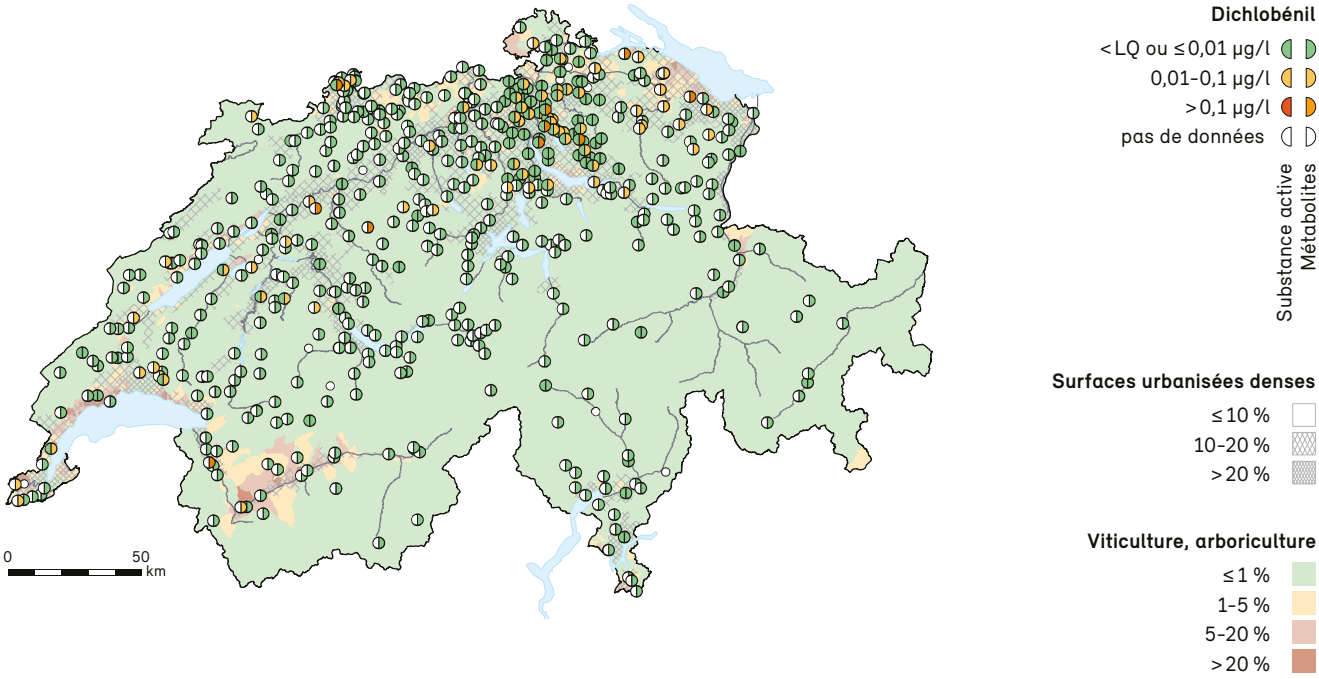


Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

Figure 11.8

Résidus de dichlobénil dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées, arboriculture et viticulture

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Part des zones urbanisées, d'arboriculture et de viticulture sur l'ensemble du territoire communal. LQ : limite de quantification.

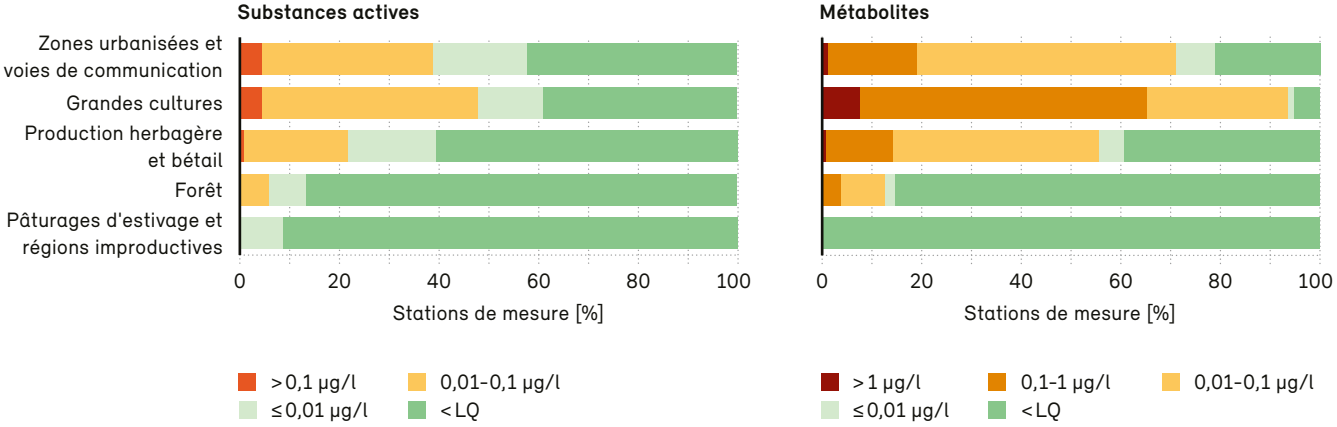


Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

Figure 11.9

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Base : concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par utilisation principale du sol : zones urbanisées et voies de communication : 90 ; grandes cultures : 92 ; production herbagère et bétail : 142 ; forêt : 159 ; pâturages d'estivage et régions improductives : 35. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure. LQ : limite de quantification.



11.3.3 Utilisation du sol

Résidus largement répandus dans les grandes cultures
Des résidus de produits phytosanitaires ont été décelés à pratiquement toutes les stations de mesure dont le bassin d'alimentation se distingue par l'utilisation principale du sol « grandes cultures ». En 2014, les concentrations de substances actives y ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à 4 % des stations de mesure (fig. 11.9). À 65 % de ces stations, les relevés ont fait état de concentrations de métabolites supérieures à 0,1 µg/l dans les eaux souterraines.

Zones urbanisées
Une présence supérieure à la moyenne de résidus de produits phytosanitaires a également été observée aux stations de mesure où l'utilisation principale du sol appartient à la catégorie « zones urbanisées et voies de communication » (fig. 11.9). Les substances actives dépassaient l'exigence chiffrée de l'OEaux à 4 % de ces stations, tandis que les métabolites étaient présents en concentrations supérieures à 0,1 µg/l à 19 % des stations. Les valeurs élevées sont dues aux résidus d'*atrazine,* de *métolachlore,* de *bentazone,* de *chloridazone* et de *tolylfluanide* ou de *dichlofluanide.* Certains de ces résidus, en particulier ceux de *chloridazone* et de *métolachlore,* proviennent plutôt des surfaces agricoles que des zones urbanisées. Les différentes utilisations du sol étant souvent étroitement imbriquées dans les bassins d'alimentation des stations, même la présence de surfaces agricoles relativement petites peut y détériorer de façon considérable la qualité des eaux souterraines.

Valeurs à peine décelables dans les régions reculées
Les résidus de produits phytosanitaires ont été pratiquement absents des stations de mesure aux catégories « pâturages d'estivage » et « régions improductives » (fig. 11.9). Toutes ces stations se trouvent entre 800 et 2000 m d'altitude, soit dans les Alpes et les Préalpes. Leurs bassins d'alimentation sont exploités de manière extensive ou sont improductifs. Des résidus de produits phytosanitaires n'ont également été décelés que rarement aux stations de la catégorie « forêt ». Les substances actives n'ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à aucune station de la catégorie « forêt ». Si les métabolites *métolachlore ESA, desphényl-chloridazone* et *métyhl-desphényl-chloridazone* y ont certes été détectés occasionnellement à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l, ils proviennent sans doute de surfaces agricoles isolées situées dans le bassin d'alimentation des stations concernées.

Tableau 11.4

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Base : concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA et par an. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Année	Stations de mesure [nombre]								Stations de mesure [%]
		Concentration							Concentration
	Échantillonnées	< LQ	< LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l	> 0,3 µg/l	> 0,5 µg/l	> 1 µg/l	> 0,1 µg/l
2007	476	208	268	258	54	8	2	1	11,3
2008	525	270	255	244	44	5	3	1	8,4
2009	530	255	275	253	47	11	6	4	8,9
2010	532	246	286	274	115	42	21	5	21,6
2011	530	237	293	273	109	46	25	9	20,6
2012	532	253	279	256	108	40	20	7	20,3
2013	531	228	303	276	118	40	25	8	22,2
2014	530	231	299	264	107	44	28	9	20,2

Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l
LQ limite de quantification

11.4 Évolution

Situation générale inchangée depuis 2010

Le nombre des stations de mesure où des résidus de produits phytosanitaires ont été détectés à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l est largement stable depuis 2010 et avoisine 110 chaque année (tab. 11.4). Auparavant, les concentrations accrues de résidus de produits phytosanitaires étaient nettement plus rares. La nette hausse de ces cas entre 2009 et 2010 s'explique avant tout par l'élargissement de l'éventail des substances analysées. Les résidus de *chloridazone,* qui exercent une influence significative sur les paramètres statistiques, ne sont en effet analysés à l'échelle nationale dans le cadre de NAQUA que depuis 2010.

Substances actives : présence sporadique

Entre 2007 et 2014, des substances actives ont été détectées dans les eaux souterraines plutôt rarement, de manière irrégulière et le plus souvent à des stations différentes. Chaque année, deux à sept de ces substances ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux, fixée à 0,1 µg/l (tab. 11.5). Les deux substances actives qui ont chaque année dépassé plusieurs fois la valeur de l'OEaux sont l'*atrazine* et le *métolachlore.* La *bentazone* a également été décelée de manière récurrente à ces concentrations entre 2007 et 2014. Durant toute la période considérée, l'*atrazine* a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à quinze stations de mesure différentes, le *métolachlore* à huit stations et la *bentazone* à sept. L'*isoproturon,* le *mécoprop* et le *métamitrone* ont occasionnellement dépassé la concentration de 0,1 µg/l à deux stations chacun. Entre 2007 et 2014, chacune des substances actives *chlortoluron, MCPA, métazachlore* et *propazine* a été décelée une seule fois à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l. Il en est allé de même pour l'*éthofumesate,* le *glyphosate* et le *métaldéhyde,* également des substances actives, mais dont la présence n'était pas examinée à l'échelle nationale. Au total, treize substances actives ont été détectées entre 2007 et 2014 à des concentrations dépassant 0,1 µg/l. Au cours de cette période, le *chlortoluron,* l'*éthofumesate,* le *glyphosate,* l'*isoproturon,* le *métaldéhyde* et le *métamitrone* ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux uniquement dans des aquifères karstiques.

Métabolites : faibles variations des concentrations

Comparés aux substances actives, les métabolites ont été décelés nettement plus souvent et étaient présents aux mêmes stations de mesure à des concentrations relativement constantes. Entre 2007 et 2014, la *déséthyl-atrazine,* le *desphényl-chloridazone,* le *méthyl-desphényl-chloridazone,* le *métolachlore ESA* et le *métolachlore OXA* ont ainsi été détectés à plusieurs reprises, voire régulièrement, à des concentrations dépassant 0,1 µg/l (tab. 11.5). Des valeurs isolées supérieures à 0,1 µg/l se sont limitées aux métabolites *désisopropyl-atrazine* et *propachlore ESA.* Les métabolites qui n'avaient pas fait l'objet d'analyses à l'échelle nationale auparavant, à savoir le *N,N-diméthylsulfamide,* le *diméthachlore ESA,* le *diméthachlore OXA,* l'*AMPA,* le *métazachlore ESA* et le *métazachlore OXA,* ont été détectés à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l dans une à huit stations. Entre 2017 et 2014, au total treize métabolites différents ont été décelés à des concentrations de plus de 0,1 µg/l.

Triazine : tendance à la baisse

La pollution des eaux souterraines aux résidus d'*atrazine,* de *simazine* et de *terbuthylazine* a sensiblement diminué ces dix dernières années (fig. 11.10). Le nombre des dépassements de l'exigence chiffrée de l'OEaux par l'*atrazine* a baissé, passant de 5 % environ en 2004 (OFEV 2009a) à près de 1 % en 2014. Son métabolite, la *déséthyl-atrazine,* a enregistré un recul similaire, passant de 6 % à 1 %. La *simazine* et la *terbuthylazine,* qui n'avaient été décelées que rarement à des concentrations de plus de 0,1 µg/l, n'ont plus été rencontrées à des concentrations supérieures à cette limite depuis 2006 et 2005 respectivement.

Métolachlore : augmentation des résidus

À l'inverse, le nombre des stations de mesure où les métabolites *métolachlore ESA* et *métolachlore OXA* ont été détectés à des concentrations de plus de 0,1 µg/l a pratiquement doublé depuis 2009 (fig. 11.10). Cette année-là, le *métolachlore ESA* a été décelé à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l à près de 3 % de toutes les stations, alors qu'il dépassait cette valeur à plus de 5 % des stations en 2014.

Tableau 11.5

Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2007 à 2014) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux, soit une concentration de 0,1 µg/l

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA et par an. Le tableau énumère toutes les substances détectées à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l.

Substance active	Métabolite	Stations de mesure [nombre]								
		Concentration > 0,1 µg/l								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2007-2014
2,4-D		-	-	-	-	1	-	-	-	1
Atrazine		14	6	7	7	6	6	4	3	15
(Atrazine)	Déséthyl-atrazine	18	13	13	12	13	13	9	4	22
(Atrazine)	Désisopropyl-atrazine	-	-	2	-	-	-	-	-	2
Bentazone		-	-	2	3	-	-	1	4	7
(Chloridazone)	Desphényl-chloridazone	2	2	-	89	80	83	83	84	96
(Chloridazone)	Méthyl-desphényl-chloridazone	-	-	-	24	27	24	27	24	33
Chlortoluron		-	-	-	-	-	-	1	-	1
(Dichlobénil, fluopicolide)	2,6-dichlorobenzamide	13	13	15	8	13	8	7	10	25
(Dichlofluanide, tolylfluanide)	N,N-diméthylsulfamide (DMS)*	-	-	/	8	6	2	7	5	8
(Diméthachlore)	Diméthachlore ESA*	-	-	/	-	-	-	1	1	2
(Diméthachlore)	Diméthachlore OXA*	-	-	/	1	-	-	-	1	2
Éthofumesate*		-	-	1	-	-	-	-	-	1
Glyphosate*		1	-	/	-	-	/	/	/	1
(Glyphosate)	AMPA*	1	-	/	-	1	/	/	/	2
Isoproturon		-	-	1	1	-	-	-	-	2
MCPA		-	-	-	-	-	-	1	-	1
Mécoprop		-	-	-	-	-	-	2	1	2
Métaldéhyde*		/	/	-	-	-	1	-	-	1
Métamitrone		-	-	1	-	-	1	-	-	2
Métazachlore		-	-	-	-	-	1	1	1	1
(Métazachlore)	Métazachlore ESA*	-	-	1	1	1	2	3	1	4
(Métazachlore)	Métazachlore OXA*	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Métolachlore		4	3	4	2	3	2	2	2	8
(Métolachlore)	Métolachlore ESA	15	15	14	18	21	28	36	29	50
(Métolachlore)	Métolachlore OXA	2	3	2	3	4	4	4	2	6
(Propachlore)	Propachlore ESA	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Propazine		-	-	-	1	-	-	-	-	1

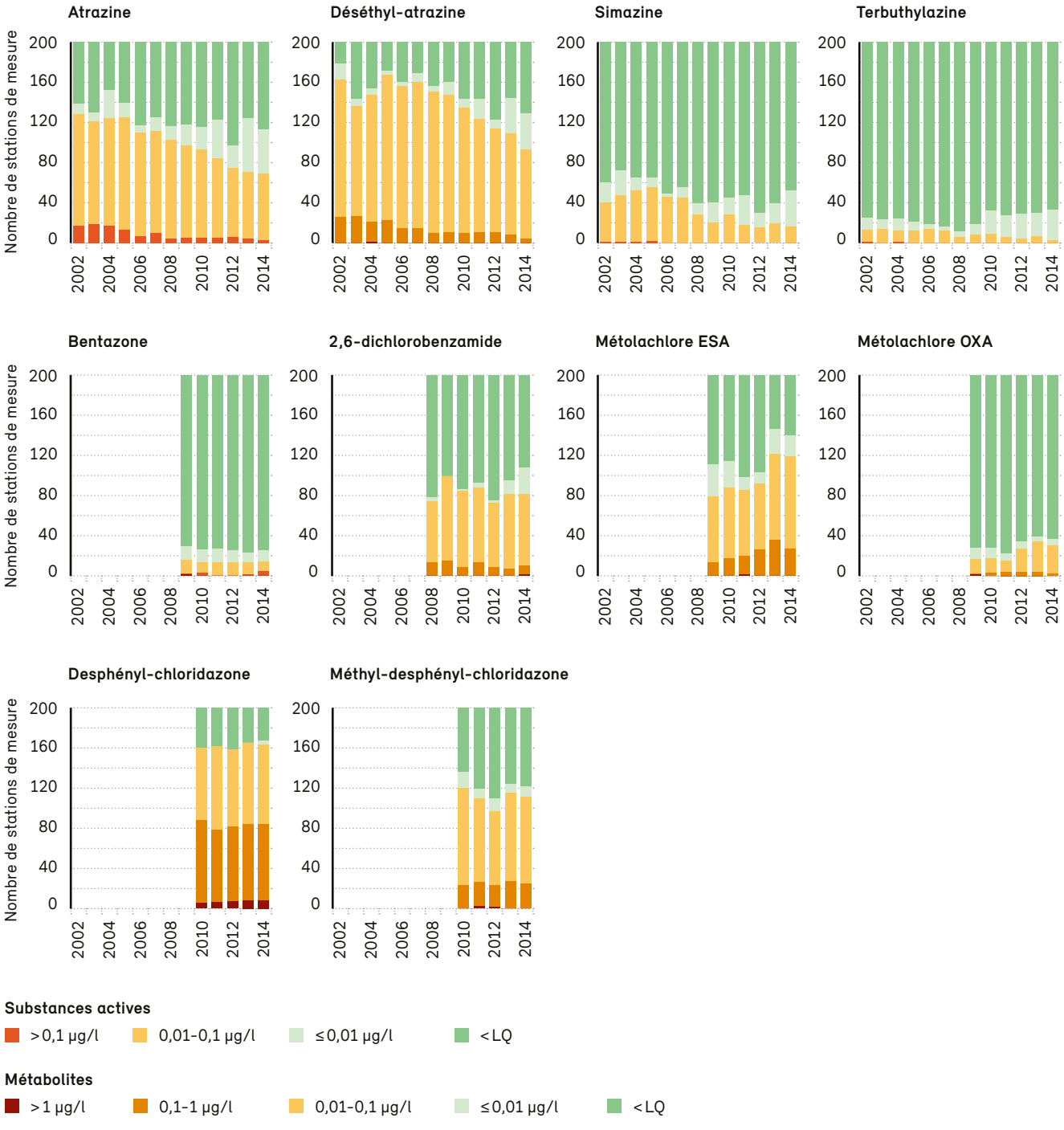
Exigence chiffrée de l'OEaux (substance active) : 0,1 µg/l

(...) substance active du métabolite
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale
/ pas de données

Figure 11.10

Quelques substances actives et métabolites de produits phyto-sanitaires dans les eaux souterraines (2002 à 2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Sont prises en considération uniquement les stations qui ont été échantillonnées au moins une fois par an durant cette période. Nombre de stations par paramètre : atrazine : 344 (2002-2014) ; déséthyl-atrazine : 343 (2002-2014) ; simazine : 342 (2002-2014) ; terbuthylazine : 338 (2002-2014) ; bentazone : 447 (2009-2014) ; 2,6-dichlorobenzamide : 515 (2008-2014) ; métolachlore ESA : 403 (2009-1014) ; métolachlore OXA : 403 (2009-2014) ; desphényl-chloridazone : 413 (2010-2014) ; méthyl-desphényl-chloridazone : 416 (2010-2014). LQ : limite de quantification.



Autres substances : pas de changement significatif
Aucun changement significatif n'a été observé dans le cas de toutes les autres substances, tels le *desphényl-chloridazone,* le *méthyl-desphényl-chloridazone* ou le *2,6-dichlorobenzamide* (fig. 11.10).

11.5 Analyse

11.5.1 Situation générale

Qualité des eaux souterraines durablement détériorée
Les substances actives dépassent l'exigence chiffrée de l'OEaux (0,1 µg/l) à 2 % environ des stations de mesure. De plus, à quelque 20 % des stations, les eaux souterraines contiennent des métabolites à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l. Dans l'ensemble, des résidus de produits phytosanitaires, substances actives et métabolites confondus, ont été détectés à plus de la moitié des stations. Ces résidus portent donc durablement atteinte à la qualité des eaux souterraines à grande échelle.

Métabolites indésirables dans les eaux souterraines
Comparés aux substances actives, les métabolites sont détectés plus souvent à l'échelle nationale, plus régulièrement et aussi à des concentrations plus élevées. En effet, beaucoup de métabolites sont plus mobiles et à la fois plus persistants que leur substance mère. L'OEaux ne contient cependant aucune exigence chiffrée spécifique pour la plupart de ces composés. Indépendamment de leur toxicité pour l'être humain et pour les organismes aquatiques, les métabolites comptent néanmoins parmi les substances de synthèse persistantes qui n'ont pas, selon l'OEaux, leur place dans les eaux souterraines. Il importe de prévenir ou de réduire leur apport dans les eaux souterraines également à titre préventif, afin de protéger la principale ressource d'eau potable. À l'instar des substances actives, les métabolites sont indésirables dans les eaux souterraines.

Résidus problématiques
La plupart des résidus de produits phytosanitaires qui sont fréquemment présents dans les eaux souterraines à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l se dégradent mal ou présentent une grande mobilité dans le sol. Ils sont par ailleurs le plus souvent issus de substances actives qui sont ou ont été utilisés en grandes quantités. Lorsque ces substances parviennent dans les eaux souterraines, elles ne s'y dégradent que très lentement. Ce sont surtout les voies d'écoulement préférentielles (canaux formés par les racines, galeries creusées par les vers de terre, fissures de dessiccation, etc.) qui se révèlent particulièrement critiques, car elles réduisent considérablement l'effet filtrant du sol et accélèrent le transport des substances, même si celles-ci sont peu mobiles. Une grande partie des eaux souterraines ne se renouvelant que très lentement, les résidus de produits phytosanitaires peuvent séjourner extrêmement longtemps dans le sous-sol. Voilà pourquoi il importe tout spécialement d'agir de manière précoce et préventive.

Résidus de chloridazone et de métolachlore largement présents
Les métabolites du *chloridazone* et du *métolachlore* sont largement répandus dans les eaux souterraines. À plus de la moitié des stations où des métabolites ont été mesurés à des concentrations de plus de 0,1 µg/l, ils proviennent de la dégradation de ces deux substances actives. C'est en particulier le métabolite *desphényl-chloridazone* qui était souvent présent dans les eaux souterraines et à des concentrations nettement accrues.

Pas d'aggravation perceptible dans l'ensemble
Les données disponibles ne donnent pas à penser que la qualité des eaux souterraines se soit globalement aggravée au cours des dernières années. La multiplication des résidus de produits phytosanitaires détectés dans les eaux souterraines s'explique pour l'essentiel par l'élargissement répété du monitoring à long terme à des métabolites mobiles et à l'abaissement de la limite de quantification de nombreuses substances. Seul le métabolite *métolachlore ESA* a récemment été décelé plus fréquemment dans les eaux souterraines et plus souvent à des concentrations accrues.

11.5.2 Répartition des charges polluantes

Pollution due aux grandes cultures
C'est sur le Plateau, région densément peuplée et vouée à une exploitation agricole intensive, que les résidus de produits phytosanitaires sont le plus largement présents. On en trouve ponctuellement aussi dans le Jura et les vallées alpines. La qualité des eaux souterraines est le plus sévèrement détériorée en présence de grandes cultures : dans ces régions, des résidus de produits phytosanitaires ont été détectés en 2014 dans les eaux souterraines à des concentrations de plus de 0,1 µg/l à quelque 66 % des stations de mesure. Environ 97 % des stations de la catégorie « grandes cultures » contenaient des résidus de produits phytosanitaires. L'agriculture est donc à l'évidence la principale source des résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

Zones urbanisées comme sources d'apport
Dans les zones urbanisées, où des résidus de produits phytosanitaires ont également été décelés à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l, certaines de ces substances peuvent provenir de l'utilisation de tels produits dans des jardins privés ou des espaces verts ainsi que sur des matériaux de construction ou de leur application (par le passé) le long de routes et de voies de chemin de fer. En l'absence d'une couche de sol intacte et sorbante, capable de protéger les eaux souterraines contre l'apport de substances nocives et étrangères, les résidus de produits phytosanitaires peuvent parvenir directement dans les eaux souterraines. Voilà pourquoi le recours aux produits phytosanitaires destinés à la lutte contre les « mauvaises herbes » (herbicides) sur les chemins et les places est interdit depuis quelques années déjà (Wittwer et Gubser 2010). À quelques sites isolés des zones urbanisées, les produits phytosanitaires présents dans les eaux souterraines proviennent très probablement de la production industrielle ou de décharges. Étant donné qu'un bassin d'alimentation peut présenter différentes utilisations du sol, il peut arriver que les résidus de produits phytosanitaires décelés à une station appartenant à la catégorie « zones urbanisées et voies de communication » proviennent de l'application de substances actives sur un terrain agricole.

Roches meubles : métabolites persistants et mobiles
Les aquifères en roches meubles, très fréquents au fond des vallées, sont en général assez bien protégés contre l'apport de substances étrangères par des couches de sol intactes et bien développées. Ce sont en particulier la matière organique et les fines particules d'argiles qui fixent souvent les produits phytosanitaires et favorisent leur dégradation. La majeure partie des produits phytosanitaires appliqués n'atteignent donc pas l'aquifère situé sous ces couches protectrices. Dans le sous-sol, des roches meubles à grain fin, dans lesquelles l'eau s'écoule lentement, peuvent aussi servir de filtre. Néanmoins, il arrive que des résidus persistants et très mobiles de produits phytosanitaires, tels les métabolites du *chloridazone* et du *métolachlore* parviennent en grandes quantités dans les eaux souterraines. Malgré la faible vulnérabilité des aquifères en roches meubles, c'est-à-dire leur faible sensibilité à une pollution par des substances étrangères, l'exploitation agricole intensive y engendre une charge de résidus de produits phytosanitaires à large échelle.

Karst : substances actives au-dessus de 0,1 µg/l
Les aquifères karstiques, très fréquents dans le Jura et dans les Alpes calcaires, sont couramment recouverts d'une couche de sol mince. Leur protection contre l'apport de substances étrangères n'est donc guère efficace. L'eau s'écoulant aisément dans les vides du karst, les substances étrangères sont transportées assez rapidement sur de grandes distances, sans rétention réelle. La plupart de ces régions sont toutefois soumises à une exploitation agricole nettement moins intensive, ou sont même épargnées par toute exploitation. Des résidus de produits phytosanitaires y sont donc plutôt rares. Aux stations de mesure des aquifères karstiques où de tels résidus sont présents, ceux-ci peuvent brièvement atteindre des concentrations de plus de 0,1 µg/l. Dans les roches karstiques, un nombre particulièrement élevé de substances actives dépassent par ailleurs ponctuellement l'exigence chiffrée de l'OEaux. Même des produits phytosanitaires connus pour se dégrader aisément *(chlortoluron, éthofumesate, glyphosate, isoproturon, métaldéhyde* ou *métamitrone)* peuvent donc être présents dans les aquifères karstiques.

11.5.3 Situation en détail

Atrazine : héritage du passé

Bien que l'*atrazine* ait été radiée début 2007 de la liste des substances approuvées, cette substance active et son métabolite *déséthyl-atrazine* figurent toujours parmi les résidus de produits phytosanitaires décelés à plus de 30 % des stations de mesure ; il s'agit ainsi des substances le plus souvent détectées dans les eaux souterraines (fig. 11.1) et les plus répandues en Suisse (fig. 11.7). Cette situation s'explique par deux raisons : la mauvaise dégradabilité de ces deux composés et les grandes quantités de substance active utilisées par le passé. L'*atrazine* a été produite à l'échelle industrielle depuis la fin des années 1950 et elle a compté jusqu'en 2008 parmi les 20 substances actives les plus appliquées en Suisse. Chaque année, plusieurs dizaines de tonnes d'*atrazine* ont été épandues comme herbicide de pré-levée et de post-levée dans la culture du maïs, l'arboriculture et la viticulture, ainsi que comme herbicide non sélectif le long de routes et de voies ferrées.

Les trois stations de mesure où l'*atrazine* a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux en 2014 sont situées en zone urbanisée, à proximité immédiate de routes et de voies de chemin de fer. Le métabolite *déséthyl-atrazine* a dépassé l'exigence chiffrée de 0,1 µg/l aussi bien en zone urbanisée que dans les régions de grandes cultures. Trois des cinq stations où la *déséthyl-atrazine* a atteint des valeurs supérieures à 0,1 µg/l se trouvent dans des aquifères en roches meubles, tandis que les deux autres sont situées respectivement dans un aquifère karstique et un aquifère fissuré.

Le lent recul des concentrations d'*atrazine* et de son métabolite *déséthyl-atrazine* dans les eaux souterraines, ainsi que de celles de *simazine* et de *terbuthylazine,* des triazines dont la structure chimique est similaire (fig. 11.10), s'explique par le retrait progressif de leur autorisation. Sur les installations ferroviaires et le long de celles-ci, l'utilisation de l'atrazine est interdite depuis 1990. Dans l'agriculture, le dosage de l'*atrazine,* de la *simazine* et de la *terbuthylazine* a été limité dans un premier temps, en 1993, à 1 kg de substance active par hectare. En 1998, l'application de ces trois substances a ensuite été interdite dans les régions karstiques, puis l'interdiction d'utiliser de l'*atrazine* et de la *simazine* a été étendue aux zones S2 de protection des eaux souterraines en 2003. Depuis, le recours à la *terbuthylazine* a également été interdit dans les zones de protection S2 et S_h. Compte tenu de leur persistance, des résidus de ces substances, d'*atrazine* en particulier, resteront décelables dans les eaux souterraines pendant de longues années encore. En Allemagne, où la substance active est interdite depuis 1991 déjà, des résidus d'*atrazine* ont été détectés dans les eaux souterraines 25 ans après l'interdiction (LUBW 2018).

Bentazone : dépassement de l'exigence de l'OEaux

Depuis sa première homologation, en 1978, la *bentazone* est utilisée dans la culture de céréales, de pommes de terre, de maïs et de diverses légumineuses (haricots, petits pois, trèfle, soja). Entre 2007 et 2014, il a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (0,1 µg/l) à sept stations de mesure (tab. 11.10). Bien que le recours à cette substance active très mobile ne soit plus autorisé dans les zones de protection S2 et S_h (OFAG 2018), elle a néanmoins été décelée en 2014 à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l à plusieurs stations (fig. 11.10). En Suisse, les quantités de *bentazone* vendues annuellement sont inférieures à 10 t (OFAG 2016b).

Chloridazone : métabolites provenant de la culture de betterave

Depuis sa première homologation en 1964, le *chloridazone* est autorisé exclusivement dans la culture de betterave et les quantités annuelles vendues sont inférieures à 10 t (BLW 2016b). Les stations de mesure où le *chloridazone* ou ses métabolites *(desphényl-chloridazone* et *méthyl-desphényl-chloridazone)* ont été décelés se trouvent donc principalement dans la ceinture relativement étroite du Plateau qui correspond aux cultures de betterave sucrière (fig. 11.10). Le *chloridazone* est moyennement persistant et plutôt rare dans les eaux souterraines. Très mobiles et persistants, ses métabolites, notamment le *desphényl-chloridazone* (demi-vie supérieure à 100 jours ; PPDB 2009), ont au contraire été détectés souvent. De tous les résidus de produits phytosanitaires, ce sont ceux que l'on retrouve le plus fréquemment à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l (fig. 11.1). Des concentrations supérieures à 1 µg/l ont également été décelées, surtout dans de petits réservoirs d'eau souterraine, tels les aquifères molassiques.

2,6-dichlorobenzamide : métabolite présent dans les zones d'herbages et à proximité des agglomérations

Le *2,6-dichlorobenzamide* est un métabolite issu aussi bien de la décomposition de l'herbicide *dichlobénil* que de celle du fongicide *fluopicolide.* Le *dichlobénil* a été autorisé en Suisse de 1983 à 2013. Durant cette période, il a été utilisé à raison de 10 t par an (OFAG 2016b) dans la viticulture, comme désherbant autour des arbustes d'ornement (également dans le domaine privé) et pour lutter contre les lampés dans les prairies et les pâturages. Le *fluopicolide* est autorisé actuellement, mais il est appliqué en quantités nettement plus faibles et exclusivement dans la viticulture et dans la culture de pommes de terre. Le *dichlobénil* est connu pour être moyennement persistant et moyennement mobile et le *fluopicolide*, comme persistant et moyennement mobile. Le métabolite *2,6-dichlorobenzamide* est au contraire très mobile et très persistant, puisque sa demi-vie est supérieure à 100 jours (PPDB 2009). En Suisse, il a été détecté à 2 % des stations de mesure en concentrations supérieures à 0,1 µg/l et est surtout présent dans les zones urbanisées ainsi que dans les herbages (fig. 11.10). Aucun recul significatif des concentrations de *2,6-dichlorobenzamide* n'a encore été identifié jusqu'ici (fig. 11.10).

Dimétachlore : métabolites dans le karst

Le *diméthachlore,* un herbicide pour colza dont plusieurs tonnes sont vendues chaque année en Suisse (OFAG 2016b), est connu pour se dégrader assez bien, mais il est mobile. Deux de ses métabolites, *le diméthachlore ESA* et le *diméthachlore OXA,* détectés à quelques stations isolées, sont aussi relativement bien dégradables, mais peu sorbants et dès lors extrêmement mobiles. Les deux stations de mesure où ces deux métabolites ont été détectés en concentrations supérieures à 0,1 µg/l (tab. 11.10) se situent dans des aquifères karstiques. Or ces derniers sont particulièrement vulnérables à l'apport de substances étrangères.

Glyphosate : dépassements isolés

Le *glyphosate* est le produit phytosanitaire de loin le plus utilisé. Environ 200 t de cette substance active sont vendues chaque année en Suisse (OFAG 2019b). Il est utilisé comme herbicide non sélectif aussi bien dans l'agriculture et le long des voies ferrées et des routes que dans les jardins privés. Il est bien adsorbé sur les particules minérales du sol et n'est pas persistant (demi-vie d'environ 15 jours ; PPDB 2009). L'*AMPA,* son métabolite, est également peu mobile, mais possède une demi-vie de plus de 150 jours (PPDB 2009). Dans le cadre d'une étude pilote menée en 2016 et 2017, le *glyphosate* et l'*AMPA* ont chacun été détectés à deux stations de mesure en concentrations de plus de 0,1 µg/l. L'une de ces deux stations se situe dans un aquifère karstique et des valeurs accrues d'*AMPA* y ont été décelées à plusieurs reprises.

Isoproturon : dépassements isolés dans le karst

Herbicide pour céréale largement répandu, l'*isoproturon* était commercialisé par dizaines de tonnes chaque année et figurait ainsi parmi les 20 substances actives de produits phytosanitaires les plus vendues en Suisse depuis le début des relevés (OFAG 2016b). Assez bien biodégradable, il n'est que rarement présent dans les eaux souterraines (tab. 11.2). Les deux stations de mesure où l'*isoproturon* a été détecté en concentrations supérieures à 0,1 µg/l (tab. 11.5) se trouvent dans des aquifères karstiques, qui sont vulnérables à l'apport de produits phytosanitaires, c'est-à-dire de substances étrangères. L'*isoproturon* n'est plus autorisé depuis 2018.

Mécoprop : dépassements dans les zones urbanisées

Décelé en concentrations supérieures à l'exigence chiffrée de l'OEaux à deux stations de mesure en 2013 et en 2014, le *mécoprop* est autorisé comme *mécoprop-P* en agriculture par exemple dans la culture de céréales et dans celle de fruits à pépins et à noyau. Son emploi est par ailleurs autorisé dans la lutte contre les lampés dans les prairies et les pâturages. Le *mécoprop* est également utilisé sur les gazons d'ornement et les terrains de sport ainsi que sur les talus et les bandes de verdure le long des voies de communication. Il sert en outre à prévenir la pénétration des racines dans le revêtement bitumineux des toits plats. Cette substance active, dont les ventes annuelles dépassent 10 t en Suisse (OFAG 2016b), est très mobile mais se dégrade assez bien (demi-vie de 8 jours ; PPDB 2009). L'une des deux stations de mesure où l'exigence chiffrée de l'OEaux a été dépassée se situe au cœur d'une zone urbanisée. Le *mécoprop* a été décelé plutôt rarement dans les régions de grandes cultures.

Métamitrone : dépassements isolés dans le karst
Avec plus de 50 t écoulées par an, le *métamitrone* compte parmi les substances actives de produits phytosanitaires les plus vendues en Suisse (OFAG 2016b). Son application est notamment autorisée dans la culture de betteraves sucrière et fourragère et constitue dès lors un remplaçant au *chloridazone.* Le *métamitrone* est également utilisé dans la culture de légumes et d'herbes aromatiques. Les deux stations de mesure où cette substance active a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à une occasion (tab. 11.5) sont situées dans des aquifères karstiques. Selon l'estimation de l'OFAG et de l'OSAV (2017), son métabolite *désamino-métamitrone* ne devrait pas atteindre des concentrations accrues dans les eaux souterraines. Les données disponibles jusqu'ici, qui proviennent d'un petit nombre de stations, confirment ces prévisions.

Métazachlore : substance active et métabolites supérieurs à 0,1 µg/l
Depuis son homologation en 1982, le *métazachlore* est notamment utilisé dans la culture de colza, mais aussi de légumes et de petits fruits. La substance active, dont quelques tonnes seulement sont appliquées en Suisse chaque année (OFAG 2016b), se dégrade assez rapidement (demi-vie de neuf jours ; PPDB 2009). Entre 2007 et 2014, le *métazachlore* a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à une seule station de mesure, mais lors de chaque prélèvement depuis 2013 (tab. 11.5). Cette station se trouve dans un aquifère en roches meubles moyennement productif en dehors des vallées alluviales. Le *métazachlore ESA,* un métabolite du *métazachlore,* se dégrade au contraire mal (demi-vie supérieure à 100 jours ; PPDB 2009) et se révèle de plus très mobile. Il a été détecté à des concentrations de plus de 0,1 µg/l à trois autres stations, mais n'a pas été analysé à toutes les stations du réseau. Selon les indications de l'OFAG et de l'OSAV (2017), on ne peut pas exclure que d'autres métabolites du *métazachlore* soient présents dans les eaux souterraines. L'application de la substance active n'est plus autorisée dans les zones S2 et S_h de protection des eaux souterraines.

Métolachlore : plusieurs dépassements de l'exigence de l'OEaux ; métabolites souvent supérieurs à 0,1 µg/l
Le *métolachlore,* ou plutôt l'isomère *S-métolachlore,* est autorisé en Suisse depuis 1997 pour la culture du maïs, de la betterave et de diverses cultures spéciales (tournesol, soja, légumes). Son application n'est cependant plus autorisée dans les zones S2 et S_h de protection des eaux souterraines. Avec plusieurs dizaines de tonnes vendues chaque année, la substance active figure depuis 1999 parmi les produits phytosanitaires les plus commercialisés en Suisse (OFAG 2016b). Les concentrations du *métolachlore* ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (0,1 µg/l) dans deux à quatre stations de mesure chaque année (tab. 11.5). Entre 2007 et 2014, son métabolite *métolachlore ESA* a été détecté à 50 stations au total à des concentrations supérieures à 0,1 µg/l. Alors que la substance active *S-métolachlore* se dégrade relativement bien, son métabolite *métolachlore ESA* est très persistant (demi-vie de plus de 100 jours ; PPDB 2009) et aussi très mobile, car il s'adsorbe mal sur les particules du sol. Le nombre des stations où le *métolachlore ESA* et un autre métabolite, le *métolachlore OXA,* ont été décelés a plus que doublé entre 2009 et 2013. Cette hausse pourrait s'expliquer par une utilisation accrue du *métolachlore* sur les cultures de maïs, en particulier après la radiation de l'*atrazine* de la liste des substances autorisées.

N,N-diméthylsulfamide : métabolite problématique
Le *N,N-diméthylsulfamide (DMS)* est issu de la décomposition de deux substances actives : le *tolylfluanide* et le *dichlofluanide.* Si le *dichlofluanide* n'est désormais autorisé que comme agent de préservation du bois, il a été employé comme produit phytosanitaire jusqu'en 2005. Le *tolylfluanide* a été utilisé jusqu'en 2007, à raison d'une quantité allant jusqu'à 10 t par an, comme fongicide dans la viticulture, l'arboriculture et la culture maraîchère. Depuis cette année-là, son application n'est plus autorisée. Les deux substances actives se dégradent rapidement pour constituer du *N,N-diméthylsulfamide*. La vigne et les arbres fruitiers sont toujours cultivés dans le bassin d'alimentation des stations de mesure où ce métabolite a dépassé une concentration de 0,1 µg/l. Il a de plus été détecté à plusieurs reprises, mais à des concentrations plus faibles, directement dans des zones urbanisées ainsi qu'à une station dont le bassin d'alimentation est situé en pleine forêt. Bien que le *N,N-diméthylsulfamide* soit

considéré comme non toxique, sa présence dans les eaux souterraines pose problème. En effet, lors du traitement d'eau potable avec de l'ozone, le *N,N-diméthylsulfamide* peut être transformé en *N-nitrosodiméthylamine (NDMA),* qui est considéré comme génotoxique et cancérogène (Schmidt et Brauch 2008).

11.5.4 Monitoring

Élément clé du monitoring à long terme de NAQUA

Les produits phytosanitaires revêtent une importance particulière dans le monitoring à long terme de NAQUA. Puisqu'ils sont épandus sciemment et appliqués en grandes quantités, leur impact sur l'environnement et les eaux souterraines doit faire l'objet d'un suivi ciblé. Un relevé des résidus de produits phytosanitaires dans le sol est prévu dans le cadre du plan d'action Produits phytosanitaires (Conseil fédéral 2017). Il contribuera également à recenser de manière représentative la contamination totale de l'environnement due à l'emploi de produits phytosanitaires. Les activités de ce relevé seront menées en coordination avec le monitoring de NAQUA.

Informations issues de la procédure d'homologation

L'évolution du marché des produits phytosanitaires constitue un défi particulier pour le monitoring. Pour identifier sans cesse les nouvelles substances qui sont susceptibles d'atteindre les eaux souterraines, il est indispensable d'avoir systématiquement accès aux informations issues de la procédure d'homologation. Depuis 2017, l'OFAG et l'OSAV enregistrent de manière systématique, au moment de l'homologation ou du renouvellement de l'homologation (« réévaluation ») des substances actives, les métabolites qui pourraient atteindre des concentrations de plus de 0,1 µg/l et de 1 µg/l, respectivement, dans les eaux souterraines. Cette vue d'ensemble est régulièrement mise à jour et publiée (OFAG/OSAV 2019).

Screening de résidus de produits phytosanitaires

Pour identifier les nouvelles substances qui revêtent effectivement une pertinence pour les eaux souterraines, un screening à large échelle pour dépister les résidus de produits phytosanitaires, et les micropolluants en général, s'est révélé essentiel. Après une première étude pilote menée en 2007 et 2008 (chap. 15), un nouveau « target-screening » a débuté en 2017 en collaboration avec l'Eawag. Environ 200 substances actives de produits phytosanitaires sont ainsi analysées à des stations sélectionnées. Dans le cadre d'un « suspect-screening », les échantillons prélevés font en outre l'objet d'un examen portant sur environ 1000 métabolites de produits phytosanitaires, dont la liste a été établie à partir des dossiers d'homologation accessibles au public (Latino et al. 2017). Les métabolites que l'OFAG et l'OSAV (OFAG/OSAV 2019) estiment susceptibles d'atteindre les eaux souterraines seront si possible inclus dans ce screening.

Enquête sur l'utilisation de produits phytosanitaires très onéreuse

Les relations entre l'emploi de produits phytosanitaires dans le bassin d'alimentation et la présence de leurs résidus dans les eaux souterraines sont complexes. Pour mieux les comprendre, il serait utile de connaître les substances actives utilisées dans le bassin d'alimentation de chaque station de mesure ainsi que de savoir quand et en quelle quantité elles sont appliquées. L'étude pilote « Dynamique des produits phytosanitaires » (2010/2011) a cependant montré que le recensement de ces données spécialement pour NAQUA est très onéreux, de sorte qu'il n'est actuellement pas effectué dans le monitoring à long terme.

Intensifier l'échantillonnage dans le karst

La pollution – surtout à court terme – par des résidus de produits phytosanitaires et en particulier par les substances actives des régions karstiques est sans doute sous-estimée. Un à deux prélèvements par station de mesure et par an ne suffisent pas pour déterminer avec une précision suffisante la variabilité qui prévaut sur ces sites. Un échantillonnage ciblé des stations karstiques, moyennant une résolution temporelle plus élevée, est dès lors prévu dans le cadre du plan d'action Produits phytosanitaires (Conseil fédéral 2017).

12 Composés organiques volatils

12.1 Bases

Composés organiques volatils
Les composés organiques volatils (COV) sont des composés carbonés qui s'évaporent en raison de leur pression de vapeur élevée, c'est-à-dire leur point d'ébullition très bas. L'expression englobe de nombreuses substances appartenant à différents groupes, tels les *hydrocarbures halogénés volatils* (HHV) ou les *hydrocarbures aromatiques monocycliques* (HAM), ainsi que des substances individuelles comme le *naphtalène*, le *MTBE (méthyl-tert-butyléther)* ou *l'ETBE (éthyl-tert-butyléther)*.

Hydrocarbures halogénés volatils
Les hydrocarbures halogénés volatils (HHV) sont des composés où un ou plusieurs atomes d'hydrogène sont remplacés par des halogènes (surtout du fluor, du chlore et du brome). Ceux qui contiennent pour seul halogène du chlore sont également appelés hydrocarbures chlorés (HCC). L'industrie et l'artisanat utilisent les HHV principalement pour le nettoyage chimique, comme solvant et dans la fabrication de plastiques.

Hydrocarbures aromatiques monocycliques
Les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) sont dotés d'un cycle benzénique, à l'instar du *benzène*, du *toluène*, de l'*éthylbenzène* et du *xylène* (BTEX). Différents HAM, spécialement les BTEX, entrent dans la composition de l'essence et, en plus petites quantités, dans celle d'autres produits pétroliers tels que l'huile de chauffage, le diesel ou le kérosène. Ils sont en outre utilisés comme solvants et, dans l'industrie chimique, comme produits de base pour la synthèse de différents composés organiques carbonés.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques
Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont constitués d'au moins deux cycles benzéniques accolés. Le plus simple des HAP est le *naphtalène*, qui comprend justement deux de ces cycles. Présente dans le diesel et l'huile de chauffage, cette substance est également utilisée comme base pour la synthèse de solvants et de matières plastiques.

MTBE et ETBE
Le *MTBE* et l'ETBE sont des additifs de l'essence, dont ils augmentent le pouvoir antidétonant. Ils sont venus remplacer les composés organiques au plomb et parfois aussi le benzène et d'autres hydrocarbures aromatiques dans les carburants. Le *MTBE* est en outre utilisé dans l'industrie comme solvant et comme agent d'extraction.

1,4-dioxane
Le *1,4-dioxane* est un composé organique hétérocyclique. Il était autrefois utilisé en grandes quantités comme stabilisateur pour le stockage et le transport de *1,1,1-trichloroéthane*. Aujourd'hui, il sert surtout de solvant et de dégraissant.

Apport dans les eaux souterraines
Les COV sont émis dans l'environnement surtout lors du maniement de carburants et de solvants, de même qu'à la suite d'accidents, et peuvent ainsi aboutir dans les eaux souterraines. Ces substances peuvent en outre parvenir dans l'atmosphère sous la forme de résidus de combustion ou du fait de la volatilisation de carburants et de solvants. Elles peuvent ensuite polluer les eaux souterraines par l'infiltration des précipitations et des eaux superficielles dans le sol. Quant aux HCC qui polluent les eaux souterraines, ils proviennent souvent de sites contaminés.

OEaux : 1 µg/l pour les HHV et les HAM
Selon les objectifs écologiques définis à l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances synthétiques persistantes. Lorsqu'elles sont utilisées comme eau potable ou destinées à l'être, l'annexe 2 OEaux fixe en outre une exigence chiffrée de 1 µg/l pour les HHV et les HAM (valeur applicable séparément à chaque substance).

OEaux : 0,1 µg/l pour les HAP
Pour les HAP, une exigence chiffrée additionnelle est fixée dans l'annexe 2 OEaux. Leur concentration dans les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être ne doit pas dépasser 0,1 µg/l (par substance).

Valeur indicative : 2 µg/l pour le MTBE
L'OEaux ne contient pas d'exigences chiffrées s'appliquant spécifiquement au *MTBE*, à l'*ETBE* et au *1,4-dioxane* dans les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. Ces eaux doivent cependant respecter, le cas échéant après un procédé de traitement simple, les exigences de la législation sur les denrées alimentaires. Les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004) définissent une valeur indicative de 2 µg/l pour le *MTBE* signalant une éventuelle pollution anthropique problématique. S'agissant de l'eau potable, l'ordonnance du DFI sur l'eau potable des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) fixe une valeur maximale de 5 µg/l pour la somme des *MTBE* et *ETBE* ainsi que de 6 µg/l pour le *1,4-dioxane.* Puisque l'OEaux renvoie à l'OPBD, les valeurs maximales de celle-ci s'appliquent aux eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être au même titre que des exigences chiffrées de l'OEaux.

Indicateur
Les HHV, les HAM et les autres composés organiques volatils sont actuellement réunis dans l'indicateur « COV dans les eaux souterraines » de l'OFEV. Les relevés, à long terme et à l'échelle nationale, de la concentration des différents composés dans le cadre de NAQUA permettent d'observer l'état et l'évolution de la qualité des eaux souterraines en Suisse et de repérer des impacts problématiques de l'industrie, de l'artisanat et des zones urbaines. Certaines données sont en outre transmises à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE ; par exemple AEE 2018).

12.2 Relevé des données

Relevés à l'échelle nationale
Les données nationales concernant les HAM dans les eaux souterraines sont recueillies depuis 2002 dans le cadre du monitoring à long terme de NAQUA. Les HHV, un HAP (naphtalène) et le MTBE le sont depuis 2006, l'ETBE depuis 2007. À chacune des quelque 550 stations de mesure des modules TREND et SPEZ (chap. 3), des échantillons sont prélevés une à quatre fois par an, puis analysés pour détecter les HHV, les HAM et d'autres COV. La fréquence des prélèvements dépend d'une part de la contamination connue de ces stations et d'autre part de leur exposition potentielle à ces substances. Les stations situées en zones urbanisées sont ainsi analysées au moins deux fois l'an.

35 substances dans le monitoring à long terme
Le monitoring à long terme englobe au total 24 HHV, 8 HAM, 1 HAP ainsi que le MTBE et l'ETBE (tab. 12.1 à 12.4). En plus de ces paramètres, plusieurs services cantonaux spécialisés transmettent à l'OFEV les résultats d'analyses portant sur d'autres COV (le *1,4-dioxane,* p. ex.).

Étude pilote « 1,4-dioxane » 2011/2012
Une étude pilote concernant le *1,4-dioxane* a été réalisée en 2011 et 2012 dans le cadre du module TREND afin d'obtenir de premières données sur l'importance de cette substance pour les eaux souterraines. Deux analyses relatives au *1,4-dioxane* ont été effectuées à chacune des 50 stations de mesure de ce module durant la période considérée.

Statistiques : concentrations maximales
Les évaluations statistiques se basent sur la concentration maximale de chaque substance enregistrée par station de mesure et par an. Les analyses portent sur les données disponibles validées du monitoring à long terme jusqu'à fin 2014, ainsi que sur les résultats de l'étude pilote « 1,4-dioxane » 2011/2012.

Séries chronologiques
L'éventail de substances faisant l'objet du monitoring à long terme est régulièrement adapté aux changements du contexte général et ne cesse donc d'évoluer. Voilà qui restreint l'appréciation globale de l'influence potentielle des COV sur la qualité des eaux souterraines au fil des ans. L'analyse de l'évolution sur le long terme se limite par conséquent toujours à quelques substances. L'évolution de ces dernières est évaluée uniquement sur la base des résultats provenant des stations de mesure échantillonnées au moins une fois par an durant la période considérée.

Tableau 12.1

Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Substance	Monitoring à long terme	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
	Début		Concentration				Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1 µg/l	> 1 µg/l	> 1 µg/l
HHV aliphatiques							
1,1-dichloroéthane	2006	527	522	5	1	–	–
1,1-dichloroéthène	2006	527	524	3	–	–	–
1,2-dichloroéthane	2006	527	525	2	1	–	–
1,2-dichloropropane	2006	527	527	–	–	–	–
1,1,1-trichloroéthane	2006	527	494	33	13	3	0,6
1,1,2,2-tétrachloroéthane	2006	527	526	1	–	–	–
Bromochlorométhane*	–	355	354	1	–	–	*
Bromodichlorométhane	2006	527	525	2	1	–	–
Bromométhane*	–	488	484	4	1	–	*
Dibromochlorométhane	2006	527	527	–	–	–	–
Dibromométhane	2006	527	527	–	–	–	–
Dichlorodifluorométhane	2006	527	520	7	6	1	0,2
Chloroéthène	2006	527	527	–	–	–	–
cis-1,2-dichloroéthène	2006	527	519	8	5	–	–
Dichlorométhane	2006	524	523	1	–	–	–
Hexachlorobutadiène	2006	527	526	1	1	–	–
Tétrachloroéthène	2006	527	449	78	60	17	3,2
Tétrachlorométhane	2006	527	515	12	2	–	–
Tribromométhane	2006	527	527	–	–	–	–
Trichloroéthène	2006	527	479	48	38	–	–
Trichlorofluorométhane	2006	527	519	8	4	1	0,2
Trichlorométhane	2006	527	482	45	17	–	–
HHV aromatiques							
1,2-dichlorobenzène	2006	527	526	1	1	1	0,2
1,2,3-trichlorobenzène	2006	527	526	1	1	–	–
1,2,4-trichlorobenzène*	–	466	465	1	1	1	0,2
1,3-dichlorobenzène*	–	376	375	1	–	–	*
1,3,5-trichlorobenzène*	–	12	11	1	1	–	*
1,4-dichlorobenzène*	–	376	375	1	–	–	*
Bromobenzène	2006	527	527	–	–	–	–
Chlorobenzène	2006	527	527	–	–	–	–
Total HHV		**527**	**394**	**133**	**98**	**20**	**3,8**

Exigence chiffrée de l'OEaux : 1 µg/l

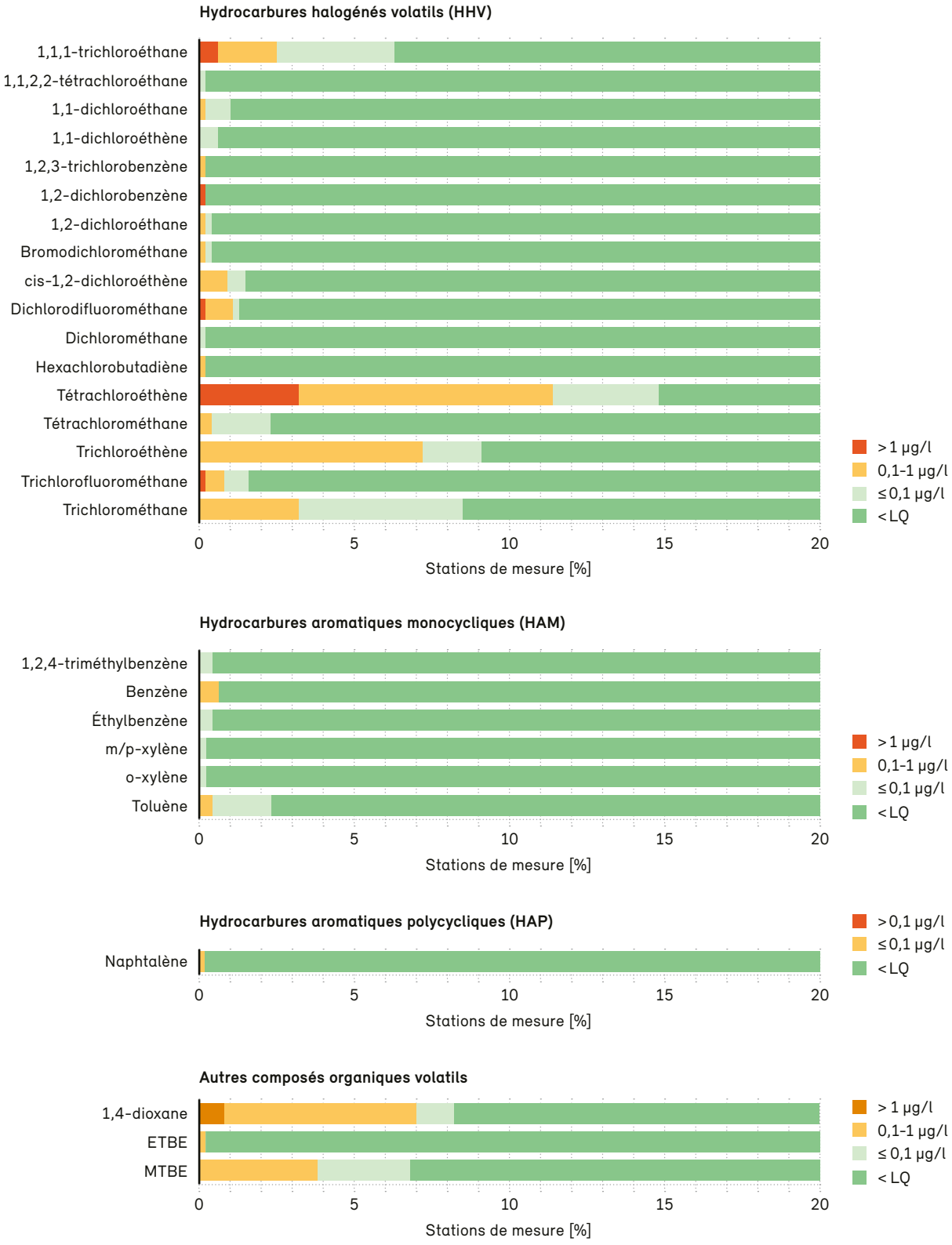
LQ limite de quantification

* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

Figure 12.1

Composés organiques volatils (COV) dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Sont illustrées toutes les substances décelées en 2014 dans le cadre du monitoring à long terme. LQ : limite de quantification.



12.3 État

12.3.1 Vue d'ensemble

HHV : dépassements fréquents de l'exigence de l'OEaux

En 2014, l'exigence chiffrée de l'OEaux pour les HHV (1 µg/l) a été dépassée à 20 stations de mesure (tab. 12.1), soit à près de 4 % des stations. Ces substances ont été détectées à 25 % des stations.

HHV : le tétrachloroéthène dépasse le plus souvent l'exigence de l'OEaux

En 2014, six HHV différents ont été détectés dans les eaux souterraines à des concentrations de plus de 1 µg/l (tab. 12.1). C'est le *tétrachloroéthène* qui a dépassé le plus souvent, et de loin, l'exigence chiffrée de l'OEaux (fig. 12.1). Ses concentrations étaient supérieures à 1 µg/l à 17 stations de mesure, soit plus de 3 % des stations. Le *1,1,1-trichloroéthane* n'a pas respecté l'exigence chiffrée de l'OEaux à trois stations. Quatre substances – le *dichlorodifluorométhane*, le *trichlorofluorométhane*, le *1,2-dichlorobenzène* et le *1,2,4-trichlorobenzène* – ont chacune dépassé la valeur de 1 µg/l à une station.

HHV : 23 différentes substances détectées

De plus, 17 autres HHV ont été détectés en 2014 à des concentrations inférieures à 1 µg/l. Au total, 23 HHV différents ont donc été décelés dans les eaux souterraines.

HAM : aucun dépassement de l'exigence de l'OEaux

En 2014, les HAM n'ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (1 µg/l) dans aucune station de mesure (tab. 12.2). Six substances différentes de ce groupe ont été détectées à 3 % à peine des stations des eaux souterraines.

HAP : aucun dépassement de l'exigence de l'OEaux

Les HAP n'ont pas non plus dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (fixée à 0,1 µg/l) en 2014 (tab. 12.3). Des résidus d'HAP, plus précisément de *naphtalène* et de deux HAP apparentés, ont été détectés à une seule station de mesure.

MTBE : aucun dépassement de la valeur indicative

La valeur indicative de 2 µg/l pour le *MTBE* selon les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines n'a été dépassée à aucune station de mesure en 2014. Cette substance a cependant été détectée à 36 stations, soit quelque 7 % de toutes les stations. L'*ETBE* a été décelé à une station et le *TBA* à huit. La valeur maximale de 5 µg/l admise par l'OPBD pour la somme du *MTBE* et de l'*ETBE* n'a pas été dépassée.

Tableau 12.2

Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Substance	Monitoring à long terme	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
	Début		Concentration				Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1 µg/l	> 1 µg/l	> 1 µg/l
1,2,4-triméthylbenzène	2006	527	525	2	–	–	–
1,3,5-triméthylbenzène	2006	527	527	–	–	–	–
Benzène	2002	527	524	3	3	–	–
Éthylbenzène	2002	527	525	2	–	–	–
m/p-xylène	2002	527	526	1	–	–	–
o-xylène	2002	527	526	1	–	–	–
Styrène	2006	527	527	–	–	–	–
Toluène	2002	527	515	12	2	–	–
Total HAM		**527**	**514**	**13**	**5**	**–**	**–**

Exigence chiffrée de l'OEaux : 1 µg/l
LQ limite de quantification

Tableau 12.3

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Substance	Monitoring à long terme	Stations de mesure [nombre]				Stations de mesure [%]
	Début		Concentration			Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1 µg/l	> 0,1 µg/l
1-méthylnaphtalène*	–	12	11	1	–	*
2-méthylnaphtalène*	–	12	11	1	–	*
Naphtalène	2006	527	526	1	–	–
Total HAP		**527**	**526**	**1**	**–**	**–**

Exigence chiffrée de l'OEaux : 0,1 µg/l

LQ limite de quantification
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

Tableau 12.4

1,4-dioxane, ETBE, MTBE et TBA dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA.

Substance	Monitoring à long terme	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
	Début		Concentration				Concentration
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1 µg/l	> 1 µg/l	> 1 µg/l
1,4-dioxane*	–	259	238	21	18	2	*
ETBE (éthyl-tert-butyléther)	2007	527	526	1	1	–	–
MTBE (méthyl-tert-butyléther)	2002	527	491	36	20	–	–
TBA (tert-butylalcool)*	–	105	97	8	2	–	*

LQ limite de quantification
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

1,4-dioxane : aucun dépassement de la valeur de l'OPBD

Le *1,4-dioxane* a été détecté à 21 des 259 stations de mesure NAQUA échantillonnées en 2014 (tab. 12.4). La concentration était supérieure à 1 µg/l à deux d'entre elles. La valeur maximale de 6 µg/l fixée dans l'OPBD n'a été dépassée à aucune des stations.

12.3.2 Répartition régionale

HHV : concentrations supérieures à 1 µg/l surtout sur le Plateau

Les HHV ont été détectés essentiellement sur le Plateau, mais aussi dans le Jura (fig. 12.2), où se situent une grande partie des aires d'exploitation polluées selon le cadastre établi (Jordi 2015 ; OFEV 2018b). Ces substances ont également été décelées à quelques endroits en Valais et au Tessin. Des concentrations supérieures à 1 µg/l ont été mesurées surtout sur le Plateau et à quelques stations du Jura.

HAM : avant tout dans la région de Bâle

Des HAM ont été détectés presque exclusivement dans la région de Bâle (fig. 12.3). Les deux autres stations de mesure concernées se situent sur le Plateau et dans les Alpes, l'une à proximité d'une route.

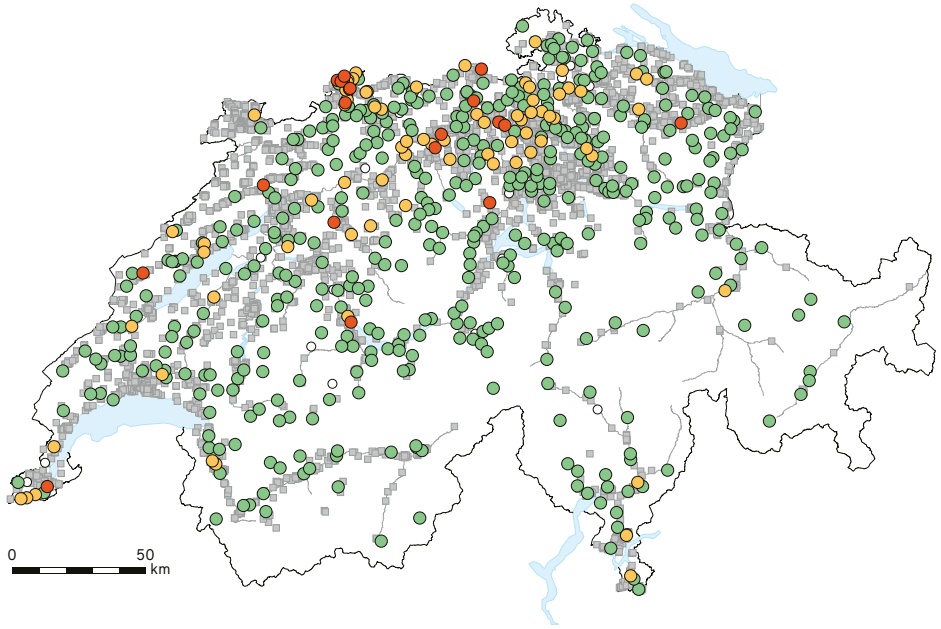
MTBE et ETBE : détectés ponctuellement

Le *MTBE*, l'*ETBE* et/ou le *TBA* ont été détectés ponctuellement dans toute la Suisse (fig. 12.4).

Figure 12.2

Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2014) et aires d'exploitation polluées par des HCC

Valeurs maximales par station de mesure NAQUA. Aires d'exploitation où l'on soupçonne une pollution par des hydrocarbures chlorés (HCC) selon le cadastre des sites pollués (OFEV 2018b). LQ : limite de quantification.



Hydrocarbures halogénés volatils (HHV)

< LQ ou ≤ 0,1 µg/l
0,1-1 µg/l
> 1 µg/l
pas de données

Sites contaminés

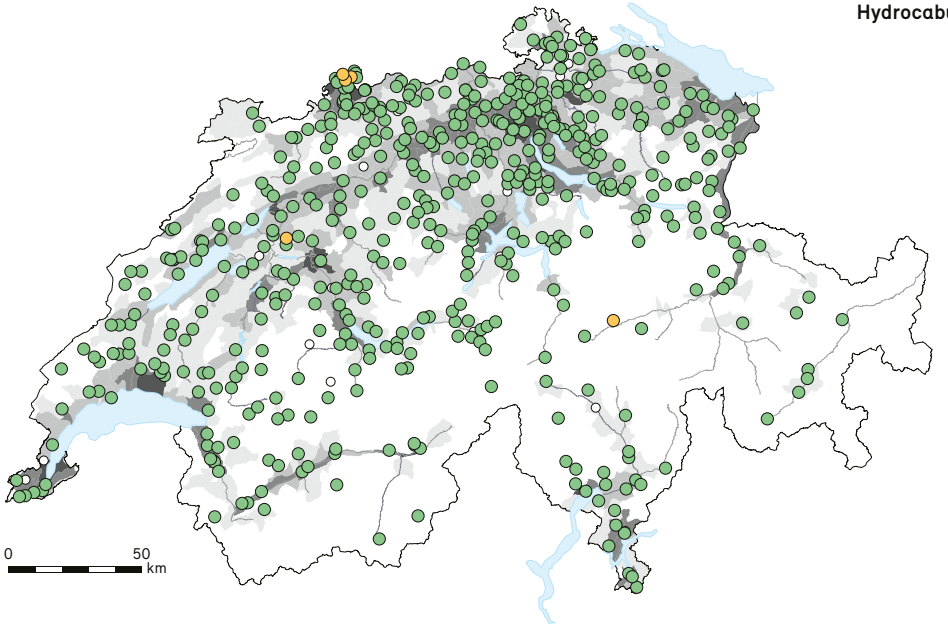
Aires d'exploitation polluées par des HCC

Exigence chiffrée de l'OEaux : 1 µg/l

Figure 12.3

Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées

Concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. LQ : limite de quantification.



Hydrocabures aromatiques monocycliques (HAM)

< LQ ou ≤ 0,1 µg/l
0,1-1 µg/l
> 1 µg/l
pas de données

Surfaces urbanisées denses

< 5 %
5-10 %
10-20 %
20-40 %
> 40 %

Exigence chiffrée de l'OEaux: 1 µg/l

Figure 12.4

MTBE, ETBE et TBA dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées

Concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. LQ : limite de quantification.

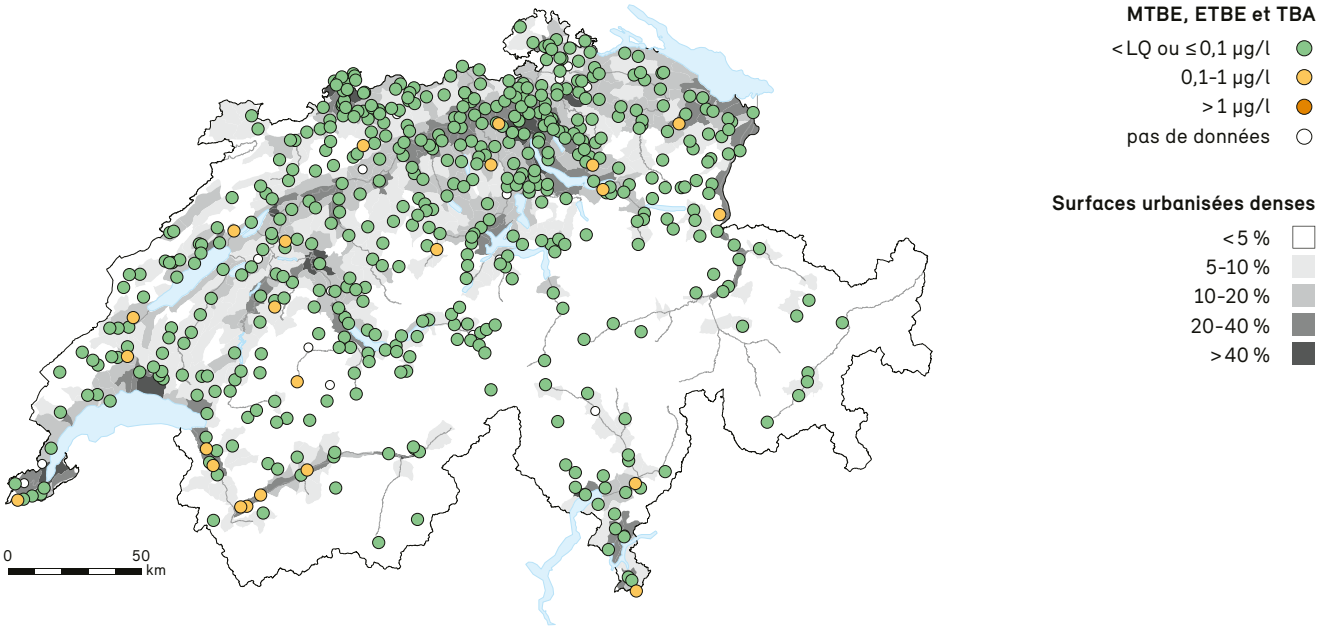
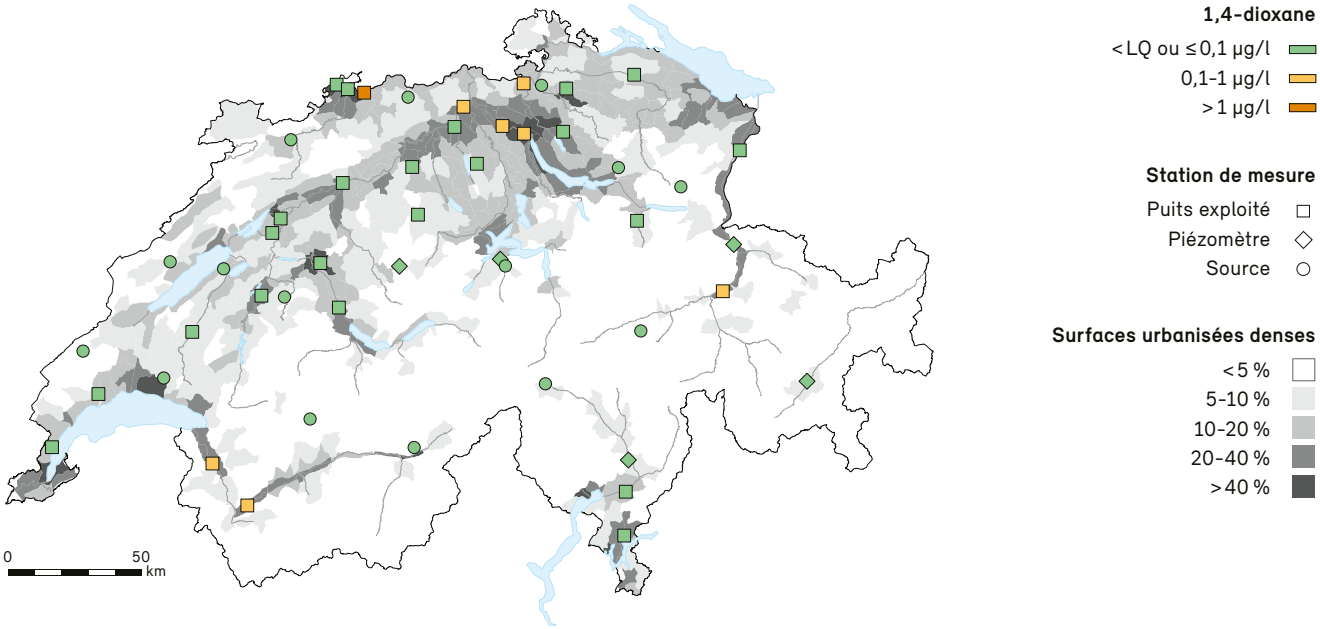


Figure 12.5

1,4-dioxane dans les eaux souterraines (2011/2012) et surfaces urbanisées

Concentration maximale de 1,4-dioxane par station de mesure NAQUA. Stations du module TREND. Étude pilote 2011/2012. LQ : limite de quantification.



1,4-dioxane : le long de cours d'eau

Le *1,4-dioxane* a été détecté dans les eaux souterraines surtout le long de la Limmat, du Rhin et du Rhône ou de leurs affluents (fig. 12.5).

12.3.3 Utilisation du sol

HHV : dépassement de l'exigence de l'OEaux

C'est dans les zones urbanisées que les HHV ont été détectés de loin le plus souvent et aux concentrations les plus élevées. L'exigence chiffrée de l'OEaux (1 µg/l) a été dépassée à 16 % des stations de mesure dont le bassin d'alimentation est caractérisé par l'utilisation principale du sol « zones urbanisées et voies de communication » (fig. 12.6). Les substances en question ont été détectées à 70 % de ces stations. Aux stations où l'utilisation principale du sol entre dans les catégories « grandes cultures », « production herbagère et bétail » ou « forêt », l'exigence chiffrée de l'OEaux a en revanche rarement été dépassée. Vu la forte imbrication des différentes utilisations du sol dans le bassin d'alimentation des stations, même la présence de petites surfaces polluées peut y détériorer de façon considérable la qualité des eaux souterraines. Dans les régions isolées, non utilisées, aucun HHV n'a été détecté.

HAM : un peu plus fréquent en zone urbanisée

Rarement détectés dans l'ensemble, les HAM l'ont été un peu plus souvent dans les zones urbanisées. Ils ont été décelés à environ 5 % des stations de mesure dont le bassin d'alimentation est caractérisé par l'utilisation principale du sol « zones urbanisées et voies de communication ».

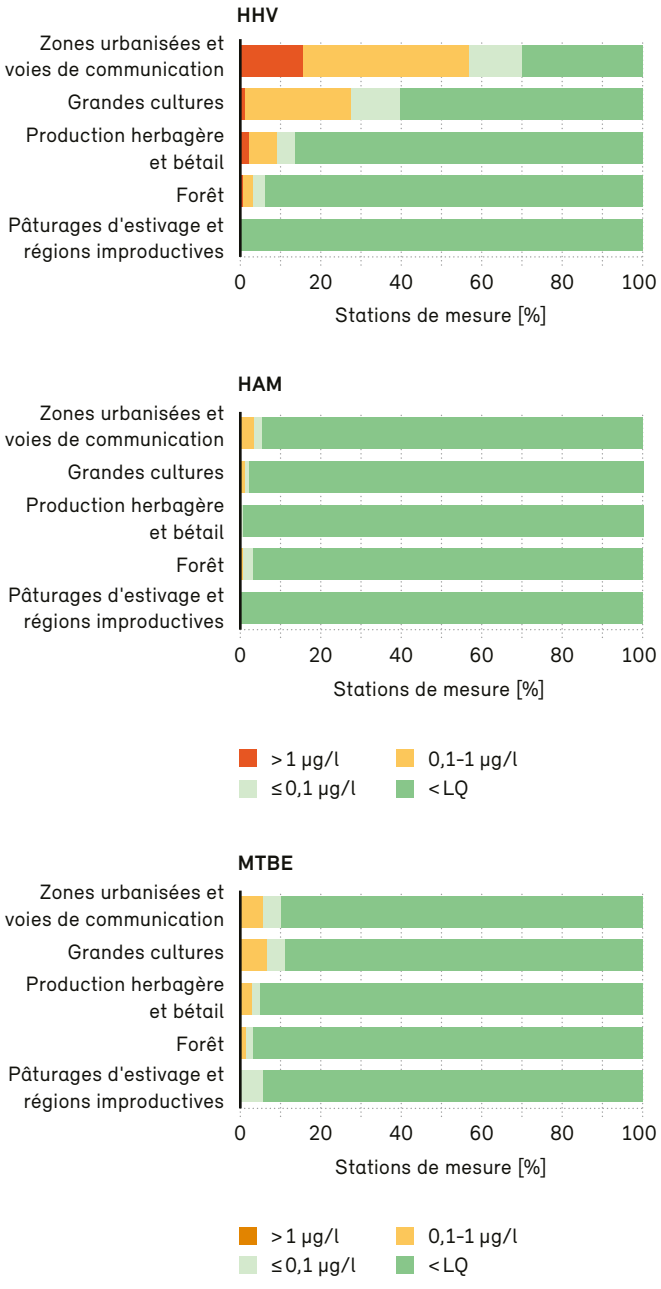
MTBE et ETBE : aucune tendance marquée

Le *MTBE* a été détecté à plus de 10 % des stations de mesure et à une fréquence similaire dans les zones urbanisées et les régions de grandes cultures. Il était également présent dans les eaux souterraines de 3 à 6 % des stations dont l'utilisation principale du sol est classée dans d'autres catégories.

Figure 12.6

Hydrocarbures halogénés volatils (HHV), hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et MTBE dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Base : concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Nombre de stations par utilisation principale du sol : zones urbanisées et voies de communication : 90 ; grandes cultures : 91 ; production herbagère et bétail : 141 ; forêt : 158 ; pâturages d'estivage et régions improductives : 35. L'utilisation principale du sol est celle qui occupe la plus grande part de la superficie du bassin d'alimentation d'une station de mesure. LQ : limite de quantification.



12.4 Évolution

HHV : léger recul

Entre 2007 et 2014, le nombre de stations de mesure où les concentrations de HHV ont dépassé 1 µg/l a légèrement reculé (tab. 12.5). Durant cette période, ces substances ont été détectées dans 120 à 145 stations chaque année, soit dans environ 22 à 32 % d'entre elles.

HHV : souvent aux mêmes stations de mesure

Chaque année, trois à huit HHV différents ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux, fixée à 1 µg/l (tab. 12.6). Durant la période considérée, la plupart des HHV tendaient à être détectés à plusieurs reprises aux mêmes stations de mesure. Deux HHV ont régulièrement dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à plusieurs stations : le *1,1,1-trichloroéthane* et le *tétrachloroéthène*. Entre 2007 et 2014, le second a provoqué un dépassement à 32 stations et le premier à six. Durant cette période, des concentrations supérieures à 1 µg/l ont par ailleurs été enregistrées pour trois autres substances – *dichlorodifluorométhane*, *trichloroéthène* et *trichlorométhane* – auprès de trois à cinq stations. Le *trichlorofluorométhane*, le *1,2-dichlorobenzène* et le *1,2,4-trichlorobenzène* ont de plus régulièrement dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux à une seule station. Un seul dépassement a été enregistré pour le *1,3-dichloropropane*, le *cis-1,2-dichloroéthène*, le *dichlorométhane* et le *1,2,3-trichlorobenzène*.

Tableau 12.5

Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Base : concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA et par an. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Année	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
		Concentration [µg/l]				Concentration
	Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1	> 1	> 1 µg/l
2007	447	302	145	108	24	*
2008	503	367	136	109	23	*
2009	529	394	135	111	25	4,7
2010	531	395	136	107	25	4,7
2011	531	396	135	108	25	4,7
2012	531	403	128	98	19	3,6
2013	531	412	119	95	18	3,4
2014	527	394	133	98	20	3,8

Exigence chiffrée de l'OEaux : 1 µg/l

LQ limite de quantification
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

Léger recul du trichloroéthène et du 1,1,1-trichloroéthane

Le nombre de stations de mesure où le *trichloroéthène* et le *1,1,1-trichloroéthane* ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux a baissé entre 2003 et 2014, nettement pour le premier et légèrement pour le second (fig. 12.7). La détection de ces deux substances a également reculé d'une manière générale. Le *tétrachloroéthène* n'a cependant dénoté aucune tendance nette.

HAM : détecté ponctuellement à différentes stations

Entre 2007 et 2014, des HAM ont été détectés dans les eaux souterraines à des concentrations de plus de 1 µg/l au maximum à deux stations de mesure par année (tab. 12.7). Durant cette période, des substances de ce groupe ont été détectées dans environ 10 à 25 stations chaque année. Quatre HAM ont dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (tab. 12.6), mais chaque fois à des stations différentes. Le *toluène* a dépassé la concentration de 1 µg/l à trois stations au total, le *styrène* à deux et l'*éthylbenzène* ainsi que le *m/p-xylène* à une seule. Les stations concernées varient là encore.

Naphtalène : un seul dépassement

Le *naphtalène* (un HAP) a dépassé l'exigence chiffrée de l'OEaux (0,1 µg/l) une seule fois en 2008 et à une seule station de mesure.

MTBE : très variable et globalement en baisse

De 2007 à 2014, le *MTBE* a dépassé la valeur indicative des Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, soit 2 µg/l, à trois stations de mesure différentes d'une année à l'autre. Le nombre de stations où le MTBE a été détecté est globalement en baisse (fig. 12.7, tab. 12.6). L'*ETBE* et le *TBA* (non inclus dans le monitoring à long terme) n'ont atteint des concentrations supérieures à 1 µg/l que deux fois entre 2007 et 2014, chacun à une station au maximum (tab. 12.6). La valeur maximale

Tableau 12.6

Hydrocarbures halogénés volatils (HHV), hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et autres composés organiques volatils dans les eaux souterraines (2007 à 2014) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux ou à une concentration de 1 µg/l

Base : concentration maximale des différentes substances par station de mesure NAQUA et par an. Le tableau énumère toutes les substances qui ont été détectées à des concentrations supérieures à 1 µg/l.

Substance	Stations de mesure [nombre]								
	Concentration > 1 µg/l								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2007-2014
HHV aliphatiques									
1,1,1-trichloroéthane	5	4	4	6	4	3	4	3	6
1,2-dichloropropane*	–	1	–	–	–	–	–	–	1
cis-1,2-dichloroéthène	–	–	1	–	–	–	–	–	1
Dichlorodifluorométhane	2	2	2	3	1	1	–	1	4
Dichlorométhane	–	–	1	–	–	–	–	–	1
Tétrachloroéthène	20	17	19	19	20	16	14	17	32
Trichloroéthène	3	3	3	2	2	–	–	–	5
Trichlorofluorométhane	1	1	1	1	1	–	1	1	1
Trichlorométhane	–	1	2	1	1	–	1	–	3
HHV aromatiques									
1,2-dichlorobenzène	1	–	–	1	1	–	1	1	1
1,2,3-trichlorobenzène	1	–	–	–	–	–	–	–	1
1,2,4-trichlorobenzène*	1	–	–	1	–	–	1	1	1
HAM									
Éthylbenzène	1	–	–	–	–	–	–	–	1
m/p-xylène	–	–	1	–	–	–	–	–	1
Styrène	1	1	–	–	–	–	–	–	2
Toluène	–	1	1	–	–	–	1	–	3
Autres composés organiques volatils									
1,1,2,2-tétraméthoxyéthane*	/	/	/	/	/	/	1	/	1
1,4-dioxane*	/	/	/	/	2	1	–	2	4
ETBE	–	–	1	–	1	–	–	–	2
MTBE	1	2	3	1	–	1	–	–	7
TBA*	–	–	–	–	–	1	1	–	2

Exigence chiffrée de l'OEaux (HHV, HAM) : 1 µg/l

* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale
/ pas de données

Tableau 12.7

Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Base : concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Année	Stations de mesure [nombre]					Stations de mesure [%]
		Concentration [µg/l]				Concentration
	Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,1	> 1	> 1 µg/l
2007	447	434	13	6	1	*
2008	503	480	23	14	2	*
2009	529	514	15	10	1	0,2
2010	531	521	10	6	–	–
2011	531	521	10	3	–	–
2012	531	522	9	2	–	–
2013	531	521	10	6	2	0,4
2014	527	514	13	5	–	–

Exigence chiffrée de l'OEaux : 1 µg/l

LQ limite de quantification
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale

de 5 µg/l fixée par l'OPBD pour la somme du *MTBE* et de l'*ETBE* n'a jamais été dépassée.

1,4-dioxane

Le *1,4-dioxane*, qui n'a pas été analysé à l'échelle nationale, a été détecté dans les eaux souterraines à des concentrations supérieures à 1 µg/l à quatre stations de mesure (tab. 12.6). Durant la période de son observation (de 2011 à 2014), cette substance n'a dépassé à aucune station la valeur maximale de 6 µg/l fixée par l'OPBD.

12.5 Analyse

12.5.1 Hydrocarbures halogénés volatils

Atteinte à la qualité des eaux souterraines

Si les HAM, les HAP et les *MTBE/ETBE* ne constituent pas un problème d'ampleur nationale pour la qualité des eaux souterraines, ce n'est pas le cas des HHV. Ces derniers continuent de porter significativement atteinte à la qualité de ces eaux, dépassant l'exigence chiffrée de l'OEaux à 4 % des stations.

Aires d'exploitation et anciennes décharges

Les HHV présents dans les eaux souterraines proviennent, directement ou indirectement, de la production industrielle et de l'utilisation jadis très répandue de ces substances dans l'industrie et l'artisanat. C'est surtout au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle que ces composés sont parvenus dans l'environnement en grandes quantités, en raison de la négligence avec laquelle ils ont été manipulés lorsqu'ils servaient de solvants et de détergents. Les HHV polluent ainsi les eaux souterraines à proximité de nombreuses aires d'exploitation et d'anciennes décharges.

HHV à la base des aquifères

Les HHV sont très peu biodégradables et donc très persistants dans l'environnement. Qui plus est, leur solubilité dans l'eau est faible. Si de grandes quantités de ces substances parviennent dans le sous-sol, elles peuvent former une phase liquide distincte pouvant se déplacer dans les eaux souterraines et, leur densité étant élevé, s'accumuler à la base de l'aquifère. Compte tenu de ces propriétés, il est difficile d'échantillonner les eaux souterraines de manière représentative.

Tétrachloroéthène

Le *tétrachloroéthène* est de loin l'HHV le plus fréquent à dépasser l'exigence chiffrée de l'OEaux (tab. 12.1, fig. 12.1). Moins volatil et moins soluble que les autres substances de son groupe, il séjourne plus longtemps dans les eaux souterraines. Voilà pourquoi les détections de *tétrachloroéthène* dans les eaux souterraines n'ont pas reculé ces dernières années, contrairement à ce qui s'est produit pour le *trichloroéthène* (fig. 12.7).

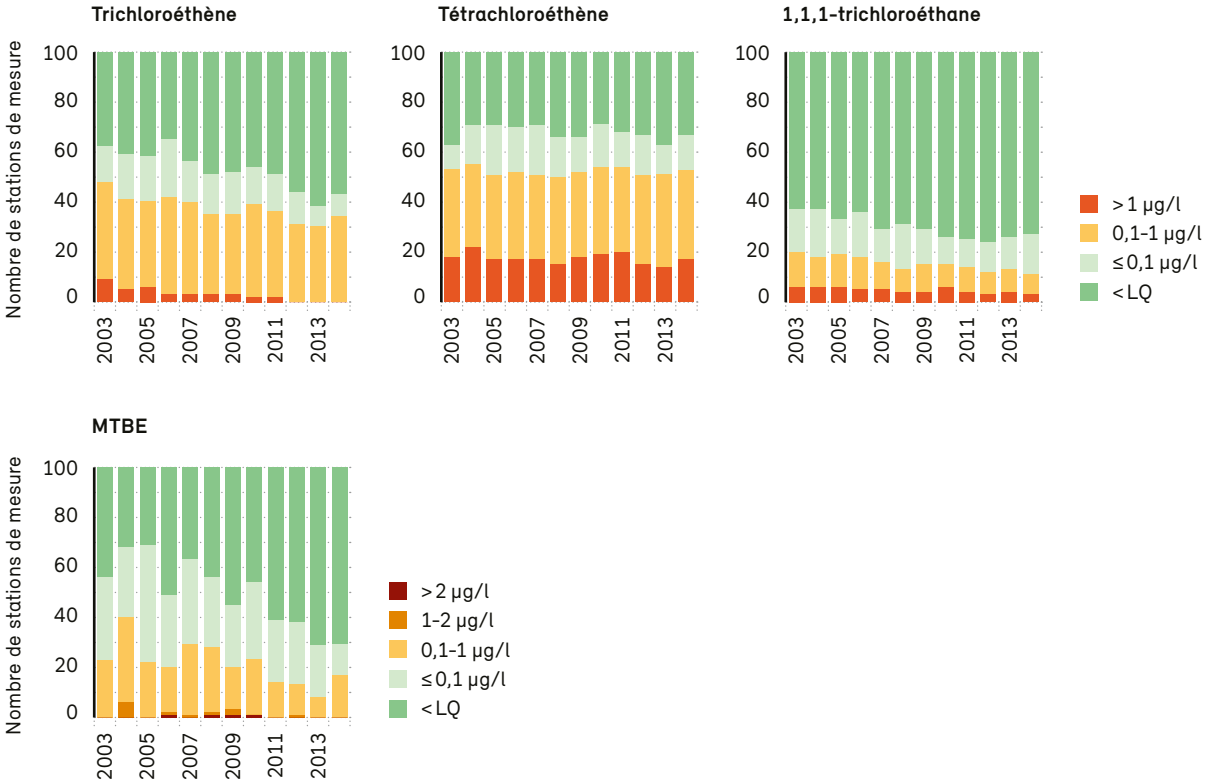
Restriction ou interdiction de l'utilisation

L'utilisation des HHV est désormais strictement réglementée. Depuis le milieu des années 1980, ces substances ne peuvent plus être utilisées que dans des installations fermées, où elles sont récupérées et recyclées. En outre, l'utilisation de plusieurs d'entre elles a été interdite ou fortement restreinte, ou alors elles ont été remplacées par des solvants moins problématiques. L'usage de

Figure 12.7

Trichloroéthène, tétrachloroéthène, 1,1,1-trichloroéthane et MTBE dans les eaux souterraines (2003 à 2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Seules les stations échantillonnées au moins une fois par an durant la période considérée ont été prises en compte. Nombre de stations par substance : trichloroéthène: 308 ; tétrachloroéthène : 307 ; 1,1,1-trichloroéthane ; 308 ; MTBE : 346. LQ : limite de quantification.



tétrachloroéthène et de *trichloroéthène* est par exemple interdit depuis 2005 dans les produits de nettoyage de textiles et autres détergents si ces derniers sont évacués avec les eaux usées. Le *tricholorométhane* n'est plus admis que dans des systèmes fermés. Le *1,1,1-trichloroéthane*, le *dichlorodifluorométhane* et le *trichlorofluorométhane* sont quant à eux interdits à quelques exceptions près depuis 1996. Grâce à ces mesures, la production et l'utilisation des HHV sont en diminution depuis deux décennies environ (OFEV 2009b). Jusqu'ici, seules les détections du *trichloroéthène* et du *1,1,1-trichloroéthane* dans les eaux souterraines ont pourtant reculé.

Sites contaminés

Aujourd'hui encore, des HHV continuent cependant de parvenir dans les eaux souterraines à partir d'anciennes aires d'exploitation, telles des entreprises de nettoyage chimique, des entreprises métallurgiques ou textiles ainsi que des imprimeries. Des déchets de production contenant des HHV sont en outre stockés dans des décharges. La Suisse compte actuellement quelque 38 000 sites contaminés (OFEV, 2018b), dont 1100 sont soupçonnés de contenir des HCC pouvant présenter un danger pour l'environnement (OFEV, non publié). Ces sites-là de même que tous les autres devraient être progressivement assainis d'ici à 2040 (OFEV 2018c) et il ne faut pas s'attendre à une diminution significative de la charge totale en HHV dans les eaux souterraines avant l'achèvement de ces travaux.

12.5.2 Hydrocarbures aromatiques monocycliques

HAM : pollutions locales

D'une manière générale, les HAM sont rarement détectés dans les eaux souterraines et ne détériorent pas gravement leur qualité. Leur présence dans les eaux souterraines est le plus souvent ponctuelle et brève (tab. 12.6), constat qui suggère de petits apports locaux de solvants ou de carburants. Le *toluène*, qui est l'hydrocarbure aromatique monocyclique de loin le plus fréquemment détecté dans les eaux souterraines, est beaucoup utilisé dans les solvants et comme additif dans les carburants. Étant donné que le *benzène*, le *toluène*, l'*éthylbenzène* et le *xylène* sont facilement biodégradables, il n'y a pas lieu de s'attendre à une augmentation des résidus d'HAM dans les eaux souterraines ces prochaines années, pour autant que les quantités consommées demeurent constantes.

12.5.3 Autres composés organiques volatils

MTBE : pas d'atteinte significative

Le *MTBE* a été détecté relativement souvent dans les eaux souterraines, mais à des concentrations plutôt faibles ; la valeur indicative de 2 µg/l des Instructions pratiques n'a été dépassée qu'à trois stations de mesure entre 2007 et 2014. Quant à l'*ETBE*, il n'a été détecté en 2014 qu'à une seule des stations échantillonnées. Il n'y a donc aucune raison de craindre que ces substances détériorent sensiblement la qualité des eaux souterraines. Le *MTBE* et l'*ETBE* peuvent parvenir dans le sous-sol de manière ponctuelle, lors de fuites, d'accidents ou en raison d'un maniement inapproprié lors de l'entreposage, du transport ou du transbordement de carburants. Des apports diffus provenant du trafic routier (volatilisation de carburant à partir des réservoirs des véhicules), par le biais de l'atmosphère, sont également probables. Le *MTBE* est relativement soluble dans l'eau et son adsorption par les particules du sol est faible ; il passe donc rapidement dans les eaux souterraines. Cette substance est en outre très persistante et elle se décompose mal, voire pas du tout, sous l'effet des microorganismes. L'*ETBE* affiche un comportement analogue à celui du *MTBE* dans les eaux souterraines : il est très mobile et difficilement biodégradable, mais moins soluble dans l'eau. La pression de vapeur de l'*ETBE* est en outre nettement inférieure à celle du *MTBE*. Par conséquent, l'*ETBE* s'échappe moins par volatilisation des réservoirs des véhicules que le *MTBE*, de sorte que les apports diffus d'*ETBE* dans l'atmosphère sont inférieurs.

ETBE : substitut du MTBE

Le MTBE sert d'additif pour carburant depuis le milieu des années 1980, mais l'ETBE est désormais utilisé de plus en plus souvent. Depuis 2013, la part de bioéthanol dans la fabrication d'*ETBE* bénéficie d'allégements fiscaux dans certains pays européens (LUBW 2013). Étant donné que la Suisse dépend largement d'importations en provenance de l'UE pour son approvisionnement en carburant, l'additif *ETBE* est donc de plus en plus présent également dans le carburant consommé en Suisse, bien qu'il n'engendre aucun avantage fiscal dans notre pays. Le nombre de stations de mesure où le *MTBE* est décelé dans les eaux souterraines a diminué au fil des années ; pour l'*ETBE*, aucune tendance ne se dessine encore, vu le faible nombre de détections. La consommation d'*ETBE* n'ayant cessé de s'accroître, il n'est pas exclu que les détections de cette substance dans les eaux souterraines se multiplient à l'avenir.

1,4-dioxane : source principale dans les eaux usées industrielles

Dans le cadre de l'étude pilote menée en 2011/2012, le *1,4-dioxane* a été décelé surtout aux stations de mesure fortement influencées par l'infiltration d'eaux de surface. Il n'existe cependant pas de corrélation manifeste avec des indicateurs d'eaux usées communales (tels l'agent anticorrosif *benzotriazole* et différents résidus de médicaments). Il est par conséquent permis de supposer que le *1,4-dioxane* parvient plutôt dans les eaux souterraines par infiltration d'eaux superficielles qui servent de milieu récepteur à des déversements d'eaux usées industrielles. Il pourrait également provenir d'aires d'exploitation contaminée et de décharges.

12.5.4 Monitoring

Élément du monitoring à long terme de NAQUA

L'évolution de la pollution des eaux souterraines par des composés organiques volatils, en particulier des HHV, continuera à faire l'objet d'un suivi attentif dans le cadre du monitoring à long terme de NAQUA.

Étude pilote « 1,4-dioxane » 2015
Pour améliorer les données statistiquement peu fiables sur le *1,4-dioxane,* une étude pilote à l'échelle nationale a été réalisée depuis à toutes les stations de mesure des modules TREND et SPEZ.

13 Indicateurs d'eaux usées

13.1 Bases

Eaux usées domestiques, industrielles et artisanales
Les eaux usées des ménages privés ainsi que des entreprises industrielles et artisanales contiennent non seulement des matières fécales, mais aussi une foule de produits chimiques organiques de synthèse. En conséquence, l'éventail des substances présentes dans les eaux usées est vaste et comprend par exemple des tensio-actifs, des résidus de médicaments, des édulcorants artificiels, des produits anticorrosifs, des agents complexants et, le cas échéant, d'autres composés chimiques de l'industrie spécialisée. Même en faibles concentrations, certains de ces composés nuisent aux organismes aquatiques ou détériorent, en raison de leur persistance, la qualité des ressources en eau, destinée à servir d'eau potable.

Mauvaise élimination dans les STEP
Les stations d'épuration (STEP) éliminaient jusqu'ici surtout les substances aisément biodégradables des eaux usées. Les procédés classiques ne réduisent cependant que de manière insuffisante les composés peu dégradables, de sorte que les STEP les déversent presque en l'état dans les milieux récepteurs. L'ajout d'une étape de traitement supplémentaire, dont la réalisation a commencé en 2016, accroîtra l'efficacité des STEP quant au nombre de substances chimiques éliminées et améliorera ainsi nettement la qualité de l'eau des cours d'eau concernés.

Apport dans les eaux souterraines
Les substances contenues dans les eaux usées peuvent parvenir dans les eaux souterraines, d'une part directement, via des installations d'assainissement non étanches (égouts ou fosses de collecte, p. ex.) ou des raccordements défectueux et, d'autre part indirectement, en fonction des conditions hydrauliques, via l'infiltration des cours d'eau dans lesquels elles sont déversées. De plus, le lisier, qui contient en partie des eaux usées domestiques des exploitations agricoles, peut également transporter les substances en question vers les eaux souterraines.

OEaux : pas d'exigence chiffrée
Conformément aux objectifs écologiques pour les eaux définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. L'OEaux ne fixe cependant pas d'exigence numérique spécifique pour régir les résidus de médicaments, les produits anticorrosifs, les agents complexants ou les autres indicateurs d'eaux usées potentiellement présents dans les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. Quoi qu'il en soit, les eaux souterraines doivent, le cas échéant après un procédé de traitement simple, respecter les exigences de la législation sur les denrées alimentaires. Les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004) définissent une valeur indicative de 1 µg/l pour le produit anticorrosif *benzotriazole* et une de 5 µg/l pour l'*EDTA* et les complexants de structure analogue, ces valeurs pouvant signaler une pollution anthropique problématique. Conformément à l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD), une valeur maximale de 200 µg/l s'applique à l'*EDTA* dans l'eau potable. Comme l'OEaux renvoie à l'OPBD, la valeur maximale de cette dernière équivaut à une exigence chiffrée de l'OEaux pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être.

13.2 Relevé des données

Relevés à l'échelle nationale
Les données concernant une sélection d'indicateurs d'eaux usées sont relevées à l'échelle nationale depuis 2013 dans le cadre du monitoring à long terme. Ces indicateurs sont analysés deux à quatre fois l'an aux stations de mesure du module TREND et une à deux fois l'an aux stations du module SPEZ (chap. 3). La fréquence des échantillonnages dépend d'une part de la contamination connue des stations et, d'autre part, de leur exposition potentielle à l'apport de substances contenues dans les eaux usées. Les stations de mesure dont le bassin d'ali-

mentation se situe pour l'essentiel en zone urbanisée font ainsi l'objet de deux prélèvements annuels au moins.

Trois substances dans le monitoring à long terme
Le monitoring à long terme englobe actuellement trois indicateurs d'eaux usées : la *carbamazépine* et le *sulfaméthoxazole,* deux médicaments, et le *benzotriazole,* un agent anticorrosif. Ces substances ont été retenues sur la base des résultats de l'étude pilote « Screening micropolluants », réalisée en 2007 et 2008 (chap. 15). De plus, le complexant *EDTA* fait l'objet d'analyses depuis 1997 dans le module TREND. En complément à ces paramètres, certains services cantonaux spécialisés et les deux laboratoires mandatés transmettent à l'OFEV les résultats des analyses concernant d'autres indicateurs d'eaux usées, tels le *diclofénac* ou l'*acide diatrizoïque.* D'autres substances parfois également présentes dans les eaux usées (nitrates, pesticides, composés organiques volatils, composés perfluorés, microorganismes, etc.) sont traitées dans les chapitres correspondants.

Statistiques : concentrations maximales
Les évaluations statistiques se fondent sur les concentrations maximales des différentes substances enregistrées par station de mesure et par an. Les analyses portent sur les données disponibles validées du monitoring à long terme de l'année 2014.

13.3 État

13.3.1 Vue globale

Indicateurs d'eaux usées décelés à plus d'un tiers des stations
En 2014, des indicateurs d'eaux usées ont été détectés à près de 200 des 530 stations de mesure (tab. 13.1), ce qui correspond à 37 % environ du réseau de mesure. À 15 % des stations, les concentrations dépassaient 0,1 µg/l et à 4 % elles étaient supérieures à 1 µg/l. Au total, dix indicateurs ont été identifiés dans les eaux souterraines, dont sept étaient présents en concentrations supérieures à 0,1 µg/l.

Médicaments : une station sur dix
Des résidus de médicaments étaient présents en 2014 à 13 % environ des stations. Quatre substances ont été identifiées dans les eaux souterraines : la *carbamazépine* et le *sulfaméthoxazole* ainsi que l'*acide diatrizoïque* et le *diclofénac,* ces deux derniers composés n'ayant pas été analysés au niveau national. La *carbamazépine* a été décelée à près de 9 % des stations, le *sulfaméthoxazole* à 7 % environ.

Médicaments : concentrations rarement accrues
À l'exception de trois stations, les concentrations des médicaments analysés sont partout restées inférieures à 0,1 µg/l. La *carbamazépine* et l'*acide diatrizoïque,* pour lequel il n'existe pas de données à l'échelle nationale, ont dépassé cette valeur dans de rares cas. Les concentrations de *sulfaméthoxazole* n'ont jamais été supérieures à 0,1 µg/l.

Agents anticorrosifs : une station sur quatre
Des agents anticorrosifs ont été identifiés en 2014 à près de 24 % des stations de mesure. Les relevés ont décelé du *benzotriazole* ainsi que du *4-méthylbenzotriazole* ou du *5-méthylbenzotriazole,* ces deux derniers n'étant pas analysés à l'échelle nationale.

Agents anticorrosifs : dépassements de 0,1 µg/l
Les concentrations de *benzotriazole* ont dépassé 0,1 µg/l à un peu plus de 1 % des stations de mesure. De même, les agents anticorrosifs *4-méthylbenzotriazole* et *5-méthylbenzotriazole,* non analysés à l'échelle nationale, ont atteint des valeurs supérieures.

Édulcorants et complexants supérieurs à 0,1 µg/l
Parmi les autres indicateurs d'eaux usées non encore analysés à l'échelle nationale, ce sont les édulcorants artificiels *acésulfame* et *sucralose* ainsi que l'agent complexant *EDTA* qui ont été détectés en concentrations supérieures à 0,1 µg/l. L'*acésulfame* et l'*EDTA* ont excédé à plusieurs reprises 1 µg/l dans les eaux souterraines. Avec une valeur de 7,4 µg/l à une station de mesure, l'*EDTA* a même dépassé la valeur indicative de 5 µg/l fixée par les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines.

13.3.2 Présence régionale

Résidus de médicaments le long de cours d'eau

Des résidus de médicaments ont été détectés dans les eaux souterraines surtout le long de cours d'eau de taille moyenne (fig. 13.1) : des concentrations supérieures à 0,02 µg/l ont presque exclusivement été détectées aux stations de mesure situées à moins de 1 km du cours d'eau le plus proche. De telles contaminations ont en particulier été enregistrées aux stations sises près de la Birse, de l'Ergolz, de la Glatt, de la Limmat et de la Thur. Des résidus de médicaments ont toutefois également été décelés dans les eaux souterraines à proximité du Rhône en Bas-Valais, de l'Aar en aval du lac de Bienne et du haut Rhin en aval de Koblenz. À l'exception du Rhône, chacun des tronçons mentionnés contenait une part d'eaux usées supérieure à 5 %.

Agents anticorrosifs souvent présents

Des agents anticorrosifs étaient présents dans les eaux souterraines surtout aux stations de mesure situées le long de cours d'eau de taille petite à moyenne (fig. 13.2). Non seulement des stations proches de divers cours d'eau de taille moyenne charriant une part d'eaux usées supérieure à 5 % étaient affectées, mais aussi quelques stations sur des tronçons de cours d'eau où la part d'eaux usées est inférieure à 5 %, comme l'Emme, le haut Rhin en amont de Koblenz, l'Aar en aval du lac de Thoune ainsi que le Brenno, le Tessin et la Maggia. Des agents anticorrosifs ont par ailleurs également été détectés à des stations qui ne sont pas situées à proximité immédiate d'un cours d'eau et dont le bassin d'alimentation se distingue par l'utilisation principale « zone urbanisée et voies de communication ».

Tableau 13.1

Indicateurs d'eaux usées dans les eaux souterraines (2014)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Sont énumérées toutes les substances détectées en 2014 ou analysées dans le cadre du monitoring à long terme. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Substance	Monitoring à long terme	Stations de mesure [nombre]						Stations de mesure [%]
			Concentration					Concentration
	Début	Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l	> 1 µg/l	> 0,1 µg/l
Médicaments								
Acide diatrizoïque*	–	240	216	24	23	2	–	*
Carbamazépine	2013	530	484	46	23	1	–	0,2
Diclofénac*	–	473	471	2	2	–	–	*
Sulfaméthoxazole	2013	530	492	38	17	–	–	–
Agents anticorrosifs								
Benzotriazole	2013	530	408	122	106	6	–	1,1
4- et 5-méthylbenzotriazole*	–	408	379	29	23	3	–	*
Édulcorants artificiels								
Acésulfame*	–	212	123	89	88	39	11	*
Cyclamate*	–	166	164	2	2	–	–	*
Sucralose*	–	166	163	3	3	3	–	*
Agents complexants								
EDTA*	1997 **	54	23	31	31	29	10	*
Total		**530**	**335**	**195**	**178**	**77**	**22**	

LQ limite de quantification
* absence de données statistiquement fiables à l'échelle nationale
** uniquement dans le module TREND

Figure 13.1

Médicaments dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Cours d'eau dont le débit Q_{347} est supérieur à 2000 l/s.

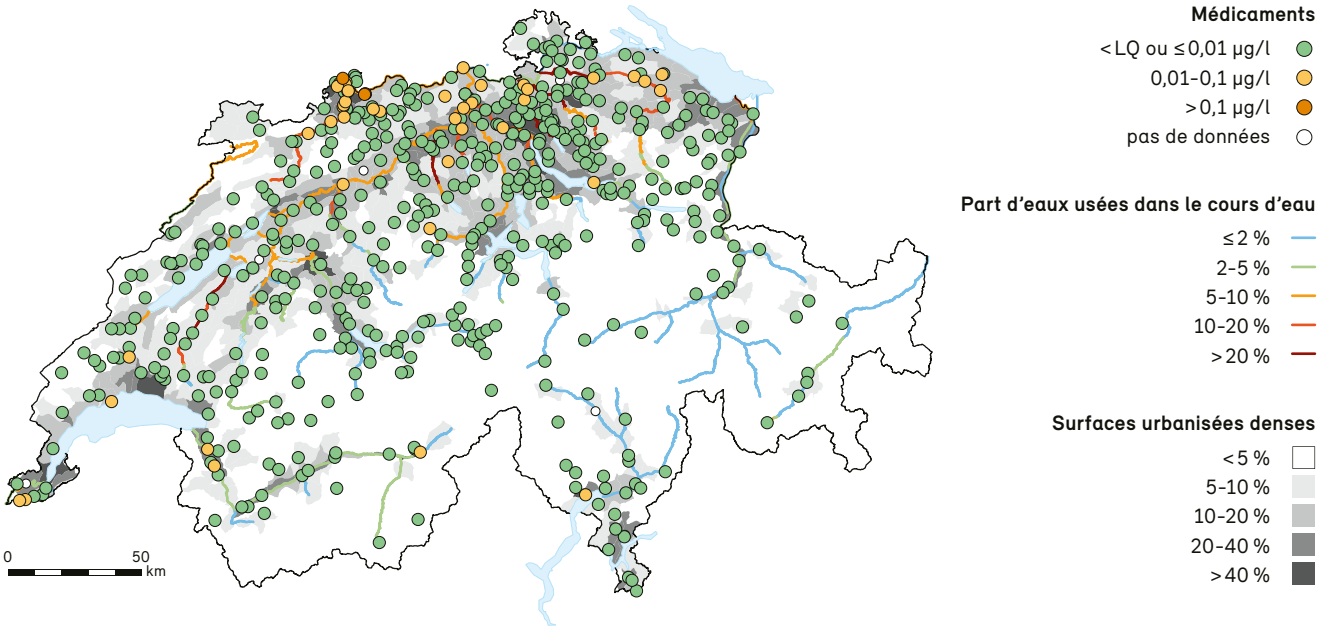


Figure 13.2

Agents anticorrosifs dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Cours d'eau dont le débit Q_{347} est supérieur à 2000 l/s.

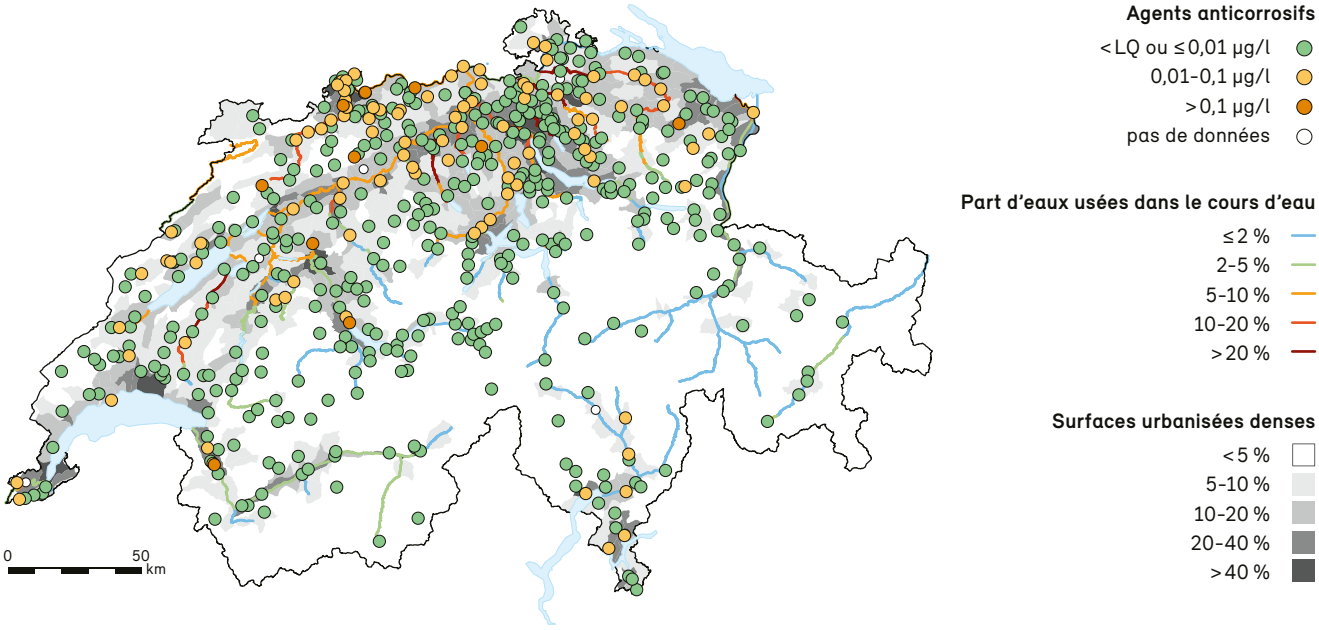
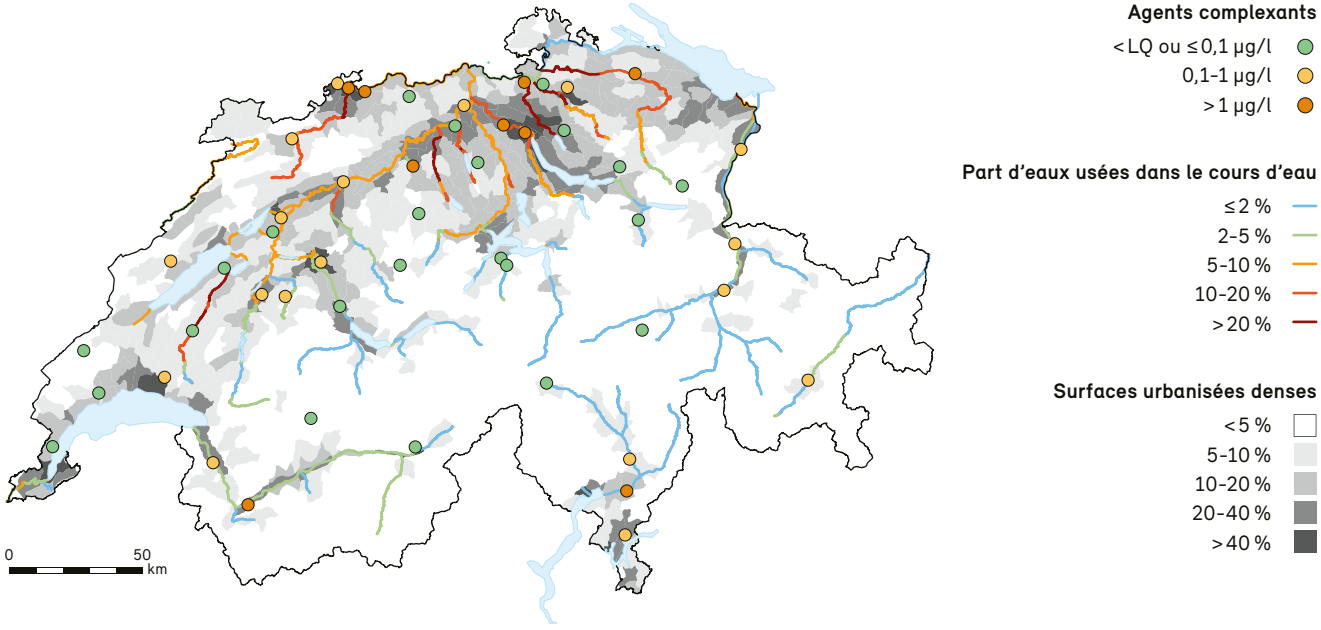


Figure 13.3

Agents complexants dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Concentration maximale des substances par station de mesure NAQUA. Stations du module TREND. Cours d'eau dont le débit Q_{347} est supérieur à 2000 l/s.



Agents complexants à proximité des cours d'eau et des grandes cultures

Les agents complexants, étudiés uniquement aux 50 stations de mesure du module TREND, tendaient à être plus souvent présents à proximité de cours d'eau et s'y trouvaient accompagnés d'autres indicateurs d'eaux usées (fig. 13.3). Ils ont cependant aussi été détectés à plusieurs stations éloignées d'un cours d'eau où aucun autre indicateur d'eaux usées n'a été décelé, les bassins d'alimentation de ces stations étant davantage voués à l'agriculture.

13.4 Analyse

Qualité des eaux souterraines détériorée

Détectés à plus d'un tiers de toutes les stations de mesure NAQUA, les indicateurs d'eaux usées sont des substances qui jouent un rôle important pour la qualité des eaux souterraines. Parmi les concentrations supérieures à 1 µg/l, ce sont l'*acésulfame*, édulcorant artificiel utilisé comme additif dans de nombreux produits, et l'agent complexant *EDTA* qui ont atteint les valeurs les plus élevées. L'agent anticorrosif *benzotriazole* a également affiché plusieurs fois des concentrations accrues (supérieures à 0,1 µg/l). Les résidus de médicaments ont été décelés nettement moins souvent dans les eaux souterraines et en concentrations plutôt faibles.

Substances persistantes et mobiles

Les indicateurs d'eaux usées détectés dans les eaux souterraines sont très persistants et en même temps mobiles. Ils sont jusqu'à présent mal éliminés dans les STEP, ne se dégradent guère et sont peu retenus dans le sous-sol.

L'*acide diatrizoïque,* produit de contraste, affiche l'un des plus mauvais taux d'élimination après traitement mécanique et biologique. Même l'ozone ou la poudre de charbon actif ne parviennent guère à éliminer ces substances (Götz et al. 2010a). L'*acésulfame*, la *carbamazépine* et l'*EDTA* sont également extrêmement mal éliminés par le traitement biologique conventionnel : l'élimination de ces substances dans les STEP classiques reste inférieure à 10 % (Jekel et Dott 2013). De plus, l'*acésulfame* et l'EDTA

ne se décomposent pas et ne sont retenus dans le sous-sol ni en milieu aérobie ni en milieu anaérobie. L'*acide diatrizoïque*, la *carbamazépine* et le *sulfaméthoxazole* sont également à peine éliminés lors de l'infiltration dans les berges (Jekel et Dott 2013).

Près de 30 t d'acésulfame

Outre leur persistance et leur mobilité, la concentration des indicateurs d'eaux usées dans les eaux souterraines reflète d'assez près leurs différents usages et les quantités utilisées. Le *sulfaméthoxazole*, un antibiotique, et la *carbamazépine*, un antiépileptique également utilisé dans le traitement de névralgies et de dépressions, ont été vendus en Suisse à raison de 2 à 4 t environ par an au cours des dernières années (IMS Health GmbH 2009, dans : Götz et al. 2010 b ; IMS Health GmbH 2016 [*carbamazépine* uniquement]). L'agent anticorrosif *benzotriazole,* notamment contenu dans les produits à vaisselle pour protéger l'argenterie et qui sert aussi d'antigel, par exemple lors du dégivrage des avions, est commercialisé en quantités plus importantes : environ 16 t par an (Henkel 2006, dans : Götz et al. 2010 b). Il est par conséquent détecté plus souvent et en concentrations plus élevées aux stations de mesure. L'édulcorant artificiel *acésulfame*, contenu dans de nombreux produits (boissons sucrées ou pâte dentifrice, p. ex.) sous la désignation d'additif alimentaire E 950, est aussi largement présent dans les eaux souterraines. Les extrapolations basées sur les eaux usées arrivant aux STEP (Longrée et al. 2011) montrent que la consommation annuelle d'*acésulfame* atteignait presque 30 t il y a quelques années. Selon les données recueillies à la station de surveillance du Rhin à Weil am Rhein, l'utilisation de cette substance semble toutefois dénoter une tendance à la baisse (Mazacek et al. 2016).

Environ 300 t d'EDTA

L'agent complexant *EDTA* est également utilisé en assez grandes quantités et affichait des concentrations accrues dans les eaux souterraines. Selon une compilation établie par la Commission internationale pour la protection du Rhin (CIPR 2012), environ 300 t de cette substance auraient été employées en 2010 dans le bassin versant suisse du Rhin. L'*EDTA* entre en particulier dans la composition de lessives et de détergents industriels et artisanaux, mais sert aussi de stabilisateur dans les conserves (E385) et les produits cosmétiques ainsi que dans les engrais.

Infiltration d'eaux de surface

La présence d'indicateurs d'eaux usées surtout dans les aquifères en roches meubles proches de cours d'eau confirme que ces substances parviennent principalement dans les eaux souterraines via l'infiltration d'eaux superficielles contenant des eaux usées. Aux stations de mesure concernées, la concentration de certains indicateurs persistants et mobiles peut atteindre des valeurs similaires à celles mesurées dans les cours d'eau voisins (AWEL 2013). Plus la part d'eaux usées (traitées) dans un cours d'eau est élevée et plus l'infiltration est importante, plus ces indicateurs d'eaux usées atteignent des concentrations élevées dans les eaux souterraines.

Effet filtrant du sous-sol

Dans l'ensemble, les eaux souterraines présentent néanmoins une qualité nettement meilleure que les eaux de surface (Kunz et al. 2016), en particulier pour ce qui est des produits chimiques organiques de synthèse. Une grande partie des substances provenant des eaux usées et contenues dans les cours d'eau sont décomposées ou retenues lors de leur passage en sous-sol, notamment au niveau des berges et au fond des cours d'eau.

Fuites d'égouts

L'infiltration de cours d'eau n'est cependant pas toujours directement responsable de la présence d'indicateurs d'eaux usées dans les eaux souterraines. Dans les zones urbanisées, le manque d'étanchéité des égouts et des canalisations d'eaux usées semble également à l'origine de l'apport de ces substances dans les eaux souterraines. En dehors de zones urbanisées denses, les indicateurs d'eaux usées pourraient également y parvenir en cas de fuites d'une fosse à purin ou lors de l'épandage de lisier contenant des eaux usées domestiques. C'est du moins ce qu'indique la détection d'*acésulfame* à certaines stations de mesure éloignées.

Recul en vue

Certaines STEP devant être équipées d'une étape de traitement supplémentaire, la qualité des eaux souterraines proches de cours d'eau devrait s'améliorer au cours des années à venir. Sur la base des planifications cantonales

actuelles, l'OFEV estime qu'environ 70 % des eaux usées communales seront soumises, d'ici à 2040 au plus tard, à un traitement capable d'éliminer les micropolluants. Songeant à compléter ces mesures prises « en bout de chaîne », les spécialistes évaluent dans quelle mesure des interventions s'imposent aussi à la source, c'est-à-dire au niveau du pollueur ou de l'émetteur de substances polluantes. Pour en décider, il importe toutefois d'améliorer les données et les connaissances sur l'apport de produits chimiques en provenance d'hôpitaux et d'autres établissements de santé ainsi que d'entreprises industrielles et artisanales.

Contrôle de l'efficacité des efforts entrepris

Les données NAQUA de ces prochaines années révèleront avec quelle vitesse les mesures appliquées parviennent à réduire les concentrations des différents indicateurs d'eaux usées dans les eaux souterraines. Ces indicateurs continueront de faire partie intégrante du monitoring à long terme de NAQUA.

14 Étude pilote « Composés perfluorés »

14.1 Bases

Extrêmement stable et tensioactif

Les composés perfluorés, ou substances perfluoroalkylées, sont des composés organiques de synthèse totalement fluorés. La liaison carbone-fluor très résistante leur confère une stabilité thermique et chimique exceptionnelle. Les composés perfluorés dotés d'un groupe fonctionnel polaire, tels les acides carboxyliques perfluorés et les acides sulfoniques perfluorés, possèdent de plus des propriétés tensioactives, qui les rendent étanches à l'eau et aux lipides ; voilà pourquoi ils s'appellent tensioactifs perfluorés. Les composés perfluorés de loin les plus répandus dans l'environnement et aussi les plus pertinents du point de vue toxicologique (selon les connaissances actuelles) sont l'*acide perfluorooctansulfonique (PFOS)* et l'*acide perfluorooctanoïque (PFOA),* leur molécule comptant huit atomes de carbone. Ils ne se décomposent pour ainsi dire jamais et sont donc extrêmement persistants.

Utilisation dans l'industrie et les ménages

Les composés perfluorés sont produits à l'échelle industrielle depuis cinquante ans. En raison de leur stabilité et de leurs propriétés tensioactives, leurs utilisations sont aussi multiples que variées, tant dans l'industrie que dans la vie courante. Selon une analyse des flux réalisée par l'OFEV (Buser et Morf 2009), le *PFOS* est surtout employé dans le chromage dur. Jusqu'à la fin 2018, il était présent en grandes quantités dans les mousses anti-incendie qui servent à combattre les feux de liquides dans les dépôts de carburants, les installations industrielles, les aéroports et les terrains militaires. Le *PFOA* intervient surtout comme auxiliaire dans la production de fluoropolymères, tel le *polytétrafluoroéthylène (PTFE),* également connu sous son nom commercial : téflon. Divers objets d'usage courant (revêtement antiadhésif des poêles, vêtements de pluie respirants, sprays d'imprégnation ou matériaux d'emballage imprégnés) peuvent en contenir.

Convention de Stockholm

Vu leur persistance, leur toxicité et leur bioaccumulation, le *PFOS* et ses différents sels ainsi que le *fluorure de perfluorooctanesulfonyle* ont été inclus en mai 2009 dans la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP ; PNUE 2009). La fabrication et l'utilisation de ces substances sont ainsi soumises à des restrictions globales. En Suisse et au sein de l'UE, la production et la mise en circulation de *PFOS* et de ses dérivés sont largement interdites ; seules quelques rares applications industrielles de *PFOS* bénéficient encore de dérogations. En 2015, la Commission européenne a proposé d'inscrire également le *PFOA,* ses sels et ses précurseurs parmi les substances régies par la Convention de Stockholm (CE 2015). L'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) avait auparavant qualifié le *PFOA* de substance particulièrement préoccupante, car persistante, très bioaccumulative et toxique pour la reproduction, et l'avait admis en 2013 dans la liste de candidats destinés à être soumis au règlement de l'UE sur les produits chimiques (REACH ; ECHA 2013). Sur la base d'une réglementation promulguée en 2017 par la Commission européenne pour régir le *PFOA,* ses sels et ses précurseurs (UE 2017), la production et la mise en circulation de ces substances, de même que leur utilisation pour fabriquer des articles ou des mélanges de substances, seront proscrites au sein de l'Union européenne dès 2020. À partir de cette date, il sera également interdit de mettre en circulation des substances, des mélanges de substances ou des articles qui ne respectent pas les valeurs maximales fixées pour le *PFOA,* ses sels et ses précurseurs. Des délais de transition et des exceptions seront néanmoins accordés à certains produits et processus. De plus, l'acide *perfluorohexanoïque* (PFHxA), ses sels et ses précurseurs sont d'autres substances qui pourraient être inscrites dans la Convention de Stockholm sur l'initiative de la Norvège en 2017. Le Comité d'étude des polluants de la convention évalue actuellement en détail ce groupe de substances.

OEaux : pas d'exigence chiffrée

Conformément aux objectifs écologiques pour les eaux définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. L'OEaux ne fixe aucune exigence chiffrée spécifique pour régir les composés perfluorés dans les eaux souterraines

utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. Les eaux du sous-sol doivent néanmoins, le cas échéant après avoir subi un procédé de traitement simple, répondre aux exigences de la législation sur les denrées alimentaires. Pour ce qui est de l'eau potable, l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) définit depuis 2017 une valeur maximale de 0,3 µg/l pour le *PFOS* et le *PFHxS (l'acide perfluorohexanesulfonique)* et de 0,5 µg/l pour le *PFOA*. L'OEaux renvoyant à l'OPBD, ces valeurs maximales s'appliquent également aux eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être.

14.2 Relevé des données

Étude pilote 2007/2008

Les composés perfluorés comptent parmi les substances qui peuvent avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines, voire se révéler problématiques. Une étude pilote a ainsi été menée pour déterminer si des PFC sont présents dans les eaux souterraines suisses et, dans l'affirmative, pour connaître leurs concentrations et leur provenance.

L'étude s'est également interrogée sur la nécessité de prendre des mesures pour protéger les eaux souterraines contre l'apport de composés perfluorés. En 2007 et en 2008, certains composés perfluorés ont été analysés à 49 des 50 stations de mesure du module TREND (Reinhardt et al. 2010). Durant la période considérée, les stations ont été échantillonnées deux fois, voire trois fois dans certains cas. Les analyses ont visé à déceler sept acides carboxyliques perfluorés, trois acides sulfoniques perfluorés et un sulfonamide perfluoré (tab. 14.1). Selon la substance recherchée, la limite de quantification se situait entre 0,0005 et 0,001 µg/l.

Statistiques : concentrations maximales

Les évaluations statistiques se fondent sur les concentrations maximales des différentes substances enregistrées à chaque station de mesure.

Tableau 14.1

Composés perfluorés dans les eaux souterraines (2007/2008)

Base : concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Plusieurs substances peuvent être décelées simultanément à une même station.

Substance		Stations de mesure [nombre]				
			Concentration			
		Échantillonnées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l
Acides carboxyliques perfluorés						
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	49	41	8	–	–
Acide perfluorohexanoïque	PFHxA	49	38	11	1	–
Acide perfluoroheptanoïque	PFHpA	49	43	6	–	–
Acide perfluorooctanoïque	PFOA	49	35	14	3	–
Acide perfluorononanoïque	PFNA	49	49	–	–	–
Acide perfluorodecanoïque	PFDeA	49	49	–	–	–
Acide perfluoroundecanoïque	PFUnA	49	49	–	–	–
Acides sulfoniques perfluorés						
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	49	34	15	3	–
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	49	32	17	4	–
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	49	32	17	6	1
Sulfonamides perfluorés						
Perfluorooctanesulfonamide	PFOSA	49	49	–	–	–
Total		**49**	**28**	**21**	**11**	**1**

LQ limite de quantification

14.3 État

Concentrations plutôt faibles

Des résidus de composés perfluorés ont été détectés à 21 des 49 stations de mesure échantillonnées. Les concentrations ont en général été faibles, demeurant pour toutes les substances inférieures à 0,1 µg/l et même inférieures à 0,01 µg/l à plus de la moitié des stations. Seule une station a enregistré des valeurs supérieures.

Résidus de sept composés perfluorés

Au total, sept composés perfluorés différents ont été décelés dans les eaux souterraines (tab. 14.1). Ce sont les acides sulfoniques perfluorés avec huit, six et quatre atomes de carbone qui ont été détectés le plus souvent et avec les concentrations les plus élevées : le *PFOS,* le *PFHxS* et l'*acide perfluorobutanesulfonique (PFBS)*. Ils ont été suivis par les acides carboxyliques perfluorés avec huit ou six atomes de carbone (*PFOA* et *PFHxA*). La concentration maximale s'élevait à 0,12 µg/l *(PFOS)*.

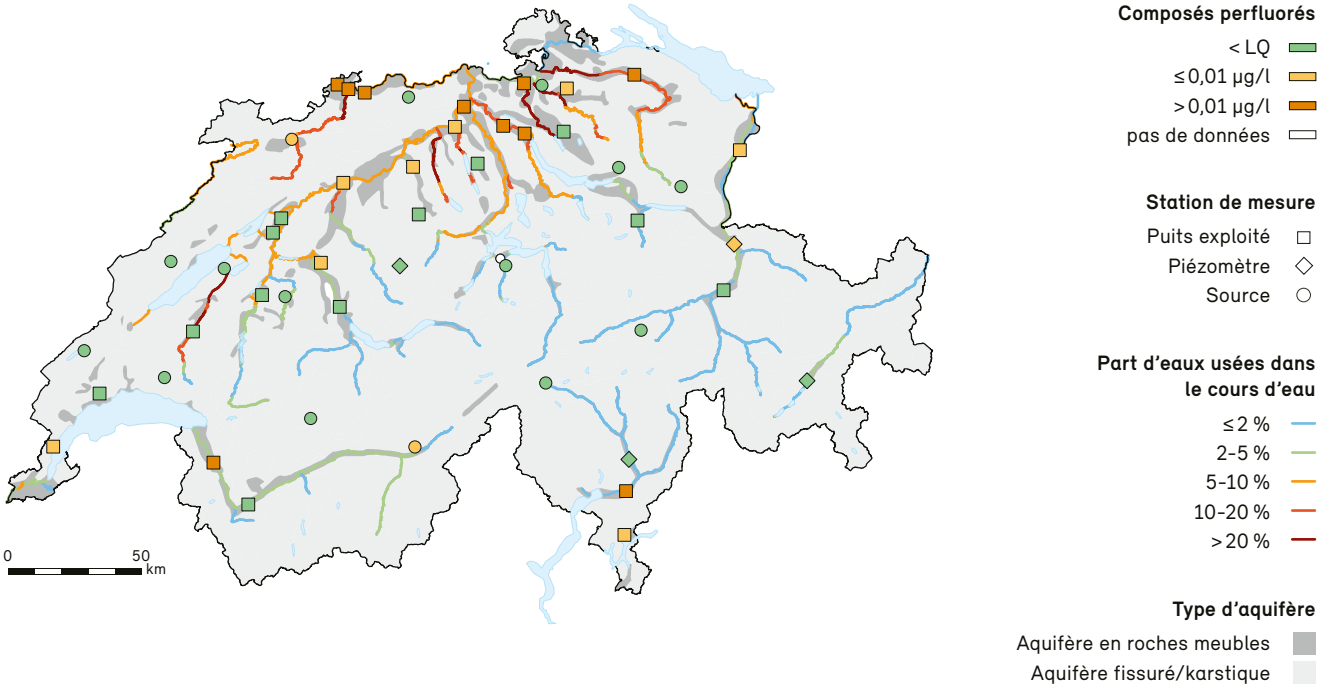
Aquifères en roches meubles affectés

Des composés perfluorés ont été détectés presque exclusivement dans des aquifères en roches meubles du fond des vallées, majoritairement alimentés par l'infiltration des cours d'eau (fig. 14.1). Les différents composés perfluorés ont atteint des concentrations de plus de 0,01 µg/l dans les eaux souterraines, en particulier le long de cours d'eau de taille moyenne, comme la Reppisch, l'Ergolz, la Sihl, la Birse, la Glatt ou la Thur. Ils n'ont toutefois pas été décelés, ou alors seulement en concentrations minimes, aux stations de mesure dans des graviers fluviatiles le long des cours supérieurs de l'Aar, du Rhin et du Rhône.

Figure 14.1

Composés perfluorés dans les eaux souterraines (2007/2008), eaux usées traitées dans les cours d'eau et type d'aquifère

Concentration maximale de chaque substance par station de mesure NAQUA. Stations du module TREND. Étude pilote 2007/2008. Cours d'eau dont le débit Q_{347} est supérieur à 2000 l/s.



14.4 Analyse

Composés perfluorés mobiles et persistants
Les composés perfluorés qui ont été détectés à différentes stations de mesure en concentrations supérieures à 0,01 µg/l dans les eaux souterraines, c'est-à-dire le *PFOS, le PFHxS,* le *PFBS* et le *PFOA,* sont très mobiles dans l'environnement et en même temps persistants. Le *PFBS* est particulièrement mobile, car il ne comprend que quatre atomes de carbone et que la mobilité des substances s'accroît lorsque la taille de leur molécule diminue. Des composés perfluorés comptant plus de huit atomes de carbones n'ont pas été détectés dans les eaux souterraines.

Volumes de production
Si la présence des différents composés perfluorés dans les eaux souterraines dépend des propriétés des substances, elle est également déterminée par les volumes produits et appliqués. Les composés *PFOS* et *PFOA,* détectés assez souvent, ainsi que les dérivés de structure semblable de composés perfluorooctyl ont en particulier été produits industriellement et utilisés en grandes quantités par le passé. Les composés perfluorés à chaînes courtes, comptant quatre ou six atomes de carbone, n'ont gagné en importance que ces dernières années. Connus pour être moins toxiques et moins bioaccumulatifs que le *PFOS* et le *PFOA,* ils les remplacent désormais de plus en plus.

Émissions
Les composés perfluorés peuvent parvenir dans l'environnement de manière directe et ponctuelle, durant la production et le traitement industriel. Ils sont en outre libérés lors de l'utilisation de produits qui en contiennent ou se forment lors de la dégradation de précurseurs entièrement ou partiellement fluorés.

Principale source : les eaux usées
Les eaux usées semblent jouer un rôle primordial dans l'apport de composés perfluorés dans les eaux souterraines. En effet, ces substances ont principalement été détectées dans des aquifères en roches meubles, en grande partie alimentés par l'infiltration d'eaux superficielles. Plus la proportion d'eaux usées traitées dans le cours d'eau était grande, plus les concentrations de composés perfluorés ont atteint des valeurs élevées dans les eaux souterraines proches d'un cours d'eau (fig. 14.1). Ce constat permet de conclure que les composés perfluorés parviennent dans les ruisseaux et les rivières principalement avec les effluents de stations d'épuration et, de là, par infiltration dans les eaux souterraines. Cette hypothèse est confirmée par la présence simultanée d'autres indicateurs d'eaux usées, comme l'*EDTA* ou des médicaments, aux mêmes stations de mesure.

Rôle des sources ponctuelles
Le rôle des sources ponctuelles industrielles dans l'apport de composés perfluorés dans les eaux souterraines se limite plutôt au niveau local. À quelques stations de mesure, des concentrations particulièrement élevées de composés perfluorés spécifiques suggèrent une émission locale de ces composés. Les composés perfluorés présents dans les eaux souterraines d'une station de mesure valaisanne, où le *PFOS* a atteint une concentration de 0,12 µg/l environ, proviendraient probablement de l'utilisation de mousses anti-incendie contenant des composés perfluorés dans une entreprise industrielle voisine.

Évolution future
L'évolution future des concentrations de composés perfluorés dans les eaux souterraines dépend avant tout des quantités qui en seront utilisées à l'échelle industrielle et des émissions engendrées par le recours à des produits contenant ce type de composés. Afin d'abaisser les émissions de *PFOS* dans l'environnement, l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) a sévèrement restreint fin 2010 la mise en circulation et l'emploi de ce composé en Suisse, en accord avec la Convention de Stockholm et la législation européenne. Des réglementations sont en outre actuellement en préparation ou à l'étude pour régir d'autres composés perfluorés, notamment le *PFOA* et le *PFHxA*, de même que leurs sels et leurs précurseurs. L'Organisation des Nations Unies (ONU) et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ont de plus lancé des projets pour remplacer les composés perfluorés. En Suisse, l'équipement des stations d'épuration d'une étape de traitement supplémentaire pourrait également diminuer à l'avenir les quantités de composés perfluorés dans les eaux souterraines. Si l'ozonation ne dégrade qu'insuffisamment ces composés lors de l'épuration des eaux

usées, le recours à du charbon actif pourrait en supprimer une grande partie (Schröder et al. 2010).

Nouvelle étude pilote prévue

Pour vérifier si les mesures déjà appliquées sont efficaces, une nouvelle étude pilote se focalisant sur les composés perfluorés est prévue en 2019. Celle-ci devrait également porter sur d'éventuels nouveaux composés de substitution. Une étude parallèle des eaux de surface correspondantes assurera par ailleurs un meilleur suivi des flux de composés perfluorés.

15 Étude pilote « Screening »

15.1 Bases

Environ 100 000 composés chimiques sur le marché
Quelque 100 000 composés chimiques sont produits et commercialisés à l'échelle industrielle dans le monde. Ces substances peuvent parvenir dans l'environnement aussi bien durant la fabrication et la transformation que, plus tard, lors de l'utilisation ou de l'élimination des déchets. Les composés susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines comprennent surtout les produits de synthèse qui se dégradent mal et sont donc persistants tout en étant très mobiles, c'est-à-dire des substances aisément solubles dans l'eau ou s'adsorbant peu aux particules du sol.

Environ 60 composés organiques de synthèse dans le monitoring à long terme
Seule une partie infime de ces produits peuvent actuellement être analysés dans les eaux souterraines moyennant un investissement raisonnable. Le monitoring à long terme de NAQUA ne peut donc étudier qu'un nombre limité de substances. À l'échelle nationale, il couvre environ 60 substances organiques de synthèse qui influent sur la qualité des eaux souterraines et que les laboratoires participants peuvent analyser conformément à l'état actuel de la technique (chap. 3).

Dépistage précoce des polluants émergents
Afin d'identifier dans les eaux souterraines de nouvelles substances potentiellement pertinentes (« emerging pollutants »), des études pilotes limitées dans le temps et se focalisant sur des substances ou des groupes de substances spécifiques sont réalisées dans le cadre de NAQUA. L'analyse de telles substances est souvent très exigeante et donc assurée par des laboratoires spécialisés ou des laboratoires de recherche.

OEaux : pas de substances de synthèse persistantes
Conformément aux objectifs écologiques pour les eaux définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les eaux souterraines ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. Par ailleurs, les eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être doivent, le cas échéant après avoir subi un procédé de traitement simple, répondre aux exigences de la législation sur les denrées alimentaires.

15.2 Relevé des données

Plus de 200 substances analysées
Consistant à passer systématiquement les échantillons au peigne fin en quête d'un large éventail de substances, le « screening » est un moyen d'analyse exhaustif et efficace. Une méthode mise au point à l'Eawag (Hollender et al. 2010 ; Krauss et al. 2010) a permis lors de l'étude pilote « Screening micropolluants » (2007/2008) d'analyser quelque 200 substances organiques relativement bien solubles dans l'eau. Les limites de détection étaient inférieures à 0,01 µg/l. Ces analyses ont porté sur 76 produits phytosanitaires, 16 biocides, 46 médicaments et environ 70 métabolites correspondants (tab. 15.1). Elles ont par ailleurs également englobé quelques additifs alimentaires, produits de soins corporels, produits chimiques industriels et agents anticorrosifs.

Identification de composés inconnus
Dans l'idéal, cette méthode permet non seulement de détecter des substances précisément définies (« target screening »), mais aussi, sur le plan qualitatif du moins, des composés chimiques qui ne sont pas spécialement recherchés (« non-target screening »). Cependant, pour quantifier avec exactitude les différentes substances, il faut avoir recours un standard isotopique de référence.

22 stations de mesure potentiellement polluées
Dans le cadre de l'étude pilote, 22 stations de mesure du module TREND ont fait l'objet de l'échantillonnage (chap. 3). Ont été sélectionnées des stations situées dans des régions de grandes cultures et des zones urbanisées susceptibles de contenir des polluants et où des polluants avaient déjà été détectés dans les eaux souterraines par le passé.

15.3 Résultats

Dix-neuf « nouvelles » substances identifiées

L'étude pilote a détecté 50 substances dans les eaux souterraines (tab. 15.1). Près de 30 % de ces substances étaient à ce moment-là déjà incluses dans le monitoring à long terme et faisaient régulièrement l'objet d'analyses à l'échelle nationale. Des données issues d'études pilotes précédentes ou de relevés cantonaux existaient pour d'autres 30 % des substances. Enfin, 19 substances ont été identifiées pour la première fois dans le cadre de NAQUA (tab. 15.2). Ces « nouvelles » substances sont avant tout des métabolites de produits phytosanitaires.

Concentration souvent faible

La concentration de la plupart des substances décelées pour la première fois était inférieure à 0,1 µg/l, et même fréquemment inférieure à 0,01 µg/l. Quelques-unes affichaient cependant des concentrations de plus de 0,1 µg/l. Parmi celles-ci figurent les deux métabolites de produits phytosanitaires *desphényl-chloridazone* et *méthyl-desphényl-chloridazone* (chap. 11), l'édulcorant artificiel *acésulfame,* les deux agents anticorrosifs *benzotriazole* et *5-méthylbenzotriazole* ainsi que le produit chimique industriel *acide 2-naphtalènesulfonique* (tab. 15.2).

Édulcorant artificiel

L'*acésulfame* est autorisé à titre d'additif alimentaire, sous la désignation E950, et édulcore des boissons sucrées, des pâtes à tartiner, des conserves de fruits et de légumes, de la pâte dentifrice et du chewing-gum. Il est excrété par le corps humain pratiquement sans avoir été modifié.

Agents anticorrosifs

Le *benzotriazole* et le *5-méthylbenzotriazole* servent d'agent anticorrosif, par exemple dans les peintures, les vernis, les liquides réfrigérants ainsi que lors du dégivrage d'avions. Ils sont par ailleurs souvent présents dans les produits à vaisselle pour protéger l'argenterie. Selon les informations fournies par Henkel (2006, dans Götz et al. 2010 b), environ 16 t de *benzotriazole* sont consommées par année.

Produits chimiques industriels

Les *acides naphtalènesulfoniques* sont largement répandus. Ils sont utilisés entre autres comme produits chimiques industriels, notamment à titre de produits intermédiaires dans la fabrication de colorants, d'adjuvants pour le ciment et les plaques de plâtre ou comme émulsifiants et d'agents dispersants.

Tableau 15.1

Substances de l'étude pilote Screening (2007/2008)

Nombre de substances selon le domaine d'utilisation.

	Substances [nombre]				
		Concentration			
	Analysées	< LQ	≥ LQ	> 0,01 µg/l	> 0,1 µg/l
Produits phytosanitaires : substances actives	76	58	18	6	–
Produits phytosanitaires : métabolites	53	35	18	14	6
Biocides : substances actives	16	12	4	1	–
Biocides : métabolites	3	2	1	–	–
Médicaments : substances actives	46	43	3	1	–
Médicaments : métabolites	10	10	–	–	–
Additifs alimentaires	3	1	2	2	1
Produits de soins corporels	3	2	1	–	–
Agents anticorrosifs	2	–	2	2	2
Produits chimiques industriels	8	7	1	1	1

Exigence chiffrée de l'OEaux (substances actives de produits phytosanitaires et de biocides) : 0,1 µg/l

LQ limite de quantification

Tableau 15.2

« Nouvelles substances » (2007/2008) dans les eaux souterraines

Base : concentration maximale aux stations de mesure échantillonnées. Étude pilote. Le tableau énumère toutes les substances détectées pour la première fois dans le cadre de NAQUA. Celles-ci sont classées selon le domaine d'utilisation.

	Substances		
	Concentration		
	≤ 0,01 µg/l	**0,01–0,1 µg/l**	**> 0,1 µg/l**
Produits phytosanitaires : substances actives	Prométone	Asulam	–
	Simétone		
Produits phytosanitaires : métabolites	Désamino-métamitrone	Diméthachlore OXA	Desphényl-chloridazone
	Désamino-métribuzine	Métazachlore ESA	Méthyl-desphényl-chloridazone
	Déséthyl-2-hydroxy-terbuthylazine	Métazachlore OXA	
		2-hydroxy-propazine	
Biocides : substances actives	Benzisothiazolinone	–	–
Biocides : métabolites	Déscyclopropyle-irgarol	–	–
Médicaments : substances actives	–	–	–
Médicaments : métabolites	–	–	–
Additifs alimentaires	–	–	Acésulfame
Produits de soins corporels	Galaxolidon	–	
Agents anticorrosifs	–	–	5-méthylbenzotriazole
			Benzotriazole
Produits chimiques industriels	–	–	Acide 2-naphtalènesulfonique

Exigence chiffrée de l'OEaux (substances actives de produits phytosanitaires et de biocides) : 0,1 µg/l

Substance inconnue

Plusieurs échantillons contenaient en outre un composé jusqu'alors non identifié, qui est probablement un métabolite du produit phytosanitaire *chlorothalonil*. La masse moléculaire exacte et la composition isotopique de cette substance ont permis de lui attribuer une formule brute. En l'absence d'un standard de référence, il a toutefois été impossible de l'identifier sans équivoque et de la quantifier de manière claire et précise.

15.4 Analyse

Substances déjà incluses dans le monitoring

Une grande partie des substances qui sont, selon les connaissances actuelles, pertinentes pour la qualité des eaux souterraines et décelables au moyen des méthodes d'analyses disponibles font déjà partie du monitoring à long terme de NAQUA. En élargissant considérablement l'éventail des substances étudiées, l'étude pilote a permis d'identifier aux stations de mesure échantillonnées six « nouvelles » substances présentes en concentrations de plus de 0,1 µg/l. En effet, celles-ci n'avaient jusqu'alors pas été analysées dans le cadre du monitoring à long terme.

Intégration de « nouvelles » substances dans le monitoring à long terme

Les deux métabolites du *chloridazone,* le *benzotriazole* et l'*acésulfame* ont ensuite été inclus dans le monitoring à long terme, afin de déterminer le rôle de ces substances pour les eaux souterraines à l'échelle nationale et de générer des données statistiquement fiables et représentatives. Les deux métabolites du *chloridazone* sont étudiés au niveau suisse depuis début 2010 et le *benzotriazole,* indicateur d'eaux usées, depuis début 2012.

L'*acésulfame* compte depuis 2015 parmi les indicateurs d'eaux usées du monitoring à long terme.

Limites de la méthode

Bien que la méthode d'analyse du screening ait permis de couvrir un éventail de substances relativement large, la fenêtre analytique était cependant limitée. Au final, seules les substances faisant l'objet d'un screening ciblé ont pu être identifiées avec certitude. Au moment de l'étude pilote (2007/2008), il n'était pas encore possible de procéder à un screening non ciblé.

PMOC : composés organiques persistants mobiles

De plus, la méthode d'analyse habituellement appliquée lors d'un screening ne permet souvent pas d'identifier les composés organiques persistants et mobiles (« persistent and mobile organic compounds », PMOC) (Reemtsma et al. 2016). Or ces substances jouent un rôle particulier pour les eaux souterraines et l'eau potable, car les traitements techniques ne parviennent pas à éliminer la plupart d'entre elles et parce qu'elles ne sont pas retenues durant leur passage dans le sol. Le screening n'a notamment pas pris en compte les composés perfluorés à chaîne courte, le médicament *metformine* ou l'agent complexant *EDTA*. Tout comme pour les résidus des produits phytosanitaires *glyphosate et AMPA*, ces substances exigent de recourir à une méthode d'analyse distincte pour chacune d'entre elles.

Sélection et priorisation des substances

Il apparaît d'autant plus crucial de choisir et de prioriser les substances de manière systématique et fondée pour les inclure dans le monitoring. Dans l'idéal, une telle sélection se base sur les propriétés spécifiques de chaque substance (demi-vie, solubilité dans l'eau et sorption) ainsi que sur les quantités produites, transformées ou utilisées en Suisse. Pour la plupart des composés chimiques de synthèse, les indications concernant la consommation sont rarement consignées et publiées et relèvent souvent du secret commercial.

Modèles de prévision pour les métabolites

Quant aux métabolites correspondants, les données sont pratiquement inexistantes. Si des informations sont certes recueillies sur certains métabolites de produits phytosanitaires dans le cadre de la procédure d'homologation, aucune obligation ne contraint jusqu'ici à étudier de manière systématique les produits de la dégradation de tous les autres composés organiques de synthèse. Pour identifier les métabolites susceptibles d'avoir un impact sur les eaux, on recourt dès lors à des modélisations, comme celles mises au point dans le projet KoMet, qui associe des modèles et des mesures pour évaluer les métabolites (« Kombinierte Modellierung und Messung von Metaboliten » ; Fenner et al. 2011). À partir de la structure d'une substance mère, cette approche consiste à simuler des réactions typiques de décomposition et de classer leurs métabolites en fonction de la probabilité de leur formation. Actuellement, l'investissement pour ce genre de modélisations reste cependant très élevé.

Perspectives

Pour compléter le monitoring à long terme, il apparaît raisonnable de procéder à intervalles réguliers à un screening analytique exhaustif, afin d'identifier de nouvelles substances qui pourraient se révéler problématiques dans les eaux souterraines. Depuis 2017, un nouveau screening ciblé sur environ 600 substances a dès lors été lancé dans une sélection de stations de mesure NAQUA. Les échantillons prélevés feront également l'objet d'une analyse semi-quantitative dans le cadre d'un « suspect screening », qui englobe jusqu'à 1000 métabolites de produits phytosanitaires. En 2018 et en 2019, une sélection d'échantillons sont de plus soumis à un screening non ciblé.

16 Étude pilote « Microorganismes »

16.1 Bases

Bactéries, virus, protozoaires
Les microorganismes se répartissent principalement en trois groupes : les bactéries, les virus et les protozoaires. Les bactéries mesurent généralement quelques microns, tandis que les virus sont environ cent fois plus petits et les protozoaires environ dix fois plus grands que les bactéries.

Microorganismes inoffensifs et pathogènes
Les microorganismes sont naturellement présents en grande quantité dans l'environnement et donc également dans les eaux souterraines. La plupart d'entre eux sont parfaitement inoffensifs pour la santé humaine. Toutefois, certains sont pathogènes, c'est-à-dire susceptibles de causer des maladies. Ils peuvent mettre en danger la santé humaine, par exemple en provoquant des diarrhées.

Matières fécales comme principale source de pathogènes
C'est principalement avec les excréments humains et animaux que les microorganismes pathogènes parviennent dans les eaux superficielles et souterraines. Dans les zones urbanisées, cet apport intervient via des fuites dans les réseaux d'égouts, les effluents des stations d'épuration des eaux usées ou les déversements d'eaux mélangées. Dans les zones agricoles, l'apport est causé par l'épandage d'engrais de ferme (lisier et fumier, qui contiennent parfois des eaux usées domestiques) et les excréments du bétail mis en pâture. Même en forêt et dans les régions improductives, des bactéries fécales peuvent être libérées dans la nature (excréments de la faune sauvage ou de l'être humain, p. ex.) et parvenir dans les eaux souterraines.

Bactéries indicatrices
Les bactéries indicatrices, comme *Escherichia coli (E. coli)* et les entérocoques, sont des bactéries non pathogènes qui sont présentes dans les matières fécales en quantités nettement plus grandes que les microorganismes pathogènes et qui sont généralement plus faciles à déceler. Pour contrôler la qualité des eaux souterraines et de l'eau potable, les analyses se concentrent donc principalement sur des bactéries indicatrices et rarement sur des microorganismes pathogènes.

Apport dans les eaux souterraines
La capacité de la surface et du sous-sol à retenir les microorganismes d'origine fécale dépend de la quantité de matière fécale, du mode d'apport dans l'environnement, des caractéristiques du sol et du type d'aquifère. Par conséquent, si les eaux souterraines ne sont pas suffisamment protégées, par exemple parce que la couche de couverture est trop mince ou que le sol présente des passages d'écoulement préférentiels profonds, les microorganismes peuvent être transportés rapidement de la surface vers les eaux souterraines.

Protection des eaux souterraines
Selon l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), un des objectifs majeurs de la zone S2 de protection des eaux souterraines (zone de protection rapprochée) est d'empêcher que des agents pathogènes pénètrent dans un captage en quantité telle qu'ils constituent une menace pour l'utilisation de l'eau potable. Si ces agents ne peuvent être entièrement évités, leur apport doit être suffisamment limité pour que la consommation de l'eau potable n'engendre aucune maladie. Ainsi, l'épandage d'engrais de ferme et d'engrais de recyclage liquides notamment (lisier ou digestats liquides, p. ex.) est interdit dans ces zones de protection. Dans le cas d'aquifères en roches meubles et en roches consolidées faiblement hétérogènes, la zone S2 est dimensionnée de telle sorte que la durée d'écoulement des eaux souterraines entre sa limite amont et le captage soit d'au moins dix jours. De longues années d'expérience ont en effet montré que les microorganismes pathogènes sont en général éliminés après dix jours de séjour dans le sous-sol saturé d'eau ou du moins décimés au point de ne plus représenter de risque pour la santé si l'eau souterraine sert d'eau potable.

Aquifères fissurés et karstiques fortement hétérogènes
Dans le cas d'aquifères fissurés et karstiques fortement hétérogènes, l'OEaux prévoit des restrictions similaires

pour les surfaces du bassin d'alimentation d'un captage d'eaux souterraines qui sont très vulnérables à l'apport de polluants, notamment des agents pathogènes (zone de protection S_h). Compte tenu de la haute vulnérabilité de ces surfaces, même une application rigoureuse des dispositions de protection ne suffit souvent pas pour prévenir la contamination des eaux souterraines par des agents pathogènes. En raison de l'hétérogénéité du sous-sol, même une zone à vulnérabilité moyenne (zone de protection S_m) ne permet pas, de manière générale, d'exclure une éventuelle contamination fécale des eaux souterraines. Dans ces cas, les mesures de protection visent à réduire au mieux la présence de microorganismes fécaux dans les captages en question.

OEaux : pas d'exigence chiffrée

L'OEaux ne fixe aucune exigence chiffrée pour les microorganismes dans les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être. La qualité des eaux souterraines doit néanmoins, le cas échéant après avoir subi un traitement simple, respecter les exigences de la législation sur les denrées alimentaires. En ce qui concerne les microorganismes, l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessible au public (OPBD) n'admet aucune présence d'*E. coli* ni d'entérocoques dans l'eau potable dans un échantillon de 100 ml ; l'ordonnance fixe à 100 par ml la valeur maximale admissible pour les germes aérobies mésophiles (GAM).

OEaux : biocénoses d'aspect naturel et typiques du site

Conformément aux objectifs écologiques définis à l'annexe 1 de l'OEaux, les biocénoses des eaux souterraines doivent être d'aspect naturel et adaptées au milieu. Outre les microorganismes, ces biocénoses incluent la faune peuplant les eaux souterraines (stygofaune). Selon les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004), les biocénoses d'eaux souterraines proches de l'état naturel comprennent en particulier « un nombre restreint de germes formant des colonies et une faible densité d'autres bactéries ». Une biocénose intacte témoigne de la bonne qualité des eaux souterraines (Hunkeler et al. 2006).

16.2 Relevé des données

Étude pilote 2009/2010

Pour identifier les microorganismes pertinents pour la qualité des eaux souterraines et évaluer de manière exemplaire l'influence des conditions hydrogéologiques et de l'utilisation du sol, une étude pilote a analysé certains paramètres microbiologiques en 2009 et 2010 (Pronk et al. 2010 ; Kötzsch et Sinreich 2014).

Stations de mesure et fréquence des prélèvements

Dans le cadre de cette étude pilote, des prélèvements ont été effectués aux 50 stations de mesure du module TREND ainsi qu'à neuf stations, potentiellement contaminées, du module SPEZ. Des prélèvements ont été effectués à deux reprises à 40 stations du module TREND et quatre à six fois aux dix autres stations de ce module de même qu'aux neuf stations du module SPEZ. Cet échantillonnage plus fréquent a été opéré aux stations potentiellement contaminées, c'est-à-dire des stations présentant un risque de pollution accru en raison de l'utilisation du sol dans leur bassin d'alimentation ou des caractéristiques de l'aquifère, ou encore des stations où des microorganismes d'origine fécale ou des polluants (produits phytosanitaires ou médicaments, p. ex.) ont déjà été détectés par le passé. Compte tenu du choix des stations de mesure et de la fréquence des prélèvements, les résultats de l'étude pilote ne permettent toutefois pas de tirer des conclusions représentatives pour l'ensemble de la Suisse quant à l'état microbiologique des eaux souterraines.

Échantillonnage et assurance qualité

Les échantillons ont été prélevés selon un calendrier précis, indépendamment des conditions météorologiques et hydrologiques. Afin d'éviter le risque de contamination croisée par des microorganismes, des précautions d'hygiènes particulières (port d'un masque et de gants en latex désinfectés à l'alcool) ont été appliquées lors de tous les prélèvements et les échantillons ont été transférés dans des récipients stériles.

Tableau 16.1

Paramètres et méthodes d'analyse

Paramètres	Méthode d'analyse	Détection	Volume d'eau analysé	Limite de détection
Bactéries				
Nombre total de cellules	cytométrie en flux	quantitative	1 ml	1 cellule/ml
Germes aérobies mésophiles (GAM)	culture	quantitative	1 ml	1 UFC/ml
– Bactéries indicatrices				
Escherichia coli (E. coli)	culture	quantitative	100 ml / 1 l	1 UFC/l
Entérocoques	culture	quantitative	100 ml	1 UFC/100 ml
Clostridium perfringens (*C. perfringens*)	culture	quantitative	100 ml	1 UFC/100 ml
– Bactéries pathogènes				
Campylobacter spp.	culture	quantitative	1 l	1 UFC/l
Pseudomonas aeruginosa (*P. aeruginosa*)	culture	quantitative	100 ml	1 UFC/100 ml
Salmonella spp.	culture	quantitative	1 l	1 UFC/l
E. coli producteurs de vérotoxine (VTEC)	PCR	qualitative	100 ml / 1 l	Constituants de bactéries dans 1 l
Virus				
Adénovirus	PCR	qualitative	1 l	Constituants de virus dans 1 l
Entérovirus	PCR	qualitative	1 l	Constituants de virus dans 1 l
Norovirus	PCR	qualitative	1 l	Constituants de virus dans 1 l
Rotavirus	PCR	qualitative	1 l	Constituants de virus dans 1 l
Protozoaires				
Cryptosporidium spp.	comptage	quantitative	20 l	1 oocyste/20 l
Giardia spp.	comptage	quantitative	20 l	1 cyste/20 l

(Oo)cystes formes durables des cryptosporidies et des *Giardia*
PCR polymerase chain reaction

Paramètres microbiologiques

Les analyses ont porté sur quinze paramètres microbiologiques pertinents pour la qualité des eaux souterraines (tab. 16.1). Parmi eux, neuf appartiennent au groupe des bactéries, quatre aux virus et deux aux protozoaires. Outre les bactéries indicatrices typiques de pollutions d'origine fécale (*E. coli* et entérocoques, en particulier), des bactéries pathogènes ainsi que des paramètres microbiologiques globaux (nombre total de cellules et GAM) ont été analysés. À l'exception des deux derniers paramètres, les microorganismes étudiés sont presque tous d'origine fécale. Tandis que les bactéries fécales et les protozoaires provenaient d'excréments aussi bien animaux qu'humains, les virus analysés étaient exclusivement d'origine humaine.

Méthodes d'analyse et leur pertinence

Différentes méthodes d'analyse ont été appliquées en fonction des paramètres mesurés (tab. 16.1). Le nombre total de cellules bactériennes a été déterminé à l'aide de la cytométrie en flux. La plupart des espèces de bactéries ont été cultivées selon le procédé classique utilisant différents milieux, puis quantifiées en tant qu'unités formant colonie (UFC). La limite de détection de ces méthodes se situant à un organisme, elle dépend directement du volume d'eau analysé. La détection des protozoaires ne s'est pas fondée sur les individus eux-mêmes, mais sur les formes durables qu'ils produisent (oocystes de cryptosporidies et cystes de *Giardia)*; celles-ci ont été quantifiées par microscopie à fluorescence. Étant donné que les concentrations attendues étaient faibles, les analyses ont porté sur de grands volumes d'eau. Afin de déceler d'éventuels virus pathogènes pour l'être humain, l'étude a eu recours à des méthodes de biologie moléculaire (PCR),

c'est-à-dire que des constituants moléculaires des virus ont été déterminés de façon qualitative, sans analyser pour autant des virus intacts ou infectieux.

Statistiques : valeurs maximales
Dans chaque cas, les évaluations statistiques se sont fondées sur les teneurs maximales de microorganismes par paramètre et par station de mesure.

16.3 État

Microorganismes d'origine fécale : largement répandus
Des microorganismes fécaux (bactéries indicatrices, bactéries pathogènes, virus, protozoaires) ont été détectés à 42 des 59 stations de mesure étudiées. Jusqu'à 26 stations indiquaient la présence d'un ou de plusieurs paramètres d'origine fécale (tab. 16.2).

Tableau 16.2

Microorganismes dans les eaux souterraines (2009/2010)

Base : présence et teneur maximale des différents paramètres par station de mesure NAQUA.

Paramètre	Stations de mesure [nombre]				
	échantillonnées	avec détection	sans détection	Teneur en microorganismes	
Bactéries					
				> 10 000 cellules/ml	*> 100 000 cellules/ml*
Nombre total de cellules	59	–	59	33	8
				> 10 UFC/ml	*> 100 UFC/ml*
GAM	59	5	54	29	9
– Bactéries indicatrices				*> 10 UFC/l*	*> 150 UFC/l*
C. perfringens	59	55	4	–	–
E. coli	59	35	24	14	6
Entérocoques	59	49	10	10	6
Total de bactéries indicatrices	59	35	24	14	6
– Bactéries pathogènes				*> 10 UFC/l*	*> 150 UFC/l*
Campylobacter spp.	59	59	–	–	–
P. aeruginosa	59	54	5	–	–
Salmonella spp.	59	59	–	–	–
VTEC	59	58	1		non quantifiable
Total de bactéries pathogènes	59	53	6		
Virus					
Adénovirus	59	34	25		non quantifiable
Entérovirus	59	33	26		non quantifiable
Norovirus	59	44	15		non quantifiable
Rotavirus	59	55	4		non quantifiable
Total de virus	59	21	38		non quantifiable
Protozoaires					*> 10 (oo)cystes/20l*
Cryptosporidium spp.	59	53	6		–
Giardia spp.	59	56	3		–
Total de protozoaires	59	52	7		–
Total de microorganismes d'origine fécale*	**59**	**17**	**42**		

(Oo)cystes formes durables des cryptosporidies et des *Giardia*
* Bactéries indicatrices, bactéries pathogènes, virus, protozoaires

Bactéries indicatrices : assez fréquentes

Des bactéries indicatrices ont été décelées à 24 des 59 stations étudiées. Dans les échantillons d'un litre prélevés à ces stations, ce sont des bactéries *E. coli* qui étaient présentes, de sorte qu'elles constituent l'indicateur le plus fréquent pour les bactéries d'origine fécale (tab. 16.2, fig. 16.2). Les *E. coli* étaient moins présentes dans les échantillons de 100 ml. Parmi les autres bactéries indicatrices, des entérocoques ont été décelés à 10 des stations étudiées et des *C. perfringens* à quelques stations.

Bactéries pathogènes : nettement plus rares

Contrairement aux bactéries indicatrices, les bactéries pathogènes n'ont été détectées que rarement (tab. 16.2). Des occurrences isolées d'*E. coli* producteurs de vérotoxine (VTEC) et de *Pseudomonas aeruginosa* ont été identifiées, tandis qu'aucun échantillon ne contenait de *Campylobacter* spp. ni de *Salmonella* spp.

Figure 16.1

Nombre total de cellules, GAM, *E. coli* et entérocoques dans les eaux souterraines (2009/2010)

Base : valeurs maximales par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010. Lorsque le nombre d'E. coli est supérieur à 150 UFC/l, le graphe indique 150 UFC/l.

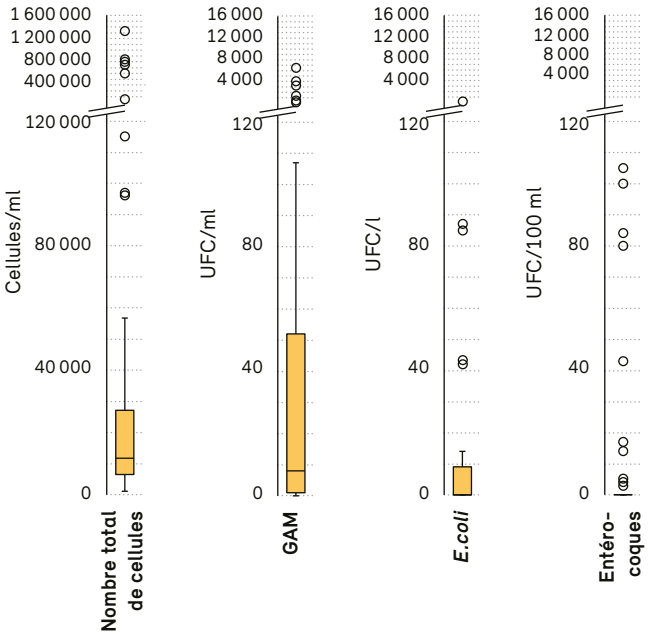


Figure 16.2

Bactéries dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Présence ou valeur maximale du paramètre par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010.

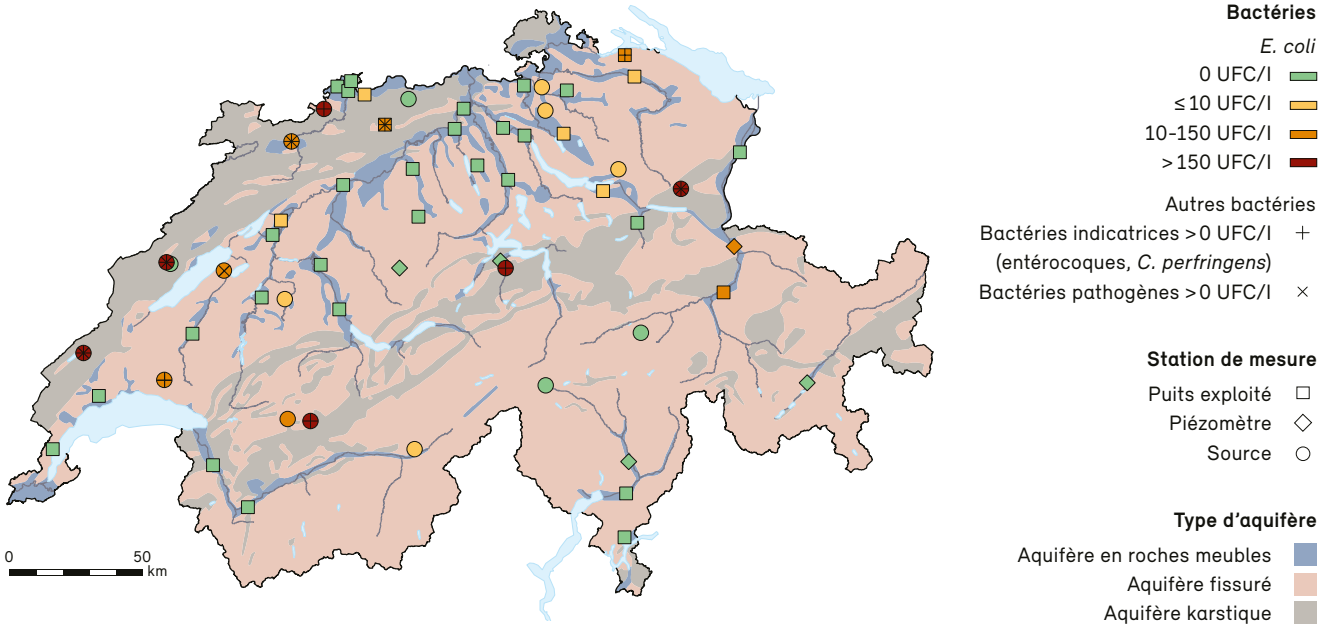


Figure 16.3

Virus dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Présence du paramètre par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010.

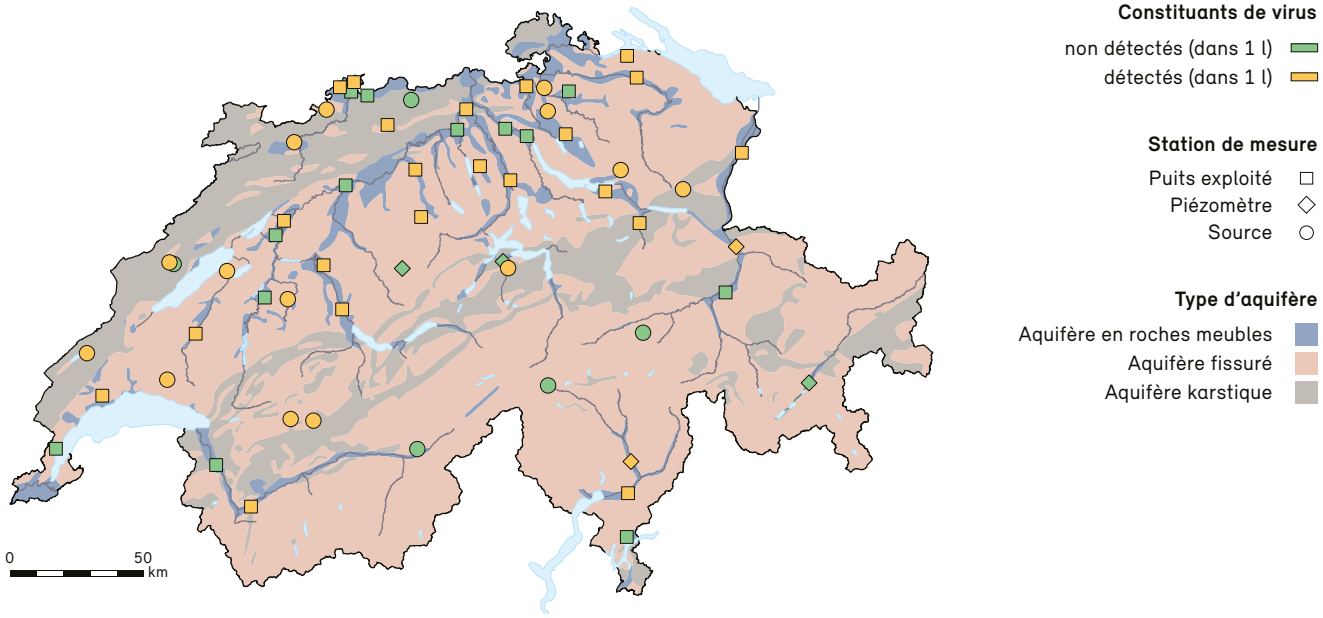
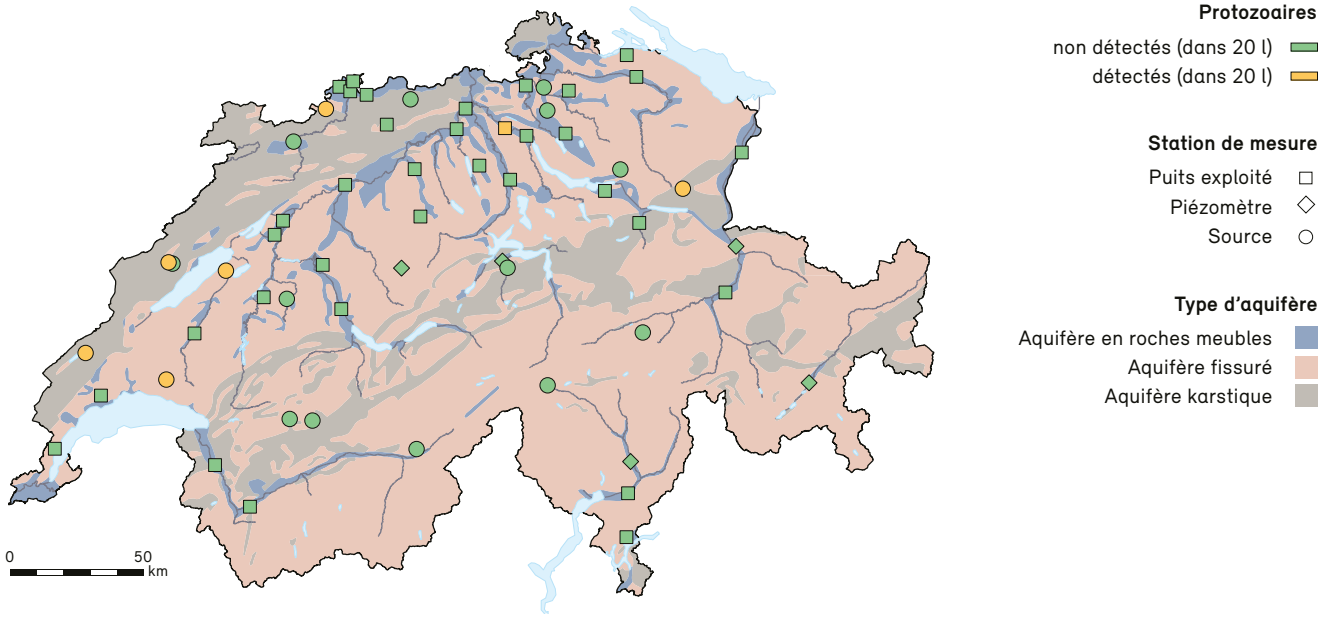


Figure 16.4

Protozoaires dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Présence du paramètre par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010.



Nombre total de cellules et GAM

Indépendamment de la présence de bactéries fécales, chaque échantillon contenait un grand nombre de cellules bactériennes. Leur nombre total allait de plusieurs milliers à plus d'un million de cellules par ml (fig. 16.1). Dans les échantillons contenant des bactéries fécales, celles-ci ne représentaient en général qu'un 100 000e environ de la teneur naturelle totale en bactéries. Quant aux germes aérobies mésophiles (GAM), qui peuvent être naturellement présents dans le sous-sol, mais aussi en nombres accrus à la suite d'une contamination fécale, ils ont été détectés à presque toutes les stations (tab. 16.2).

Constituants de virus : détections fréquentes

Des constituants moléculaires des quatre types de virus analysés ont été décelés dans les eaux souterraines, les plus fréquents étant les adénovirus et les entérovirus. Dans l'ensemble, des constituants de virus ont été détectés à 38 des 59 stations de mesure (tab. 16.2, fig. 16.3).

Protozoaires : plutôt rares

Comparés aux bactéries et aux constituants de virus, les protozoaires ont été les microorganismes qui ont été détectés le moins souvent (tab. 16.2, fig. 16.4). Les protozoaires *Cryptosporidium* spp. et *Giardia* spp. ont été décelé à six et à trois stations de mesure, respectivement, des 59 stations étudiées.

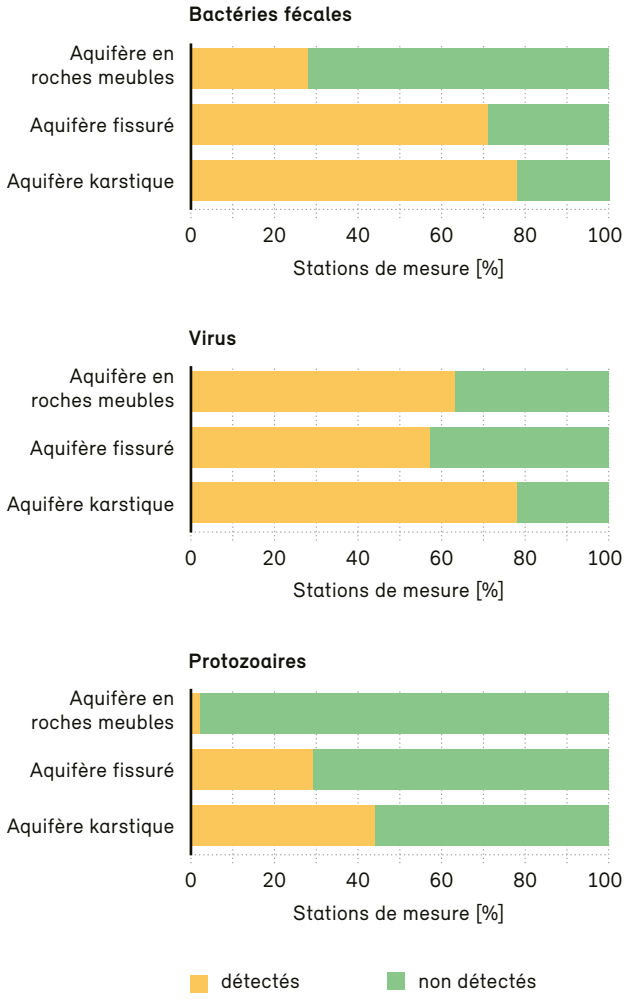
Microorganismes fécaux : présents surtout dans le karst

Les trois groupes de microorganismes fécaux ont été détectés le plus souvent aux stations de mesure situées dans des aquifères karstiques (fig. 16.2 à 16.5). Les bactéries fécales et les virus étant présents à sept et les protozoaires à quatre des neuf stations étudiées. Le nombre total de cellules le plus élevé ainsi que la teneur la plus élevée des différentes espèces de bactéries ont été mesurés aux stations sises dans ce type d'aquifère. Les bactéries fécales et les protozoaires se sont montrés les plus rares aux stations des aquifères en roches meubles. Quant aux virus, les écarts enregistrés selon le type d'aquifère ne sont pas significatifs.

Figure 16.5

Bactéries fécales, virus et protozoaires dans les eaux souterraines (2009/2010) par rapport au type d'aquifère

Base : présence par station de mesure NAQUA. 50 station du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010. Nombre de stations par type d'aquifère : aquifères en roches meubles : 43 ; aquifères fissurés : 7 ; aquifères karstiques : 9. Bactéries fécales : bactéries indicatrices et bactéries pathogènes.



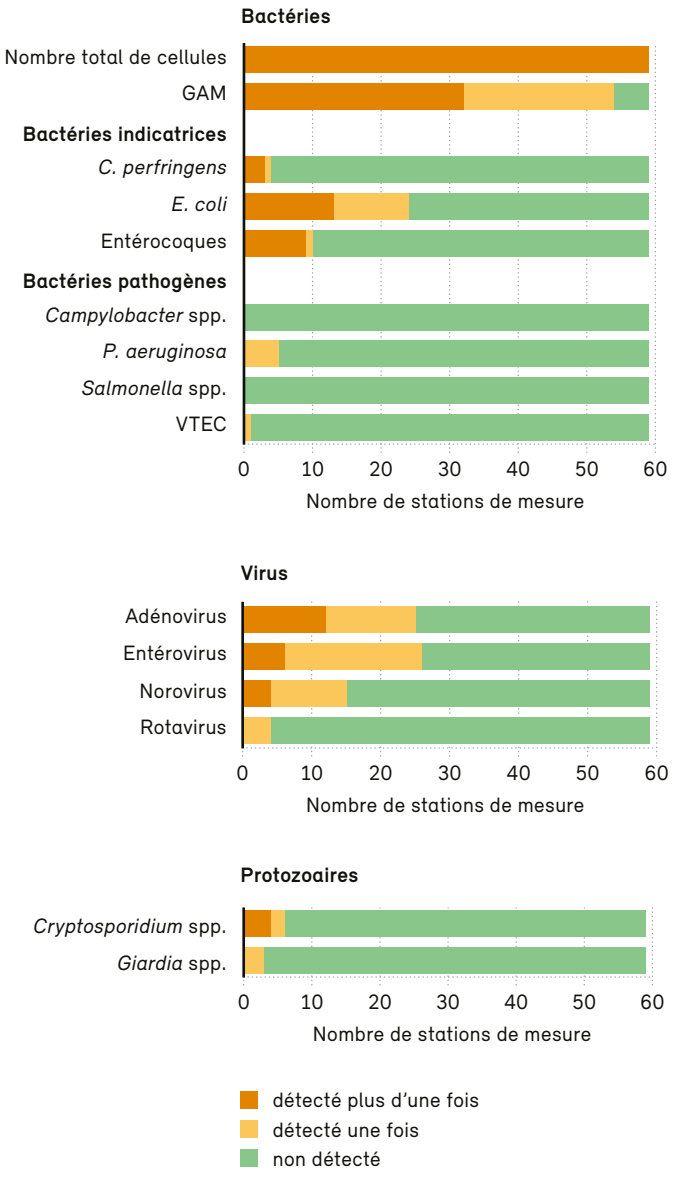
Nette variabilité des paramètres

Dans la plupart des stations de mesure où les microorganismes étudiés ont été détectés, une nette variabilité de la présence des différents paramètres microbiologiques a été observée. Seuls les échantillons de quelques stations contenaient tous régulièrement les microorganismes fécaux analysés. En ce qui concerne les bactéries indicatrices, les *E. coli* ont été détectées non seulement le plus fréquemment mais également à plusieurs reprises dans plus de la moitié des stations dont les résultats étaient positifs (fig. 16.6). Les entérocoques et les *C. perfringens* ont certes été rencontrés moins souvent, mais également à plusieurs reprises dans la majorité des stations concernées. Un constat pareil s'applique aux adénovirus et aux cryptosporidies chez les protozoaires. Pour les autres paramètres d'origine fécale, les résultats positifs enregistrés aux différentes stations correspondent le plus souvent à des détections isolées.

Figure 16.6

Microorganismes dans les eaux souterraines (2009/2010) et leur variabilité

Base : présence par station de mesure NAQUA. 50 stations du module TREND et 9 du module SPEZ. Étude pilote 2009/2010.



16.4 Analyse

16.4.1 Aperçu

Microorganismes d'origine fécale très fréquents

Globalement, des microorganismes d'origine fécale ont été détectés relativement souvent, soit à plus de deux tiers des 50 stations de mesure du module TREND et des neuf stations du module SPEZ spécialement sélectionnées pour l'étude pilote. Même si les résultats ne débouchent pas sur des conclusions statistiquement significatives pour l'ensemble du pays, ils mettent néanmoins en évidence la pertinence de ces microorganismes pour la qualité des eaux souterraines. Lors de l'utilisation de ces eaux pour l'approvisionnement en eau potable, ce sont en effet les contaminations microbiologiques qui détériorent le plus fréquemment la qualité de l'eau brute. Environ 80 % des réclamations concernant l'eau potable sont attribuées à la qualité microbiologique, ce qui correspond à 6 % environ des contrôles effectués (OFSP 2012).

Rôle des virus et des protozoaires incertain
Des constituants de virus ont été détectés assez souvent dans tous les types d'aquifères. Quant à savoir si leur présence s'explique par leur relativement grande persistance dans l'environnement ou s'il s'agit uniquement de constituants désormais inactifs de ces microorganismes, les résultats de l'étude pilote ne permettent pas de le dire. La méthode biomoléculaire PCR fournit uniquement des informations purement qualitatives, c'est-à-dire si du matériel génétique du type de virus analysé est présent dans un échantillon. Elle n'est pas à même de fournir des indications sur la quantité ni sur la possibilité de multiplication (activité), soit l'infectiosité, ni dès lors sur l'effet pathogène des virus. La même remarque s'applique aux formes durables des protozoaires, dont le comptage ne permet en rien de vérifier l'infectiosité ou la vitalité.

Bactéries indicatrices révélant la présence d'agents pathogènes
Tous les échantillons dans lesquels des bactéries pathogènes ont été détectées contenaient aussi des bactéries indicatrices. À une exception près (un cyste de *Gardia*), le même constat vaut pour les protozoaires. Les bactéries indicatrices, notamment *E. coli,* constituent donc un bon paramètre pour révéler la présence de microorganismes d'origine fécale dans les eaux souterraines. La détection de bactéries indicatrices signale en général la présence éventuelle de microorganismes pathogènes dans l'eau souterraine, car ils empruntent les mêmes voies pour y parvenir. Contrairement aux bactéries pathogènes et aux protozoaires, les virus, ou plutôt les constituants de virus, ont souvent été détectés indépendamment de la présence de bactéries indicatrices, en particulier dans les aquifères en roches meubles.

Bonne qualité microbiologique en roches meubles
Aucune bactérie fécale n'a été détectée dans la majorité des stations de mesure situées dans des aquifères en roches meubles, essentiels pour l'approvisionnement en eau potable. En outre, des bactéries pathogènes et des protozoaires n'y font que des apparitions sporadiques. La présence assez rare de bactéries fécales prouve que la qualité de ces ressources en eaux souterraines est généralement bonne. Cette qualité est sans doute aussi à mettre sur le compte des mesures de protection appliquées aux stations servant à l'exploitation d'eau potable. Dans les aquifères fissurés et, plus particulièrement, dans les aquifères karstiques, l'étude a enregistré des teneurs en microorganismes plus élevées, mais qui n'ont rien d'exceptionnel pour ces types d'aquifères (Sinreich et al. 2014).

16.4.2 Facteurs d'influence

Type d'aquifère comme facteur primordial
Le type de microorganismes fécaux et la fréquence de leur présence aux différentes stations de mesure peuvent présenter une corrélation avec le type d'aquifère ou avec l'utilisation du sol dans le bassin d'alimentation. Pour la plupart des microorganismes, à l'exception des virus, le type d'aquifère constitue, comme prévu, un facteur primordial qui détermine leur présence ainsi que leur teneur dans l'eau (fig. 16.5). Son rôle découle de la vulnérabilité de chaque type d'aquifère à l'apport et au transport de microorganismes.

Aquifères karstiques extrêmement vulnérables
Très hétérogènes et souvent recouverts seulement d'une mince couche de sol, les aquifères karstiques sont naturellement plus sensibles à l'apport de polluants et de microorganismes que les aquifères en roches meubles ou la plupart des aquifères fissurés. En présence de zones d'infiltration préférentielle (pertes, p. ex.), un épandage de matières fécales, même sur une petite surface, peut engendrer un apport rapide de microorganismes dans les eaux souterraines. De plus, la vulnérabilité s'accroît durant les précipitations ou la fonte des neiges. Dans le cas d'une pollution microbienne, une petite surface d'apport – soit aussi une utilisation secondaire du sol dans le bassin d'alimentation – peut suffire pour provoquer une contamination des eaux souterraines.

Rôle secondaire de l'utilisation du sol
C'est surtout dans les bassins d'alimentation où est pratiqué l'élevage de bétail qu'il faut en général s'attendre à des apports de microorganismes d'origine fécale dans le sous-sol (lisier et mise en pâture). Des microorganismes de ce type étaient ainsi présents dans les eaux souterraines d'un nombre relativement élevé de stations de mesure où l'utilisation principale des bassins d'alimentation était classée dans les catégories « production herbagère et bétail » et « grandes cultures ». La même

remarque vaut cependant aussi pour les stations situées en forêt, l'apport de microorganismes n'y devrait pas être supérieur à la moyenne. Les bassins d'alimentation couverts de forêts sont toutefois typiques de régions karstiques, de sorte que les stations vulnérables étudiées dans les aquifères karstiques affichaient souvent une utilisation principale du sol « forêt », celle-ci étant toujours associée à une utilisation secondaire relevant du secteur agricole.

Grande variabilité des résultats
Comparés aux résultats des polluants persistants dissous dans l'eau, ceux mesurés pour les microorganismes dépendent nettement plus souvent des conditions météorologiques et hydrologiques ainsi que de l'activité d'utilisation immédiatement avant l'échantillonnage. Ce constat s'applique surtout aux aquifères hétérogènes réagissant très rapidement, soit ceux dont le niveau des eaux souterraines ou le débit des sources réagissent presque instantanément aux précipitations. Dans de telles situations, les résultats microbiologiques peuvent varier fortement en un laps de temps très bref. Les teneurs mesurées étaient donc en général, surtout aux stations de mesure d'aquifères karstiques, les plus élevées après un épisode de précipitations ou durant une recharge accrue des eaux souterraines.

Constituants de virus présents également en roches meubles
Des constituants des virus analysés, dont les différents types sont tous pathogènes pour l'être humain et proviennent donc d'excréments humains, ont été détectés particulièrement souvent à des stations de mesure alimentées en grande partie par des cours d'eau. Ce constat révèle qu'ils parviennent dans les eaux souterraines également par le biais du réseau d'assainissement et les cours d'eau (chap. 13). L'apport de virus pathogènes pour l'être humain pourrait également être causé par l'épandage d'eaux usées domestiques avec le lisier. Aux termes de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), de tels épandages sont autorisés pour les exploitations agricoles comprenant un important cheptel bovin ou porcin aussi bien dans le périmètre des égouts publics qu'en dehors de ce périmètre (art. 12, al. 4, et art. 13, al. 1, LEaux). Cet apport peut être important notamment dans les régions karstiques.

16.4.3 Monitoring

Paramètres non inclus dans le monitoring à long terme
En raison de la forte variabilité des résultats, les échantillonnages destinés à analyser les paramètres microbiologiques fournissent une image instantanée de la situation. Comme NAQUA comprend habituellement le prélèvement d'un à quatre échantillons par an, ceux-ci n'apporteraient que des données insuffisantes sur la qualité effective et sur son évolution à long terme. Pour l'heure, il n'est donc pas prévu d'inclure des paramètres microbiologiques dans le monitoring à long terme de NAQUA. Le moment venu, d'autres analyses peuvent être réalisées pour vérifier les résultats de l'étude pilote ou pour répondre à de nouvelles questions.

Déterminer l'infectiosité des virus et des protozoaires
Le rôle des constituants de virus observés n'est pas encore clairement établi, d'autant plus qu'aucun virus infectieux n'a encore été décelé dans les eaux souterraines suisses. Vu le minime nombre de cas de maladies dus à l'eau potable, il paraît logique que les aquifères en roches meubles retiennent suffisamment, voire éliminent, les virus sensiblement plus petits et plus résistants, de même que les bactéries et les protozoaires. Les évaluations devraient néanmoins se poursuivre dès que les méthodes d'analyse auront fait les progrès nécessaires.

Autres paramètres servant à identifier des pollutions fécales
À huit stations de mesure du module TREND, spécialement sélectionnées, l'étude pilote « Microbial Source Tracking » 2012/2013 a testé d'autres paramètres à titre d'indicateurs de pollutions fécales (Diston et al. 2015). Ces travaux ont notamment inclus l'analyse de marqueurs moléculaires capables de révéler spécifiquement la présence de matières fécales humaines ou animales. Des paramètres indicateurs de sources de matières fécales humaines ont été détectés dans les eaux souterraines des huit stations, ce qui confirme une source potentielle aussi pour des constituants de virus pathogènes pour l'être humain. Dans les échantillons issus de sept des huit stations considérées, il a en outre été possible de cultiver des virus actifs qui prennent des bactéries fécales comme hôtes (bactériophages), sans être eux-mêmes pathogènes pour l'être humain.

État de référence de la biocénose

Pour caractériser la biocénose des eaux souterraines, il est en principe possible d'utiliser les paramètres mesurés dans le cadre de l'étude pilote, c'est-à-dire le nombre total de cellules, les GAM et les *E. coli.* Les teneurs de ces microorganismes devraient néanmoins être comparées avec un état de référence de la biocénose naturelle des eaux souterraines typique du site, état de référence qui n'a jusqu'ici pas encore été défini. La même remarque s'applique à la faune des eaux souterraines, que l'étude pilote « Stygofaune » 2013/2014 n'a analysée qu'à quelques-unes des stations de mesure situées dans des régions sélectionnées (OFEV 2015).

17 Bilan : évaluation et actions requises

La bonne qualité des eaux souterraines ne va plus de soi
L'état des eaux souterraines en Suisse permet encore de puiser de l'eau potable de qualité irréprochable et en quantité suffisante dans les aquifères. Cette situation ne va cependant plus de soi : notre principale ressource en eau potable subit une pression croissante. Le présent rapport de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA explique ainsi que les relevés font état d'une pollution des eaux souterraines dans de nombreuses stations de mesure. À titre de précaution, il importe dès lors de poursuivre ou de multiplier les efforts destinés à réduire la pollution. Pour assurer une protection efficace des ressources en eaux souterraines, il convient d'adapter localement la production agricole de manière à éviter leur pollution. De plus, il faut délimiter des zones de protection des eaux souterraines ayant valeur contraignante et dimensionnées de manière juste, tâche qui n'a pas encore été réalisée pour environ 40 % des captages d'eau potable en Suisse (OFEV 2018d). Par ailleurs, de graves conflits d'utilisation existent dans de nombreuses zones de protection définies conformément à la loi et y engendrent des risques pour l'exploitation de l'eau potable.

17.1 Évaluation de l'état des eaux souterraines

État non naturel du fait de la charge de nitrates
Ce sont les nitrates qui constituent la plus forte charge polluante : à l'état naturel, la concentration de nitrates dans les eaux souterraines est de l'ordre du milligramme par litre. Sur le Plateau, 80 % des stations de mesure enregistrent pourtant une concentration supérieure à 10 mg/l. Cette pollution en nitrates est principalement due à l'agriculture : chaque année, plus de 150 000 t de nitrates parviennent dans les eaux par son intermédiaire (Heldstab et al. 2010).

Exigences chiffrées pas toujours respectées
L'évaluation de la qualité des eaux souterraines par rapport aux exigences chiffrées de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) débouche sur le constat suivant : les dépassements les plus fréquents sont dus aux nitrates (concentrations de plus de 25 mg/l pour 15 à 20 % des stations de mesure). Quelques dépassements sont toutefois occasionnés par d'autres substances, tels les hydrocarbures halogénés volatils (HHV ; concentrations de plus de 1 µg/l à 4 % des stations) ou les substances actives de produits phytosanitaires (concentrations de plus de 0,1 µg/l à 2 % des stations). Les nitrates et les produits phytosanitaires proviennent principalement de l'agriculture et les HHV, de sites contaminés.

Large présence de substances étrangères
Dans l'ensemble, des résidus de substances de synthèse, parfois persistantes, ont été détectés dans plus de la moitié des stations de mesure des eaux souterraines. Bien que les exigences chiffrées soient malgré tout le plus souvent respectées, la présence de ces résidus contrevient à l'objectif de l'OEaux, selon lequel les eaux du sous-sol ne doivent pas contenir de substances de synthèse persistantes. Au total, une centaine de substances étrangères différentes, qui proviennent surtout de l'agriculture et de l'évacuation des eaux urbaines, ont été identifiées.

Les eaux usées peuvent s'infiltrer dans les eaux souterraines avec les eaux de rivière ou en raison du manque d'étanchéité des égouts. Diverses substances (médicaments, agents anticorrosifs, édulcorants artificiels, composés perfluorés) ou des microorganismes parviennent ainsi en concentrations traces des zones urbanisées aux eaux souterraines.

Des substances issues de la décomposition de produits phytosanitaires, appelés métabolites de produits phytosanitaires, ont été détectées auprès de 50 à 60 % des stations de mesure. Elles proviennent en majorité de l'agriculture. Les concentrations les plus élevées sont dues aux métabolites des herbicides chloridazone et métolachlore. Le chloridazone est employé uniquement dans la culture de betterave rouge ainsi que de betteraves sucrière et fourragère, le métolachlore principalement dans celle de maïs. L'OEaux ne définit pas d'exigence chiffrée pour la plupart des métabolites de produits phytosanitaires.

Éléments traces

En divers endroits, les relevés NAQUA mettent en évidence des valeurs légèrement accrues d'éléments traces, tels le cuivre et le zinc (des métaux lourds). Les détections de certains éléments traces particulièrement problématiques, comme l'arsenic, l'antimoine, le plomb, le cadmium ou l'uranium, ne suggèrent toutefois pas que leurs concentrations accrues dans les eaux souterraines soient d'origine anthropique. Divers éléments traces sont en effet présents naturellement en faibles concentrations dans les eaux souterraines, mais peuvent aussi provenir de nombreuses sources anthropiques. Parmi celles-ci, mentionnons par exemple les eaux de chaussées ou de voies ferrées, l'assainissement urbain, l'eau d'infiltration, les eaux usées domestiques ou les apports de l'agriculture. Les données disponibles et les faibles concentrations ne permettent toutefois pas de déterminer avec certitude la source des substances identifiées.

Dépassements isolés des valeurs maximales fixées pour l'eau potable

Les valeurs maximales définies pour l'eau potable[1], en général supérieures aux exigences chiffrées de l'OEaux, ne sont dépassées qu'à quelques rares stations de mesure des eaux souterraines. Ces résultats soulignent que les eaux souterraines présentent le plus souvent une qualité suffisante pour être utilisées comme eau potable, sans qu'il soit nécessaire de recourir à un traitement lourd. Les valeurs maximales de l'OPBD n'ont été dépassées que par les nitrates (3 % des stations de mesure) et des substances actives de produits phytosanitaires (2 % des stations) ou certains métabolites de produits phytosanitaires (1 % des stations).

17.2 Actions requises et mesures

Les mesures préventives jouent un rôle crucial dans la protection des eaux souterraines, car celles-ci séjournent souvent de nombreuses années, voire des décennies, dans le sous-sol avant d'être puisées dans un captage. Une fois les eaux souterraines contaminées par une substance persistante, il faut souvent beaucoup de temps pour qu'une réduction des apports de cette substance conduise à une amélioration de la qualité des eaux captées. Compte tenu de l'expansion rapide des zones urbanisées et des infrastructures, il importe de protéger les eaux souterraines bien plus efficacement. Cette tâche incombe en particulier aux autorités cantonales et communales chargées d'appliquer la législation sur la protection des eaux et celle sur l'aménagement du territoire.

Réduire les apports de nitrates

À l'aune des exigences chiffrées de l'OEaux, les fortes concentrations de nitrates constituent le problème majeur en ce qui concerne la qualité des eaux souterraines. Abstraction faite de variations dues principalement à des événements météorologiques, ces concentrations n'ont guère changé depuis le début des relevés NAQUA en 2002. La résolution du problème exige en particulier des actions dans l'agriculture, parce que celle-ci occasionne directement 75 % des émissions de nitrates qui atteignent les eaux souterraines (Heldstab et al. 2010) et que l'exigence chiffrée de l'OEaux est surtout dépassée dans les régions de grandes cultures. L'agriculture contribue également de manière indirecte, par d'importantes émissions d'ammoniac, à l'apport de nitrates dans les eaux souterraines : libéré dans l'atmosphère, l'ammoniac se disperse sur toute la Suisse ; une fois déposé sur le sol, il se transforme en nitrates et est partiellement emporté par lessivage vers les eaux souterraines.

Leçons à tirer de quelques projets d'assainissement : optimiser l'exploitation agricole

Une trentaine de projets sont actuellement menés en vertu de l'art. 62*a* LEaux dans les aires d'alimentation de captages d'eaux souterraines pour abaisser les concentrations de nitrates. Ces projets visent à réduire suffisamment le lessivage de nitrates, principalement dans les grandes cultures et la culture maraîchère, afin que les eaux souterraines exploitées respectent l'exigence chiffrée (fixée à 25 mg/l pour les nitrates). Ces projets d'assainissement ne touchent cependant qu'une assez faible proportion des réservoirs aquifères contaminés. Pour empêcher un apport excessif de nitrates dans les eaux souterraines à l'échelle nationale, les mesures probantes élaborées dans le cadre de ces projets devraient

1 Dans l'ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD). Conformément à l'annexe 2, ch. 22, al. 1, OEaux, la qualité de l'eau du sous-sol, utilisée comme eau potable ou destinée à l'être, doit être telle qu'après un procédé de traitement simple, l'eau respecte les exigences de la législation sur les denrées alimentaires, en particulier celles de l'OPBD.

être appliquées de façon permanente dans les régions concernées, et la politique agricole devrait étendre leur mise en œuvre aux aires d'alimentation des captages d'eau potable dans toute la Suisse.

À titre de condition préalable, les cantons devraient délimiter les aires d'alimentations des captages en question. Dans ces aires, l'agriculture devrait ensuite réduire la part des grandes cultures à un niveau tolérable et restreindre de manière ciblée les cultures à risque, comme la culture maraîchère, de tabac ou de pommes de terre. Diverses mesures peuvent renforcer de tels efforts : optimiser la rotation des cultures, diminuer les apports d'engrais azotés, imposer une couverture végétale complète du sol en hiver, interdire le labour avant le printemps, etc. Pour promouvoir ce type d'agriculture, respectueuse des eaux souterraines et adaptée au site, il conviendrait par ailleurs de développer les prestations écologiques requises pour les adapter aux conditions régionales. Une réduction générale et sensible des émissions d'ammoniac dans l'agriculture suisse et une diminution de la quantité d'engrais épandu contribueraient à atténuer davantage la pollution des eaux souterraines.

Appliquer le plan d'action Produits phytosanitaires

Les résidus de produits phytosanitaires comptent parmi les substances étrangères les plus fréquemment détectées dans les eaux souterraines. Puisqu'elles proviennent principalement de l'agriculture, c'est dans ce secteur que des actions s'imposent en priorité. Le plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires (PA PPh) a pour objectif, entre autres, de diminuer nettement les apports de métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (Conseil fédéral 2017). La Confédération a déjà lancé une action très importante dans ce sens : depuis début 2018, elle verse des contributions à l'efficience des ressources pour soutenir une culture de betterave sucrière qui renonce entièrement ou partiellement aux herbicides. Les agriculteurs doivent abandonner totalement le recours au chloridazone, une substance active de produits phytosanitaires dont les métabolites sont les plus largement répandus dans les eaux souterraines en concentrations élevées. Divers programmes, à l'image de celui mené dans le Seeland bernois, prouvent qu'il est possible de se passer dans une large mesure de cette substance. L'autorisation du chloridazone a expiré dans l'Union européenne fin 2018. La Suisse réévalue elle aussi cette substance active. Une annulation de l'autorisation se traduirait, sur le moyen à long terme, par une nette réduction des métabolites de produits phytosanitaires présents dans les eaux souterraines. À partir de 2019, des paiements directs devraient par ailleurs promouvoir un abandon complet ou partiel des herbicides dans d'autres cultures également. L'application rigoureuse d'autres mesures du PA PPh (promotion de bonnes pratiques professionnelles et contrôle plus strict des aspects liés à l'eau, p. ex.) ne pourra qu'améliorer la protection des eaux souterraines. Dans le cadre de ce plan d'action, il importe enfin de développer et de prioriser d'autres mesures visant à prévenir la contamination des eaux souterraines par des produits phytosanitaires. Seule une application des mesures à l'échelle nationale permettra à la Suisse de se rapprocher de l'objectif du PA PPh : réduire nettement la charge de métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines d'ici à 2027.

Éliminer les micropolluants dans les STEP

Les eaux usées traitées qui s'infiltrent dans les eaux souterraines avec l'eau des rivières peuvent contenir des substances étrangères. Pour réduire la présence de micropolluants dans ces eaux, des stations d'épuration des eaux usées (STEP) sélectionnées selon des critères précis seront équipées d'une étape de traitement supplémentaire au cours des vingt années à venir. Elles comprennent les STEP comptant au moins 8000 habitants raccordés lorsque leur équipement s'avère indispensable en raison de conditions hydrogéologiques particulières. L'avancement des travaux dans ce domaine réduira donc dans de nombreux captages la charge de substances étrangères qui parviennent dans les eaux souterraines via les eaux usées et les cours d'eau.

HHV : parachever l'assainissement des sites contaminés

D'autres interventions requises concernent les substances étrangères issues d'anciennes décharges, de lieux d'accidents et d'aires d'exploitations qui parviennent dans le sous-sol et les eaux souterraines. La Suisse s'est en priorité concentrée sur l'assainissement de ces sites contaminés. De gros efforts restent nécessaires pour mener à bien les futurs projets, dont certains

s'annoncent fort coûteux. Cela vaut surtout pour les sites pollués d'où des HHV s'échappent et rejoignent les eaux souterraines. Il incombe aux autorités d'activer les travaux afin de maintenir à la baisse la pollution des eaux souterraines par des substances étrangères provenant de ces sites. L'assainissement présente des difficultés particulières en cas de pollution par des hydrocarbures chlorés (HCC), tel le tétrachloroéthène, responsable des plus graves pollutions des eaux par des hydrocarbures. Étant donné que les HCC migrent rapidement en profondeur et qu'ils forment souvent des métabolites plus toxiques, l'assainissement des sites pollués est le plus souvent réalisé sur place et ne déploie ses effets qu'ultérieurement. Dans nombre de cas, la pollution des eaux souterraines persistera encore un certain temps.

Garantir l'approvisionnement en eau potable
Le fait que la Suisse n'utilise que 7 % environ du volume des eaux souterraines théoriquement susceptibles de faire l'objet d'une exploitation durable comme eau potable ne signifie pas qu'on puisse aller dans l'insouciance. Les 93 % restants ne sont en effet plus guère disponibles, car leur utilisation sans risque ne peut être assurée ou exigerait des coûts disproportionnés. D'une part, l'extension des zones urbanisées et des voies de communication réduit la protection assurée par le sol, qui sert de filtre lors de la recharge des eaux souterraines. Avec une diminution de cet effet filtrant, les risques augmentent que les agents pathogènes et les substances étrangères parviendraient en quantités telles dans les captages qu'ils constitueraient une menace pour l'eau potable. D'autre part, l'urbanisation croissante et l'intensification de l'agriculture contraignent de plus en plus les services des eaux locaux ou régionaux à abandonner des captages d'eaux souterraines. Ces abandons sont motivés par des conflits d'utilisation et les risques qu'ils engendrent pour l'eau potable, notamment lorsque des agents pathogènes ou des substances indésirables peuvent parvenir dans les captages. Sur le Plateau, il sera de plus en plus difficile, voire impossible, de construire de nouveaux captages, car l'espace fait défaut pour délimiter les zones de protection requises sans conflits d'utilisation considérables.

Des zones de protection pour préserver les ressources d'eau potable
L'accroissement de la pression sur les réserves disponibles d'eaux souterraines souligne l'importance des zones et des périmètres de protection où les activités qui mettent ces eaux en danger sont restreintes, voire interdites. Des interventions s'imposent là où les captages d'eau potable ne possèdent pas de zones de protection conformes à la loi, par exemple parce qu'elles sont provisoires ou trop petites, voire inexistantes. Seules des zones et des aires de protection délimitées correctement permettent d'appliquer résolument les prescriptions légales.

17.3 Perspectives pour le monitoring

Développement de NAQUA
Dans le cadre du monitoring à long terme de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, la Confédération et les cantons continueront, à l'avenir aussi, de relever, d'analyser et de publier des données sur l'état et l'évolution de la quantité et de la qualité des eaux souterraines à l'échelle nationale. Grâce aux analyses de NAQUA, il est possible de repérer très tôt les substances pertinentes pour les eaux souterraines ainsi que d'élaborer et d'évaluer des mesures destinées à protéger les ressources en eaux souterraines et de renforcer l'application de la législation. Les nouvelles connaissances et les nouvelles questions servent également de base pour développer sans cesse le monitoring des eaux souterraines. L'OFEV veillera à vérifier régulièrement, et le cas échéant à adapter, les paramètres, les stations de mesure et la fréquence des prélèvements en impliquant les divers intervenants.

Accent sur les micropolluants
Des études pilotes continueront de compléter régulièrement le monitoring à long terme de NAQUA pour lui permettre de relever les nouveaux défis, notamment dans le domaine des micropolluants. Le monitoring des résidus de produits phytosanitaires restera parmi les priorités, car ces produits sont appliqués à large échelle, en particulier dans l'agriculture, et parce que leurs substances actives forment un large éventail qui ne cesse d'évoluer. Une étude pilote actuellement en cours analyse ainsi près de 200 substances actives et environ 1000 de leurs

métabolites à une sélection de stations de mesure. Ses résultats devraient apporter des indications cruciales pour améliorer les mesures destinées à protéger les eaux souterraines et optimiser leur monitoring à long terme. Dans le cadre du PA PPh, un projet prévoit également de multiplier les prélèvements dans certaines stations d'aquifères karstiques au bassin d'alimentation dominé par une agriculture intensive, afin de mieux déterminer la présence de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines karstiques.

NAQUA : élément du monitoring intégral des eaux

L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA est un élément du monitoring intégral des eaux en Suisse. Outre NAQUA, celui-ci comprend également l'observation de la qualité et de la quantité des eaux de surface (NAWA et réseau hydrologique de base). La Confédération et les services cantonaux spécialisés continueront de collaborer étroitement dans ce cadre. Mis sur pied en 2016, le nouveau groupe d'accompagnement stratégique sur l'évaluation des eaux en Suisse garantit de plus une coordination et une harmonisation optimales des stratégies d'évaluation du système hydrique. Grâce aux différents réseaux de mesure, la Confédération dispose des bases nécessaires pour connaître et évaluer, à l'avenir aussi, l'état et l'évolution du système hydrique dans son ensemble.

Bibliographie

AEE. Agence européenne pour l'environnement (2018) : Waterbase – Groundwater. Agence européenne pour l'environnement. [Dernière modification : 10.4.2018]. *https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-water-quality.*

ARE. Office fédéral du développement territorial (2015) : Cercle Indicateurs. Indicateurs de développement durable pour les cantons et les communes. *www.are.admin.ch/cercleindicateurs*

AWEL. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (2013) : Mikroverunreinigungen in der Glatt und im Grundwasser des Glatttals. Ergebnisse der Untersuchungskampagne 2012/13. Zurich.

Bigalke M., Rehmus A., Keller A. (2016) : Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Bericht im Auftrag des BLW.

Burger A., Recordon E., Bovet D., Cotton L., Saugy B. (1985): Thermique des nappes souterraines. Presses polytechniques romandes. Lausanne.

Buser A., Morf L. (2009) : Substance flow analysis for Switzerland. Perfluorinated surfactants perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA). Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 0922. Berne.

CE. Décision (UE) 2015/633 du Conseil du 20 avril 2015 concernant la présentation, au nom de l'Union européenne, d'une proposition d'inscription de substances chimiques supplémentaires à l'annexe A de la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. Journal officiel de l'Union européenne. 23.4.2015. L 104/14.

CH. Confédération suisse (2016) : Premières démarches de la Suisse en vue de la réalisation de l'Agenda 2030 de développement durable. Berne.

CIPR. Commission internationale pour la protection du Rhin (1999) : Convention pour la protection du Rhin. 12.4.1999.

CIPR. Commission internationale pour la protection du Rhin (2012) : Fiche de données sur les substances – Agents complexants. Rapport 196A.

CIRC. Centre international de recherche sur le cancer (2015) : Glyphosate. Monographies du CIRC. 112.

Conseil fédéral (2017) : Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires. 6.9.2017.

Conseil fédéral (2018) : Environnement Suisse 2018. Berne.

Diston D., Sinreich M., Zimmermann S., Baumgartner A., Felleisen R. (2015) : Evaluation of molecular- and culture-dependent MST markers to detect fecal contamination and indicate viral presence in good quality groundwater. Environ. Sci. Techn. 49 : 7142-7151.

ECHA. Agence européenne des produits chimiques (2013) : Inclusion of Substances of Very High Concern in the Candidate List (Decision of the European Chemicals Agency). 17.6.2013. ED/ 69/2013.

ECHA. Agence européenne des produits chimiques (2017) : Glyphosate not classified as a carcinogen by ECHA. ECHA/PR/17/06. *https://echa.europa.eu/de/-/glyphosate-not-classified-as-a-carcinogen-by-echa*.

EFSA. Autorité européenne de sécurité des aliments (2015) : Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance glyphosate. EFSA Journal. 13, 11 : 4302.

Epting J., Scheidler S., Egli L., Affolter A., Mueller M.H., García-Gil A., Borer P., Huggenberger P. (2017) : Thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources – A paradigmatic example. Sci. Total Environ. 15, 596-597 : 87-96.

Etcheverry D. (2002) : Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Office fédéral des eaux et de la géologie. Rapports de l'OFEG. Série Géologie. N° 2. Berne.

EU. Commission Regulation (EU) 2017/1000 of 13 June 2017 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related substances.

Fenner K., Kern S., Schärer M., Muralt R., Reinhardt M., Escher B. (2011) : Transformationsprodukte von organischen Mikroverunreinigungen. Untersuchung von Auftreten und Wirkung im Gewässer. Gas Wasser Abwasser gwa. 2011, 5 : 335-345.

Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2011) : Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. Geophysical Research Letters. 38, L23401.

Freiburghaus M. (2009) : Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. Gas Wasser Abwasser gwa. 2009, 12 : 1001-1009.

Freiburghaus M. (2012) : Aufbereitung von Trinkwasser in der Schweiz: Auswertung der SVGW-Statistik 2005 und 2010. Aqua & Gas. 2012, 9 : 78-81.

Garnier F. (2012) : Contribution à l'évaluation biogéochimique des impacts liés à l'exploitation géothermique des aquifères superficiels : Expérimentations et simulations à l'échelle d'un pilote et d'installations réelles. Thèse de doctorat de l'école doctorale Sciences et Technologies, Université d'Orléans.

GCOS Suisse. Système national d'observation du climat. *https://www.meteosuisse.admin.ch/home/recherche-et-collaboration/collaboration-internationale/gcos/systeme-national-d-observation-du-climat.html.*

GGMN. Global Groundwater Network. *https://ggmn.un-igrac.org/*

GNIP. Global Network of Isotopes in Precipitation. *http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html*

GNIR. Global Network of Isotopes in Rivers. *http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnir.html*

Götz C. W., Kase R., Hollender J. (2010b) : Micropolluants – Schéma d'évaluation de la qualité des eaux au vu des composés traces organiques issus de l'assainissement communal. Étude réalisée sur mandat de l'OFEV. Eawag. Dübendorf.

Götz C. W., Abegglen C., McArdell C. S., Koller M., Siegrist H., Hollender J., Schärer M. (2010a) : Mikroverunreinigungen. Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen. Gas Wasser Abwasser gwa. 2010, 4 : 1-9.

Hanke I., Singer H., McArdell-Buergisser C., Brennwald M., Traber D., Muralt R., Herold T., Oechslin R., Kipfer R. (2007) : Arzneimittel und Pestizide im Grundwasser. Gas Wasser Abwasser gwa. 2007, 3 : 187-196.

Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. (2010) : Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 1018. Berne.

Hollender J., Singer H., Hernando D., Kosjek T., Heath E. (2010) : « The Challenge of the Identification and Quantification of Transformation Products in the Aquatic Environment Using High Resolution Mass Spectrometry ». In : Fatta-Kassinos D. et al. (éd.). Xenobiotics in the Urban Water Cycle. Mass Flows, Environmental Process, Mitigation and Treatment Strategies. 16 : 195-211.

Hunkeler D., Goldscheider N., Rossi P., Burn C. (2006) : Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 0603. Berne.

IMS Health GmbH (2016) : Analyse der Menge an pharmazeutischen Wirkstoffen, die in der Schweiz verkauft wurden (Jahre 2014-2016). Erhebung im Auftrag des BAFU. Non publié.

Jekel M., Dott W. (2013) : Leitfaden «Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf». Wissenschaftliches Begleitvorhaben der BMBF-Fördermassnahme «Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf» (RiSKWa). Francfort.

Jordi B. (2015) : Le traitement des sites pollués avance à grands pas. État de l'investigation, de la surveillance et de l'assainissement. Office fédéral de l'environnement. État de l'environnement n° 1516. Berne.

Kiefer J., Fischer T. (2013) : Grundwasserdatenbank Wasserversorgung. Sonderbericht zum Jahresbericht 2012. Erweiterte Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit in Baden-Württemberg 2012. TZW, DVGW-Technologiezentrum Wasser. Karlsruhe.

Kötzsch S., Sinreich M. (2014) : Zellzahlen zum Grundwasser – Bestimmung mittels Durchflusszytometrie. Aqua & Gas. 2014, 3 : 14-21.

Krauss M., Singer H., Hollender J. (2010) : LC-high resolution MS in environmental analysis: from target screening to the identification of unknowns. Anal. Bioanal. Chem. 397 : 943-951.

Kunz M., Schindler Wildhaber Y., Dietzel A. (2016) : État des cours d'eau suisses. Résultats de l'Observation nationale de la qualité des eaux de surface (NAWA) 2011-2014. Office fédéral de l'environnement. État de l'environnement n° 1620. Berne.

Latino D.A.R.S., Wicker J., Gütlein M., Schmid E., Kramer S., Fenner K. (2017) : Eawag-Soil in enviPath : a new resource for exploring regulatory pesticide soil biodegradation pathways and half-life data. Environmental Science : Processes and Impacts. 19, 3 : 449-464.

LChim. Loi du 15 décembre 2000 sur les produits chimiques. RS 813.1.

LEaux. Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux. RS 814.20.

Longrée P., Singer H., Moschet C., Goetz C., Schärer M., Keusen M. (2011) : Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. Analyse und Bewertung der Situation in See und Einzugsgebiet. Gas Wasser Abwasser gwa. 2011, 7 : 495-505.

LUBW. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2018) : Grundwasser-Überwachungsprogramm. Ergebnisse der Beprobung 2017. Grundwasserschutz Bd. 58. Karlsruhe.

LUBW. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013) : Grundwasserüberwachungsprogramm – Ergebnisse der Beprobung 2012. Grundwasserschutz Bd. 47. Karlsruhe.

Mathys R., Dittmar J., Johnson C.A. (2007) : Antimony in Switzerland. A substance flow analysis. Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 0724. Berne.

Mazacek J., Ruppe S., Griesshaber D., Langlois I., Dolf R., Singer H., Leve J., Hofacker A., Leu C. (2016) : Vom Unfall zur präventiven Überwachung. Rheinüberwachungsstation (RÜS). Aqua & Gas. 2016, 11 : 66-78.

MétéoSuisse. Office fédéral de météorologie et de climatologie (2018) : National Climate Observing System (GCOS Switzerland) Update 2018.

MétéoSuisse. Office fédéral de météorologie et de climatologie (2014) : Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional. Rapport technique n° 243. Berne.

NADUF. Surveillance nationale continue des cours d'eau suisses. *www.bafu.admin.ch > Thème Eaux > Données, indicateurs, cartes > Réseaux d'observation > Observation nationale de la qualité des eaux de surface (NAWA) > Surveillance nationale continue des cours d'eau suisses (NADUF).*

OCDE. Organisation de coopération et de développement économiques (2013) : Compendium des indicateurs agro-environnementaux de l'OCDE. Consultable sur : *https://www1.oecd.org/environment/oecd-compendium-of-agri-environmental-indicators-9789264186217-en.htm*

OEaux. Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux. RS 814.201.

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2008) : Rapport agricole 2008. Berne.

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2014) : Monitoring agro-environnemental. Ensemble pour une agriculture durable. Berne.

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2016b) : In der Schweiz verkaufte Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe 2014. Non publié.

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2017b) : Rapport agricole 2017. *https://www.agrarbericht.ch/fr*

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2018) : Interdiction d'utilisation de produits phytosanitaires dans les zones de protection des eaux souterraines S2. *https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html*

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2019a) : Index des produits phytosanitaires. *https://www.psm.admin.ch/fr/wirkstoffe*

OFAG. Office fédéral de l'agriculture (2019b) : Substances actives de produits phytosanitaires : volume des ventes. *www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html*

OFAG/OSAV. Office fédéral de l'agriculture / Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (2019) : Pertinence des métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines et dans l'eau potable. État 20.5.2019. *www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html*

OFEFP. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (2004) : Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique nº 2508. Berne.

OFEFP/OFEG. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage / Office fédéral des eaux et de la géologie (2004) : NAQUA – Qualité des eaux souterraines en Suisse 2002/2003. Berne.

OFEFP/OFEG/MétéoSuisse. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage / Office fédéral des eaux et de la géologie / Office fédéral de météorologie et de climatologie (2004) : Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (1992) : Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. Atlas hydrologique de la Suisse (HADES), planche 5.2. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2004) : Réservoirs aquifères. Atlas hydrologique de la Suisse (HADES), planche 8.6. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2009a) : Résultats de l'observatoire national des eaux souterraines (NAQUA). État et évolution de 2004 à 2006. État de l'environnement nº 0903. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2009b) : Guide des hydrocarbures chlorés (HCC). *www.bafu.admin.ch > Thème Sites contaminés > Informations pour spécialistes > ChloroNet : plate-forme nationale sur les pollutions par des hydrocarbures chlorés (2007-2018) > Investigation des sites pollués par HCC > Guide des hydrocarbures chlorés (HCC).*

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2012) : Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet « Changement climatique et hydrologie en Suisse » (CCHydro). Connaissance de l'environnement n° 1217. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2015) : Les microorganismes et la faune des eaux souterraines : Diversité dans le sous-sol. Magazine «environnement». 2015, 1 : 49-51.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2018a) : Annuaire hydrologique de la Suisse 2017. État de l'environnement n° 1804. Berne.

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2018b) : Situation du traitement des sites pollués. *www.bafu.admin.ch > Thème Sites contaminés > Informations pour spécialistes > Traitement des sites contaminés > État d'avancement des travaux.*

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2018c) : Sites contaminés : En bref. *www.bafu.admin.ch > Thème Sites contaminés > En bref.*

OFEV. Office fédéral de l'environnement (2018d) : Schutz der Grundwasserfassungen in der Schweiz – Stand des Vollzugs. Bericht zur Umfrage bei den kantonalen Fachstellen. Berne.

OFEV/OFAG. Office fédéral de l'environnement / Office fédéral de l'agriculture (2016) : Objectifs environnementaux pour l'agriculture. Rapport d'état 2016. Connaissance de l'environnement n° 1633. Berne.

OFEV/OFAG. Office fédéral de l'environnement / Office fédéral de l'agriculture (2013) : Produits phytosanitaires dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique n° 1312. Berne.

OFS. Office fédéral de la statistique (2018) : Environnement. Statistique de poche 2018. Neuchâtel.

OFSP. Office fédéral de la santé publique (2012) : Übersicht der in der amtlichen Lebensmittelkontrolle untersuchten kontrollpflichtigen Waren – Befundstatistiken 2007/2008/2009. Berne.

OFSP. Office fédéral de la santé publique (2017) : Radioprotection et surveillance de la radioactivité en Suisse. Résultats 2016. Berne.

OPBD. Ordonnance du 16 décembre 2016 du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (RS 817.022.11).

OPPh. Ordonnance du 12 mai 2010 sur la mise en circulation des produits phytosanitaires (ordonnance sur les produits phytosanitaires). RS 916.161.

ORRChim. Ordonnance du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés aux produits chimiques. RS 814.81.

OSAV/OFEV. Office fédéral de sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires / Office fédéral de l'environnement (2016) : Mise en œuvre du protocole eau et santé en Suisse. Rapport de situation 2013-2015 en accord avec l'article 7 du protocole. Berne.

OSPAR. Commission Oslo-Paris (1992) : Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. 22 septembre 1992.

PNR 61. Comité de direction PNR 61 (2015) : Gestion durable de l'eau en Suisse. Synthèse globale du Programme national de recherche PNR 61 « Gestion durable de l'eau ». Berne.

PNUE. Programme des Nations Unies pour l'environnement (2009) : Rapport de la Conférence des Parties à la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants sur les travaux de sa quatrième réunion, Genève 4-8 mai 2009. Document UNEP/POPS/COP.4/38.

PPDB (2009) : The Pesticide Properties Database developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU); University of Hertfordshire, funded by UK national sources and the EU-funded FOOTPRINT project (FP6-SSP-022704). *http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/.*

Pronk M., Sinreich M., Guhl F., Egli T., Kötzsch S., Felleisen R., Koch M., Köster O., Raetz E., Ramseier C., Rossi P., Schürch N. (2010) : Auftreten von Mikroorganismen im Grundwasser – Ein erster landesweiter Überblick. Gas Wasser Abwasser gwa. 2010, 12 : 1059-1071.

Reemtsma T., Berger U., Arp H. P. H., Gallard H., Knepper T. P., Neumann M., Quintana J. B., de Voogt P. (2016) : Mind the Gap : Persistent and Mobile Organic Compounds – Water Contaminants That Slip Through. Environ. Sci. Techno. 50 : 10308-10315.

Reinhardt M., Kozel R., Hofacker A., Leu C. (2017) : Monitoring von PSM-Rückständen im Grundwasser. Zahlen und Fakten der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA. Aqua & Gas. 2017, 6 : 78-89.

Reinhardt M., Tremp J., Zoller O., Rupp H., Hoehn E. (2010) : Perfluorierte Chemikalien im Grundwasser. Grundlagen und Pilotstudie Schweiz. Gas Wasser Abwasser gwa. 2010, 11 : 967-978.

Salines suisses (2018) :
https://www.taufix.ch/wp-content/uploads/2018/08/Statistiken_Salzverkauf_fr.pdf.

Schmidt C. K., Brauch H.-J. (2008) : N,N-Dimethylsulfamide as Precursor for N-Nitrosodimethylamine (NDMA) Formation upon Ozonation and its Fate During Drinking Water Treatment. Environ. Sci. Technol. 42,17 : 6340-6343.

Schröder H. F., Gebhardt W., Hayashi D., Chittka U., Pinnekamp J. (2010) : Die Elimination perfluorierter Tenside (PFT) bei der Abwasserreinigung unter Einsatz weitergehender physikalisch-chemischer Verfahren. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 57, 4 : 350-356.

Schürch M., Bulgheroni M., Sinreich M. (2018) : Température des eaux souterraines. Un aperçu de l'état et de l'évolution en Suisse. Aqua & Gas. 2018, 7/8 : 40-48.

Schürch M., Kozel R., Biaggi D., Weingartner R. (2010) : Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz. Konzept und Fallbeispiele. Gas Wasser Abwasser gwa. 2010, 11 : 955-965.

Schürch M., Sinreich M., Kozel R. (2016) : Grundwasserregime an Quellen. Typisierung für die Schweiz. Aqua & Gas. 2016, 12 : 14-22.

Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Löw S., Stauffer F. (2012) : Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas. 2012, 9 : 16-28.

Sinreich M., Pronk M., Kozel R. (2014) : Microbiological monitoring and classification of karst springs. Environmental Earth Sciences. 71 : 563-572.

Spreafico M., Weingartner R. (2005) : Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Rapports de l'OFEG. Série Eaux. N° 7 : 79-100. Berne.

Spycher S., Daniel O. (2013) : Agrarumweltindikator Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Auswertungen von Daten der Zentralen Auswertung Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) der Jahre 2009-2010. Rapport établi sur mandat de l'OFSG. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil (ACW).

Umweltbundesamt (2011) : Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich. Report 0328. Wien.

Wittwer A., Gubser C. (2010) : Umsetzung Verbot PSM. Untersuchung zum Stand der Umsetzung des Anwendungsverbots von Unkrautvertilgungsmitteln auf und an Strassen, Wegen und Plätzen. Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 1014. Berne.

Répertoire

Figures

Figure 3.1 Page 14
Utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation des stations de mesure par rapport à la superficie totale du bassin

Figure 3.2 Page 16
Stations de mesure du module QUANT destinées à l'observation de l'état quantitatif des eaux souterraines, utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation et type d'aquifère

Figure 3.3 Page 17
Stations de mesure des modules TREND et SPEZ destinées à l'observation de la qualité des eaux souterraines, utilisation principale du sol dans le bassin d'alimentation et type d'aquifère

Figure 3.4 Page 18
Stations de mesure du module ISOT destinées à l'observation des isotopes dans les précipitations et les cours d'eau, et régions géographiques

Figure 4.1 Page 21
Types d'aquifères

Figure 5.1 Page 26
Précipitations (2007 à 2016)

Figure 5.2 Page 27
Niveaux des eaux souterraines et débits des sources (2007 à 2016) ainsi que régime d'eaux souterraines

Figure 5.3 Page 29
Indicateurs de la quantité des eaux souterraines (1987 à 2016)

Figure 5.4 Page 30
Niveaux des eaux souterraines ou débits des sources (1968 à 2016) à une sélection de stations de mesure

Figure 6.1 Page 37
Deutérium et oxygène 18 dans les précipitations, les cours d'eau et les eaux souterraines (2013), ainsi que région géographique et régime des eaux souterraines dans le fond des vallées

Figure 6.2 Page 35
Tritium dans les précipitations, les cours d'eau et les eaux souterraines (2009)

Figure 6.3 Page 36
Oxygène 18 et tritium dans les précipitations et les cours d'eau à une sélection de stations de mesure (1980 à 2016)

Figure 7.1 Page 39
Température des eaux souterraines et sa variabilité (2016) dans les aquifères en roches meubles, fissurés et karstiques

Figure 7.2 Page 40
Température des eaux souterraines (2016), son évolution (2000 à 2016) et type d'aquifère

Figure 7.3 Page 40
Température des eaux souterraines (2000 à 2016)

Figure 7.4 Page 41
Évolution à long terme des variations annuelles de la température des eaux souterraines (2000 à 2016) dans les aquifères en roches meubles, fissurés et karstiques

Figure 8.1 Page 44
Conductivité électrique des eaux souterraines (2007 à 2014) et type d'aquifère

Figure 8.2 Page 45
Conductivité électrique (2007 à 2014) et éléments majeurs (2007 à 2016) dans les eaux souterraines par rapport au type d'aquifère

Figure 8.3 Page 46
Sulfates et chlorures dans les eaux souterraines (2016) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 8.4 Page 47
Chlorures et sodium dans les eaux souterraines (2004 à 2016) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 9.1 Page 52
Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014)

Figure 9.2 Page 53
Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014) et type d'aquifère

Figure 9.3 Page 54
Cuivre, plomb (2006 à 2014), antimoine (2006 à 2008) et uranium (2006 à 2008 et 2012) dans les eaux souterraines par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 10.1 Page 58
Nitrates dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Figure 10.2 Page 59
Nitrates dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 10.3 Page 59
Nitrates dans les eaux souterraines (2002 à 2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 11.1 Page 68
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Figure 11.2 Page 72
Substances actives de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Figure 11.3 Page 72
Métabolites de produits phytosanitaires jugés pertinents lors de la procédure d'homologation présents dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Figure 11.4 Page 73
Métabolites de produits phytosanitaires jugés non pertinents lors de la procédure d'homologation présents dans les eaux souterraines (2014) et terres ouvertes

Figure 11.6 Page 74
Résidus de métolachlore dans les eaux souterraines (2014) et cultures de maïs vert et d'ensilage

Figure 11.7 Page 13
Résidus d'atrazine dans les eaux souterraines (2014) et cultures de maïs vert et d'ensilage

Figure 11.8 Page 75
Résidus de dichlobénil dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées, arboriculture et viticulture

Figure 11.9 Page 75
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 11.10 Page 79
Quelques substances actives et métabolites de produits phyto-sanitaires dans les eaux souterraines (2002 à 2014)

Figure 12.1 Page 89
Composés organiques volatils (COV) dans les eaux souterraines (2014)

Figure 12.2 Page 92
Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2014) et aires d'exploitation polluées par des HCC

Figure 12.3 Page 92
Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées

Figure 12.4 Page 91
MTBE, ETBE et TBA dans les eaux souterraines (2014) et surfaces urbanisées

Figure 12.5 Page 93
1,4-dioxane dans les eaux souterraines (2011/2012) et surfaces urbanisées

Figure 12.6 Page 94
Hydrocarbures halogénés volatils (HHV), hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et MTBE dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol

Figure 12.7 Page 98
Trichloroéthène, tétrachloroéthène, 1,1,1-trichloroéthane et MTBE dans les eaux souterraines (2003 à 2014)

Figure 13.1 Page 104
Médicaments dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Figure 13.2 Page 104
Agents anticorrosifs dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Figure 13.3 Page 105
Agents complexants dans les eaux souterraines (2014), eaux usées traitées dans les cours d'eau et zones urbanisées

Figure 14.1 Page 110
Composés perfluorés dans les eaux souterraines (2007/2008), eaux usées traitées dans les cours d'eau et type d'aquifère

Figure 16.1 Page 121
Nombre total de cellules, GAM, E. coli et entérocoques dans les eaux souterraines (2009/2010)

Figure 16.2 Page 121
Bactéries dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Figure 16.3 Page 122
Virus dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Figure 16.4 Page 122
Protozoaires dans les eaux souterraines (2009/2010) et type d'aquifère

Figure 16.5 Page 123
Bactéries fécales, virus et protozoaires dans les eaux souterraines (2009/2010) par rapport au type d'aquifère

Figure 16.6 Page 124
Microorganismes dans les eaux souterraines (2009/2010) et leur variabilité

Tableaux

Tableau 3.1 Page 14
Stations de mesure des différents modules selon le type de station, le type d'aquifère, l'utilisation principale du sol et l'exploitation de l'eau

Tableau 8.1 Page 46
Chlorures et sulfates dans les eaux souterraines (2007 à 2016) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux

Tableau 9.1 Page 51
Éléments traces dans les eaux souterraines (2006 à 2014)

Tableau 10.1 Page 58
Nitrates dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Tableau 11.1 Page 65
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires inclus dans le monitoring à long terme (2002 à 2014)

Tableau 11.2 Page 69
Résidus de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 11.3 Page 69
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 11.4 Page 76
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Tableau 11.5 Page 78
Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2007 à 2014) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux, soit une concentration de 0,1 µg/l

Tableau 12.1 Page 88
Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 12.2 Page 90
Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 12.3 Page 91
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 12.4 Page 91
1,4-dioxane, ETBE, MTBE et TBA dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 12.5 Page 95
Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Tableau 12.6 Page 96
Hydrocarbures halogénés volatils (HHV), hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et autres composés organiques volatils dans les eaux souterraines (2007 à 2014) par rapport à l'exigence chiffrée de l'OEaux ou une concentration de 1 µg/l

Tableau 12.7 Page 97
Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2007 à 2014)

Tableau 13.1 Page 103
Indicateurs d'eaux usées dans les eaux souterraines (2014)

Tableau 14.1 Page 109
Composés perfluorés dans les eaux souterraines (2007/2008)

Tableau 15.1 Page 114
Substances de l'étude pilote Screening (2007/2008)

Tableau 15.2 Page 115
« Nouvelles substances » (2007/2008) dans les eaux souterraines

Tableau 16.1 Page 119
Paramètres et méthodes d'analyse

Tableau 16.2 Page 120
Microorganismes dans les eaux souterraines (2009/2010)

Annexe 1

Monitoring à long terme

Paramètre	Modules				État des données
	QUANT	TREND	SPEZ	ISOT	
Niveaux des eaux souterraines et débits des sources	●				2016
Isotopes				●	2016
Températures des eaux souterraines	●				2016
Éléments majeurs		●			2016
Éléments traces		●			2016
Nitrates		●	●		2014
Produits phytosanitaires		●	●		2014
Composés organiques volatiles		●	●		2014
Indicateurs d'eaux usées		●	●		2014

Annexe 2

Liste des services cantonaux spécialisés et des organismes impliqués dans NAQUA

Services cantonaux spécialisés

- Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau
- Amt für Umwelt des Kantons Appenzell Innerrhoden
- Amt für Umwelt des Kantons Appenzell Ausserrhoden
- Office des eaux et des déchets du canton de Berne
- Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft
- Amt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen des Kantons Basel-Landschaft
- Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt
- Service de l'environnement du Canton de Fribourg
- Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
- Amt für Umweltschutz des Kantons Glarus
- Amt für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden
- Amt für Lebensmittelsicherheit und Tiergesundheit des Kantons Graubünden
- Office de l'environnement du canton du Jura
- Umwelt und Energie des Kantons Luzern
- Dienststelle Lebensmittelkontrolle und Verbraucherschutz des Kantons Luzern
- Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel
- Amt für Umwelt des Kantons Nidwalden
- Amt für Landwirtschaft und Umwelt des Kantons Obwalden
- Amt für Wasser und Energie des Kantons St. Gallen
- Amt für Verbraucherschutz und Veterinärwesen des Kantons St. Gallen
- Interkantonales Labor, Lebensmittelkontrolle Appenzell Ausserrhoden, Appenzell Innerrhoden, Schaffhausen & Umweltschutz Schaffhausen
- Amt für Umwelt des Kantons Solothurn
- Lebensmittelkontrolle des Kantons Solothurn
- Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz
- Amt für Umwelt des Kantons Thurgau
- Ufficio della protezione delle acque e dell'approvvigionamento idrico del cantone Ticino
- Ufficio del monitoraggio ambientale del cantone Ticino
- Amt für Umweltschutz des Kantons Uri
- Laboratorium der Urkantone
- Office de la consommation du canton de Vaud
- Service de l'environnement du canton de Valais
- Amt für Umwelt des Kantons Zug
- Amt für Verbraucherschutz und Lebensmittelkontrolle des Kantons Zug
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich

Autres organismes

- Agroscope, Wädenswil
- Office fédéral de la santé publique (OFSP)
- Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV)
- Institut fédéral de métrologie (METAS)
- Eawag, Dübendorf
- Wasserversorgung Stadt Zürich
- Services Industriels de Genève
- Services des eaux gérant des stations de mesure NAQUA
- Bureaux et laboratoires privés travaillant sur mandat