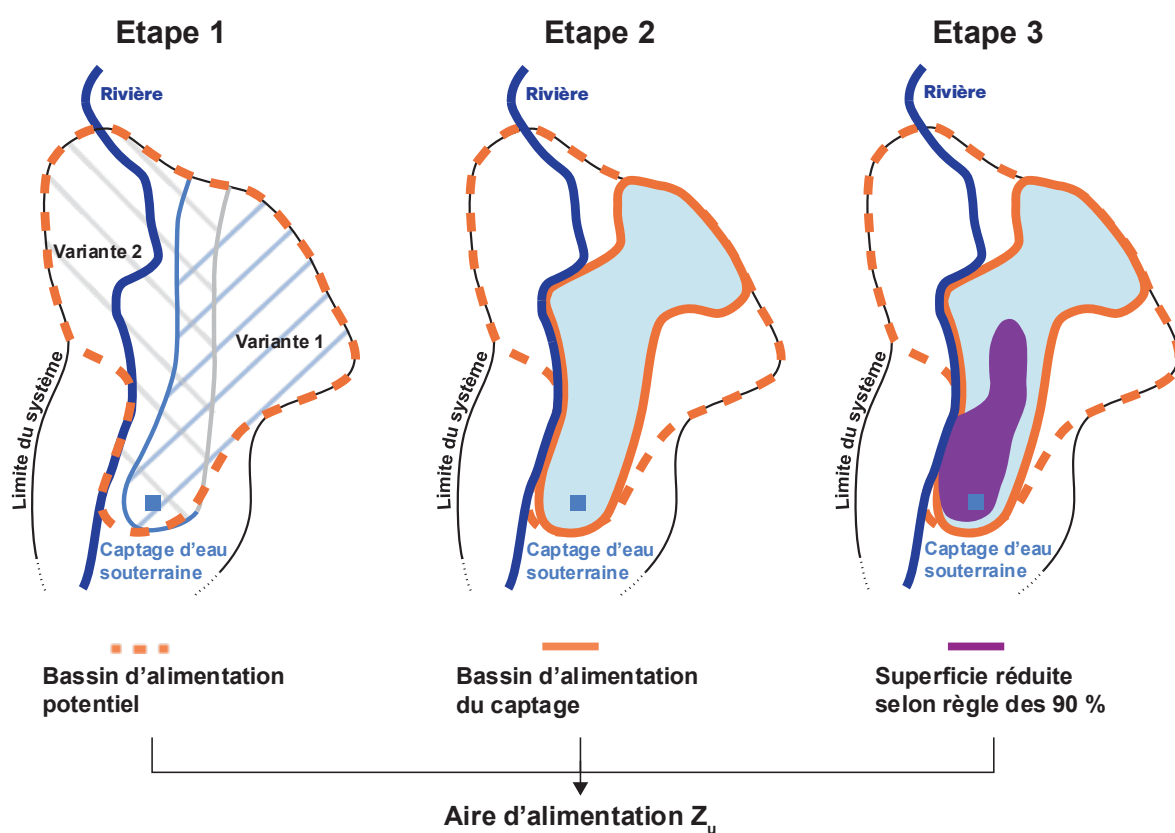


Procédure par étapes pour le dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u

Document de base



Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV



Impressum

Édition

Plateforme Protection des eaux souterraines
Université de Neuchâtel
Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)
Rue Emile-Agrand 11
2000 Neuchâtel

Équipe de rédaction

Epting Jannis, Université de Bâle AUG
Lindegger Roman (responsable de projet),
Université de Neuchâtel CHYN
Milnes Ellen, Université de Neuchâtel CHYN
Moeck Christian, Eawag et Réseau suisse d'eau souterraine
(CH-GNet)

Groupe d'expertise

Bauer Alexander, canton de Saint-Gall
Boillat Julie, canton de Fribourg
Bossy Frédéric, Hydrosol Sàrl
Bussard Thierry, Norbert SA Lausanne
Diem Samuel, CSD AG Aarau
Dürmüller Franziska, canton de Soleure
Filipponi Marco, NAGRA Wettingen
Gischig Valentin, ETHZ Zurich
Hunziker Daniela, canton de Zurich
Hunkeler Daniel, Université de Neuchâtel CHYN
Jeannin Pierre-Yves, ISSKA La Chaux-de-Fonds
Lützenkirchen Volker, canton de Zoug
Meier Rolf, SVGW Zurich
Moreau François, canton de Vaud
Och Lawrence, canton de Thurgovie
Pera Sebastian, SUPSI Lugano
Pronk Michiel, Fcm-lab Sàrl Boudry
Schatzmann Peter, Jäckli Geologie Zurich
Stoll Andreas, Université de Neuchâtel CHYN
Tschumpe Rolf, canton de Berne

Accompagnement OFEV

Collenteur Raoul, section Bases hydrogéologiques
Malaguerra Flavio, section Bases hydrogéologiques
Schärer Michael, section Protection des eaux souterraines
Schwab Corin, section Protection des eaux souterraines
Zimmermann Stephanie, section Bases hydrogéologiques

Groupe d'accompagnement de la plateforme

Protection des eaux souterraines

Badertscher Ruth, Office fédéral de l'agriculture OFAG
Bänninger Dominik, AUE canton de Bâle-Campagne
Baschung Clemens, Association suisse Infrastructures
communales ASIC
Götz Christian, Association suisse des professionnels de la
protection des eaux VSA
Hauswirth Hansueli, Association suisse des fontainiers ASF
Hug Rainer, AfU canton de Soleure
Jenny Annette, BD canton de Zurich
Kropf Raphael, Société suisse d'hydrogéologie SSH
Meier Michael, Association pour l'eau, le gaz et la chaleur SVGW
Riedener Samuel, UWE canton de Lucerne
Robbi Rudolf, Association des chimistes cantonaux
de Suisse ACCS
Schätti Christian, Office fédéral de la sécurité alimentaire et
des affaires vétérinaires OSAV
Truffer Marco, SPE canton du Valais
Veronesi Mauro, Sezione della protezione dell'aria,
dell'acqua e del suolo, canton du Tessin

Comité de pilotage de la plateforme

Protection des eaux souterraines

Beuchat Sébastien, directeur DIRNA canton de Vaud
Brunner Philip, direction CHYN Université de Neuchâtel
Eschmann Patrice, chef de la division Eaux OFEV
Eugster Martin, directeur AfU canton de Thurgovie
Stamm Christian, direction Eawag

Cette étude a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire est responsable de son contenu.

Le présent rapport a été transmis pour consultation à tous les services cantonaux chargés des mesures d'organisation du territoire pour la protection des eaux souterraines. Il a été approuvé par le comité de pilotage.

Cette publication est disponible en allemand et en français.
La version originale est en allemand.

Résumé

L'aire d'alimentation Z_u est un élément important des mesures d'organisation du territoire pour la protection des eaux souterraines. La loi fédérale sur la protection des eaux (art. 19 LEaux) et l'ordonnance sur la protection des eaux (art. 29, al. 1, et annexe 4, ch. 113 et 212, OEaux) en constituent ses bases juridiques. Dans le cadre de la modification actuellement en discussion de la LEaux, en exécution de la motion 20.3625 « Définir les aires d'alimentation des zones de captage pour protéger efficacement l'eau potable », les cantons devront davantage délimiter les aires d'alimentation. Il est prévu que de nouvelles obligations s'appliquent à tous les captages d'eau souterraine (puits et sources) d'importance régionale dont les eaux souterraines sont polluées ou pour lesquelles il existe un risque de pollution par des substances qui ne sont pas suffisamment dégradées ou retenues.

Une délimitation fiable de l'aire d'alimentation Z_u peut se révéler très difficile en raison de données incomplètes et de conditions d'écoulement souterraines complexes. Une procédure trop coûteuse ne se justifie pas pour chaque aire d'alimentation Z_u . Dans certains cas, il est plus judicieux de dimensionner généreusement une aire d'alimentation Z_u que de la délimiter plus précisément au prix d'efforts considérables. C'est notamment le cas pour les captages d'eau souterraine d'importance régionale qui ne présentent aucun danger et pour lesquels l'aire d'alimentation, même généreuse, ne comprend ni terres assolées, ni cultures spécialisées, ni zones bâties. Une procédure par étapes offre aux cantons un cadre flexible leur permettant de choisir le niveau de détail approprié. Elle permet une définition compréhensible et transparente de l'aire d'alimentation Z_u : plus les données disponibles sont complètes, mieux la surface de l'aire d'alimentation Z_u peut généralement être délimitée et donc réduite. Le présent document de base présente la procédure par étapes de dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u . Il explique le concept sous-jacent et définit les principes méthodologiques des trois étapes.

Le document s'adresse aux services cantonaux ainsi qu'aux bureaux d'études chargés de la mise en œuvre. Il constitue une base commune et vise à favoriser une application uniforme par les cantons. Le document se limite à la présentation technique de la méthodologie. La question de savoir dans quels cas choisir quelle étape de traitement, ainsi que les questions juridiques et les conséquences, ne font pas partie du présent document de base.

La procédure repose sur un traitement par étapes des limites du système hydrogéologique et des processus d'alimentation, et s'articule autour des étapes suivantes :

Étape 1 : bassin d'alimentation potentiel du captage Z_u -BAPC – D'où peut *potentiellement* provenir l'eau ?

La première étape s'appuie sur les données existantes. Sans acquérir de données supplémentaires, le bassin d'alimentation du captage potentiel BAPC est délimité sur la base d'un ou de plusieurs modèles hydrogéologiques conceptuels initiaux reposant sur des hypothèses plausibles. Les lacunes identifiées à ce stade servent à rédiger le cahier des charges pour l'acquisition ciblée de données de l'étape 2.

Étape 2 : bassin d'alimentation du captage Z_u -BAC – D'où provient *effectivement* l'eau ?

Sur la base du cahier des charges de l'étape 1, des données sont collectées de manière ciblée afin de réduire les incertitudes importantes concernant les limites du système et les processus d'alimentation. Les résultats permettent de délimiter de manière fiable le bassin d'alimentation du captage BAC sur la base d'un modèle conceptuel hydrogéologique explicite. Un cahier des charges définit les travaux complémentaires pour l'étape 3, nécessaires à la réduction de la superficie au moyen de la règle des 90 %.

Étape 3 : réduction de la superficie au moyen de la règle des 90 % Z_u -90 – D'où provient l'eau et *en quelle quantité* ?

Au moyen d'un calcul selon la règle des 90 %, le bassin d'alimentation du captage BAC est réduit aux surfaces qui contribuent le plus à l'alimentation du captage des eaux souterraines.

Le résultat de chaque étape permet au service cantonal compétent de délimiter l'aire d'alimentation Z_u sur la carte de protection des eaux. Il appartient au service cantonal compétent de déterminer si une étape supérieure pour le dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u est appropriée et si les efforts qui en découlent sont proportionnés. L'usage définira si dans le futur la rédaction d'une aide à l'exécution de l'OFEV s'avère nécessaire. Le choix devrait découler de la nécessité concrète d'agir (p. ex. pollution avérée des eaux souterraines) et des restrictions d'utilisation attendues (notamment la présence de terres assolées et de cultures spécialisées). Une proportionnalité entre l'effort nécessaire et la réduction des incertitudes doit être trouvée.

Table des matières

1	Introduction	8
1.1	Contexte et cadre légal	8
1.2	Objectif et groupes cibles.....	8
1.3	Difficultés lors de la délimitation	9
1.4	Délimitation de l'aire d'alimentation Z_u	9
2	Concept de la procédure par étapes	11
2.1	Aperçu de la procédure.....	11
2.2	Délimitation hydrogéologique du système d'écoulement	13
2.2.1	Délimitation topographique.....	14
2.2.2	Délimitation structurale	14
2.2.3	Délimitation hydraulique	14
2.3	Processus d'alimentation	15
2.3.1	Processus d'alimentation pluviale	17
2.3.2	Processus d'alimentation fluviale	17
2.3.3	Flux latéral	18
2.3.4	Exemples d'application du triangle des processus.....	18
3	Mise en œuvre de la procédure par étapes	20
3.1	Étape 1 – bassin d'alimentation potentiel Z_u -BAPC.....	20
3.1.1	Données de base existantes	20
3.1.2	Modèle conceptuel initial Z_u -BAPC.....	21
3.1.3	Évaluation de l'incertitude.....	22
3.1.4	Cahier des charges de l'étape 2.....	22
3.2	Étape 2 – Bassin d'alimentation du captage BAC	23
3.2.1	Acquisition ciblée de données	23
3.2.2	Consolidation du modèle conceptuel BAPC en BAC	23
3.2.3	Évaluation de l'incertitude.....	25
3.2.4	Cahier des charges de l'étape 3.....	25
3.3	Étape 3 – Réduction de la superficie selon la règle des 90 %	25
3.3.1	Acquisition de données pour le paramétrage du modèle.....	26
3.3.2	Réduction de la superficie selon la règle des 90 %.....	26
3.3.3	Évaluation de l'incertitude.....	29

Annexe

A1 Variantes du concept de base

- A1.1 Aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes
- A1.2 Champ d'écoulement non-stationnaire
- A1.3 Concurrence entre captages d'eau souterraine

A2 Guide pour l'acquisition de données dans la procédure par étapes

Définition des termes importants

Alimentation	L'alimentation correspond à la part de la recharge (pluviale, fluviale ou latérale) qui parvient jusqu'à un point de captage d'eau souterraine.
Aire d'alimentation Z_o	L'aire d'alimentation pour eaux superficielles Z_o vise à protéger les eaux de surface contre les produits phytosanitaires ou les nutriments lessivés. Lorsqu'un captage d'eau souterraine est affecté par des eaux de surface qui s'y infiltrent, il convient de délimiter l'aire d'alimentation Z_o . Celle-ci comprend le bassin versant d'où provient la majeure partie de la pollution des eaux de surface. Dans cette zone de protection des eaux, il convient de prendre les mesures nécessaires à la protection du captage d'eau souterraine. Le dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_o ne fait pas l'objet du présent document de base.
Aire d'alimentation Z_u	L'aire d'alimentation Z_u est délimitée sur la carte de protection des eaux par le service cantonal compétent. Elle peut être délimitée sur la base du BAPC (Z_u -BAPC), du BAC (Z_u -BAC) ou de la superficie réduite selon la règle des 90 % (Z_u -90).
Captage d'eau souterraine	Un captage d'eau souterraine est un ouvrage destiné à capter et à exploiter les eaux souterraines. Ce terme englobe aussi bien les captages de sources, dans lesquels l'eau souterraine s'écoulant naturellement est captée et collectée, que les puits de pompage, dans lesquels l'eau souterraine est extraite du sous-sol à l'aide de pompes.
Contribution volumétrique à l'alimentation	La contribution volumétrique à l'alimentation [m^3/s] correspond à la part de recharge des eaux souterraines par unité de surface d'un point i situé au sein du bassin d'alimentation du captage BAC, qui contribue à l'alimentation d'un captage d'eau souterraine.
Débit de référence	Le débit de référence est fixé par le service cantonal compétent. Il s'agit du débit de référence permettant d'appliquer la règle des 90 % en matière de réduction de la superficie. Dans le présent document, le débit de référence est désigné par le terme « volume prélevé ».
Limites du système	Les limites du système désignent les délimitations spatiales d'un système hydrogéologique au sein duquel les processus de recharge des eaux souterraines peuvent avoir lieu. Pour ce qui est du dimensionnement d'une aire d'alimentation Z_u d'un captage des eaux souterraines, les limites du système sont définies de telle sorte qu'elles contiennent toutes les zones d'infiltration pluviale y compris les aquifères latéraux.



Modèle conceptuel hydrogéologique	Représentation qualitative des limites du système hydrogéologique et de tous les processus pertinents au sein du système.
Processus d'alimentation – fluvial	Recharge des eaux souterraines à partir des cours d'eau de surface. Les eaux de surface qui s'infiltrent ont un effet de dilution et, par conséquent, réduisent la superficie de l'aire d'alimentation Z_u . S'agissant du dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u , le bassin d'alimentation du cours d'eau n'est pas considéré comme faisant partie du système hydrogéologique. Celui-ci serait, s'il y avait lieu, protégé par une aire d'alimentation Z_o des eaux superficielles (voir la définition de l'aire d'alimentation Z_o ci-dessus).
Processus d'alimentation – latéral / zone aux limites (aussi appelé flux latéraux)	Processus de recharge des eaux souterraines par les précipitations qui s'infiltrent et les eaux superficielles dans et sur les aquifères qui sont liés hydrauliquement à l'aquifère exploité par le captage (zones latérales). S'agissant du dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u , seule la part de la recharge des eaux souterraines de la zone latérale qui contribue à l'alimentation de l'aquifère exploité par le captage est prise en compte. Elle est toutefois souvent difficilement quantifiable.
Processus d'alimentation – pluvial	Processus de recharge des eaux souterraines par l'infiltration des eaux météoriques. S'agissant du dimensionnement d'une aire d'alimentation Z_u , la recharge pluviale correspond à la surface sur laquelle les infiltrations d'eaux météoriques alimentent le captage d'eau souterraine.
Règle des 90 %	La règle des 90 % consiste à différencier les taux d'alimentation en fonction de leur localisation et, depuis les zones présentant les taux les plus élevées, à identifier les zones qui fournissent cumulativement environ 90 % de l'alimentation contribuant au volume prélevé du captage d'eau souterraine. Cela est défini à l'annexe 4, chiffre 113, de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux). Les 90 % ne se rapportent ainsi pas à l'incertitude du modèle, mais à la fraction du volume prélevé déterminante pour établir le bilan hydrique.
Système d'écoulement	Le système d'écoulement décrit la répartition spatiale de l'écoulement des eaux souterraines dans un aquifère et caractérise la direction et la vitesse auxquelles les eaux souterraines se déplacent. Le champ d'écoulement relie les zones de recharge des eaux souterraines aux zones de décharge, telles que les sources, les puits de pompage, les cours d'eau et les lacs. Il peut être décrit en une, deux ou trois dimensions, de manière stationnaire ou non-stationnaire, et constitue une base essentielle pour l'analyse de l'écoulement des eaux souterraines, du transport des substances, des bassins d'alimentation et des modèles numériques des eaux souterraines.

Taux d'alimentation (ponctuel)	Taux d'alimentation spécifique ponctuel [m/s, soit $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] de la recharge des eaux souterraines d'un point <i>i</i> situé dans le bassin d'alimentation du captage BAC (voir définition ci-dessous) qui contribue à l'alimentation d'un captage d'eau souterraine. Le taux d'alimentation du captage est obtenu en multipliant les taux de recharge pluviaux, fluviaux ou latéraux [m/s] par les probabilités de sortie au captage [-].
Variante du concept	Une variante du concept est une interprétation possible du système d'écoulement hydrogéologique. En comparant plusieurs variantes du concept, on peut saisir la marge d'incertitude, vérifier ses effets sur les résultats et limiter progressivement les variantes du concept les plus plausibles.
Z _u -BAC Bassin d'alimentation du captage	Ensemble des surfaces qui contribuent à l'alimentation d'un captage d'eau souterraine. Il correspond toujours à une partie de la surface du Z _u -BAPC.
Z _u -BAPC Bassin d'alimentation potentiel du captage	Zones entourant toutes les surfaces <i>susceptibles</i> de contribuer à l'alimentation du captage d'eau souterraine. Elles délimitent la zone à partir de laquelle l'eau peut atteindre un captage d'eau souterraine de celle à partir de laquelle aucune contribution significative n'est possible.
Z _u -90 Superficie réduite selon la règle des 90 %	La superficie réduite comprend la zone déterminée à partir taux d'alimentation du captage la plus élevée et qui contribue à hauteur de 90 % à l'alimentation du captage des eaux souterraines. Elle correspond toujours à une partie de la superficie du Z _u -BAC.

1 Introduction

1.1 Contexte et cadre légal

L'aire d'alimentation Z_u a été introduite en tant que zone de protection des eaux avec l'entrée en vigueur de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998. Depuis, les cantons n'ont délimité que peu d'aires d'alimentation Z_u (état en 2024 : environ 70). Dans le cadre du projet de modification de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), en exécution de la motion 20.3625, il est prévu que les cantons doivent délimiter l'aire d'alimentation Z_u de certains captages d'eau souterraine. Seront notamment concernés les captages d'importance régionale, ainsi que ceux qui sont déjà pollués ou risquent de l'être.

Contrairement au secteur A_u de protection des eaux, qui vise à assurer la protection des eaux souterraines exploitables sur l'ensemble du territoire, l'aire d'alimentation Z_u met l'accent sur la protection des eaux souterraines au niveau des captages ainsi que sur l'assurance qualité et l'assainissement des eaux souterraines utilisées comme eau potable. En cas de pollution des eaux souterraines, l'aire d'alimentation Z_u est la zone dans laquelle des mesures visant à réduire les apports de polluants doivent être mises en œuvre. Si des substances comme des produits phytosanitaires ou des nitrates sont introduites à grande échelle dans les eaux souterraines par l'infiltration des eaux pluviales, des mesures doivent être prises sur les parcelles concernées. Si la pollution par des polluants persistants provient d'installations ou d'utilisations isolées et localisables (p. ex. entreprises industrielles, sites contaminés, canalisations défectueuses, voies ferrées, etc.) dans l'aire d'alimentation Z_u , ces sources de pollution doivent être éliminées ou assainies de manière ciblée. Quant aux captages d'eau souterraine dont l'alimentation provient principalement de l'infiltration fluviale, la qualité des eaux fluviales détermine généralement la qualité des eaux souterraines dans le captage.

L'aire d'alimentation Z_u vise donc à préserver la qualité des eaux souterraines de la ressource exploitée. La délimitation des aires d'alimentation Z_u des captages d'eau souterraine revêt une importance capitale pour garantir une eau potable de bonne qualité à long terme.

1.2 Objectif et groupes cibles

Au cours des prochaines années, les cantons devraient être appelés à délimiter environ 1'500 aires d'alimentation. Pour dimensionner l'aire d'alimentation Z_u et utiliser les moyens disponibles de manière ciblée et efficace, on appliquera une procédure par étapes décrite dans le présent document. Pour certains captages d'importance régionale pour lesquels il n'y a ni pollution ni menace, la délimitation de l'aire d'alimentation Z_u sur la base du bassin d'alimentation potentiel (BAPC), qui peut être déterminé à partir des données existantes, est suffisante dans de nombreux cas. Une réduction supplémentaire importante de la superficie (détermination du bassin d'alimentation du captage (BAC) ou de la superficie réduite selon la règle des 90 % (Z_u -90) n'est pas impérative.

Des investigations supplémentaires seront menées uniquement dans la mesure où celles-ci conduisent à une réduction de la superficie de l'aire d'alimentation Z_u et en tenant compte du rapport coûts-bénéfices, et ainsi les cantons utiliseront leurs ressources de manière optimisée.

Le présent document expose le concept de procédure par étapes de dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u et décrit la méthodologie des étapes. Il fournit un cadre pour une procédure pratique adaptée aux situations hydrogéologiques pertinentes en Suisse.

Le présent document s'adresse en premier lieu aux services cantonaux chargés des mesures d'organisation du territoire pour la protection des eaux souterraines ainsi qu'aux bureaux spécialisés chargés de la mise en œuvre, mais aussi aux distributeurs d'eau. Il est judicieux que les services cantonaux de protection des eaux, dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices, mettent en regard les efforts nécessaires au dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u , les mesures à prendre, et les restrictions attendues (restrictions concernant l'utilisation de produits phytosanitaires, projets relevant de l'art. 62a LEaux, etc.). À cet égard, la procédure par étapes doit aider à déterminer si les données

disponibles sont suffisantes pour une certaine étape de dimensionnement ou si des acquisitions de données et des investigations supplémentaires sont nécessaires.

1.3 Difficultés lors de la délimitation

Dans de nombreux cas, une délimitation fiable de l'aire d'alimentation Z_u d'un captage des eaux souterraines est une tâche complexe. Les informations sont souvent lacunaires, notamment en ce qui concerne la structure géologique, les paramètres hydrauliques ou le comportement saisonnier de l'aquifère. De plus, les incertitudes et les données incomplètes concernant les utilisations actuelles ou prévues de l'eau ajoutent des difficultés à l'évaluation hydrogéologique d'un aquifère. En effet, les investigations hydrogéologiques historiques et les données sur l'utilisation de l'eau sont souvent incomplètes ou n'ont pas été collectées de manière systématique.

Les informations hydrogéologiques disponibles se limitent donc souvent à des observations ponctuelles à partir desquelles il faut décrire des processus à grande échelle, ce qui comporte inévitablement des incertitudes. Une présentation transparente de ces incertitudes ainsi qu'un renforcement progressif des données disponibles et d'investigations complémentaires constituent donc des éléments importants de la procédure par étapes décrite ici.

1.4 Délimitation de l'aire d'alimentation Z_u

En fonction des données disponibles, des incertitudes et de la décision du service cantonal compétent sur l'opportunité d'une réduction supplémentaire de la superficie, l'une des zones suivantes peut être désignée comme aire d'alimentation Z_u (Illustration 1) :

- Étape 1 : bassin d'alimentation potentiel du captage Z_u -BAPC
- Étape 2 : bassin d'alimentation du captage Z_u -BAC
- Étape 3 : réduction mathématique de la superficie selon la règle des 90 % Z_u -90

À partir du bassin d'alimentation du captage (BAC), on détermine, au moyen d'un modèle hydrogéologique et, si nécessaire d'une acquisition de données supplémentaires, les zones qui fournissent cumulativement environ 90 % du volume prélevé. La différence par rapport au Z_u -BAC ne réside donc pas nécessairement dans l'acquisition de nouvelles données, mais dans la réduction du Z_u -BAC existant pour obtenir la Z_u -90.

La décision quant au type d'aire d'alimentation Z_u (étape 1, 2 ou 3) à inscrire sur la carte de protection des eaux relève de la compétence du service cantonal. Si nécessaire, une aide à l'exécution de l'OFEV pourrait être rédigée pour mieux encadrer cette question.

Les trois étapes se distinguent par la profondeur méthodologique, l'évaluation de l'incertitude et la taille de l'aire d'alimentation Z_u . Plus l'incertitude liée aux données de base est grande, plus l'aire d'alimentation Z_u a tendance à être étendue. Réduire cette incertitude grâce à des acquisitions de données supplémentaires ou à des modélisations plus détaillées peut donc conduire à une délimitation plus précise et souvent plus restreinte de l'aire d'alimentation Z_u .

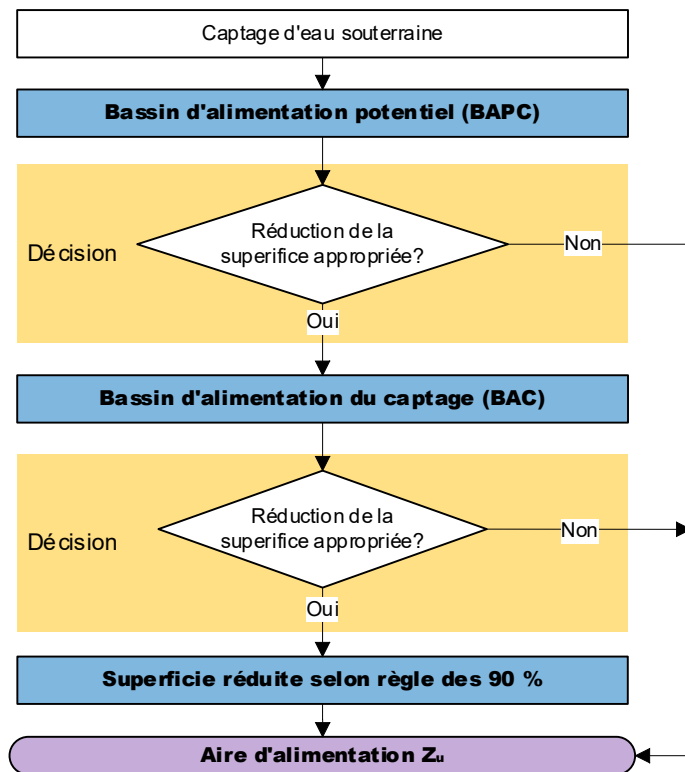


Illustration 1 : Délimitation de l'aire d'alimentation Z_u à l'aide de la procédure par étapes.

2 Concept de la procédure par étapes

Les travaux de dimensionnement d'une aire d'alimentation Z_u doivent être menés de manière efficace et ciblée. Le choix de l'étape de dimensionnement dépend du degré de précision requis. Cette procédure par étapes permet une analyse progressive qui s'adapte de manière flexible aux données disponibles ainsi qu'au niveau de précision visé, et permet ainsi un dimensionnement fiable et adapté de l'aire d'alimentation Z_u .

La délimitation du système ainsi que l'identification des processus d'alimentation constituent la base de la méthodologie. Elle définit les limites du système aquifère à étudier dans l'espace et constitue ainsi la base pour l'analyse ciblée. Seule une délimitation clairement justifiée permet de garantir que toutes les surfaces pertinentes sont prises en compte, alors que les aires sans influence sont exclues. A l'intérieur des limites du système les processus d'alimentation décrivent les différents mécanismes par lesquels l'eau atteint l'aquifère. Sur cette base, il est possible de déterminer les taux d'alimentation volumétriques de chaque zone contribuant à l'alimentation du captage d'eau souterraine.

Le présent chapitre offre un aperçu de la procédure par étapes qui permet de dimensionner l'aire d'alimentation Z_u ainsi qu'une description systématique des différentes approches disponibles pour délimiter le système d'écoulement d'un captage. Un *triangle des processus* est ensuite introduit, qui permet de représenter et de différencier systématiquement les mécanismes de recharge des eaux souterraines. Dans les chapitres suivants, le triangle des processus est utilisé comme outil méthodologique pour l'acquisition et l'analyse ciblées des données.

2.1 Aperçu de la procédure

L'Illustration 2 montre le déroulement de la procédure par étapes. Les chapitres suivants décrivent les paliers de chaque étape : du modèle conceptuel initial du système (étape 1) à l'acquisition de données complémentaires (étape 2), puis aux approches de modélisation quantitative visant à réduire la surface (étape 3).

La procédure se divise en trois étapes qui s'enchaînent et qui, grâce à une disponibilité croissante des données et à de meilleures connaissances, permettent une précision progressive des limites du système et des processus d'alimentation tout en réduisant les incertitudes (Illustration 3).

Dans l'étape 1, un modèle conceptuel du système d'écoulement aboutit à la délimitation d'un bassin d'alimentation potentiel (BAPC) qui est précisé et consolidé grâce à des acquisitions de données et des investigations ciblées lors de l'étape 2 (BAC). À l'étape 3, la réduction de la superficie est effectuée selon la règle des 90 % afin d'identifier la Z_{u-90} au sein du bassin d'alimentation du captage BAC.

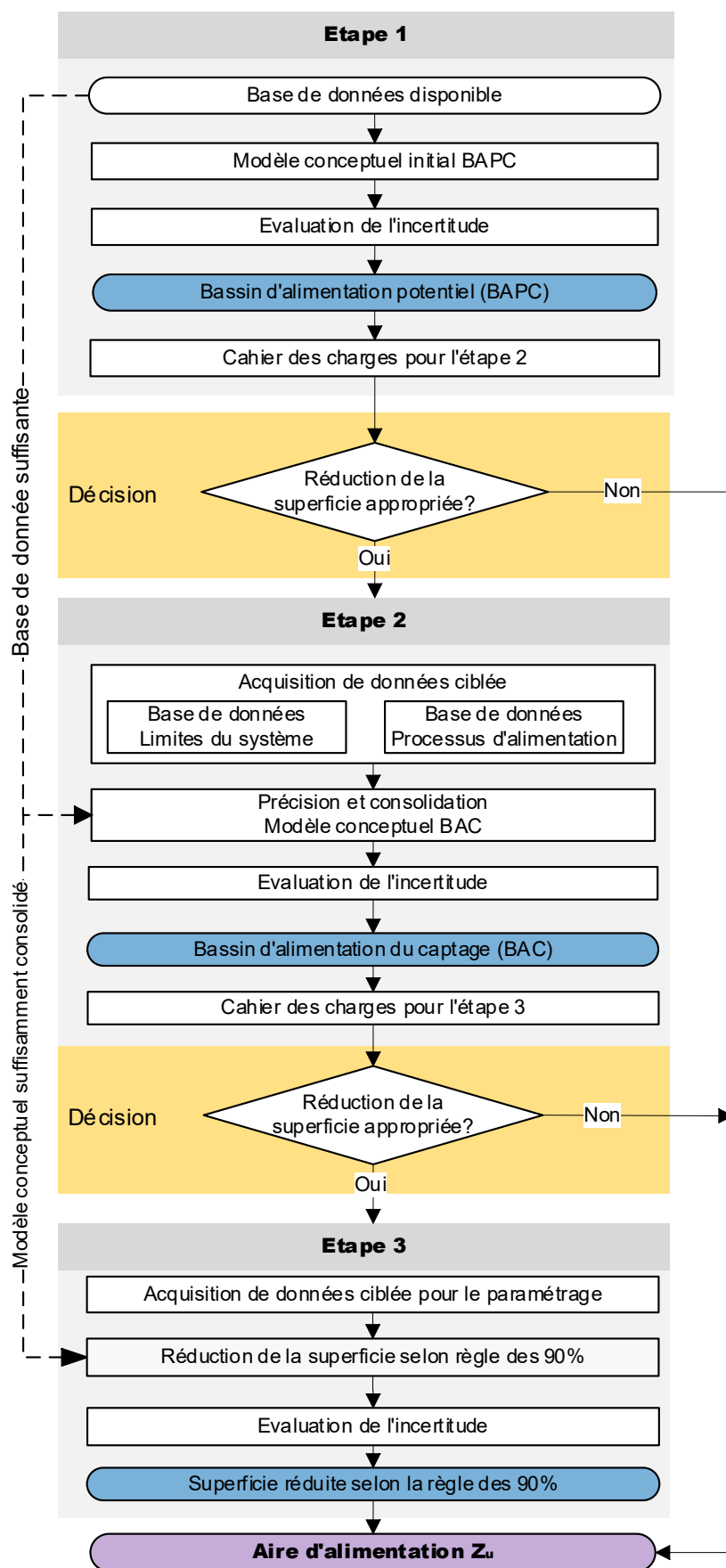
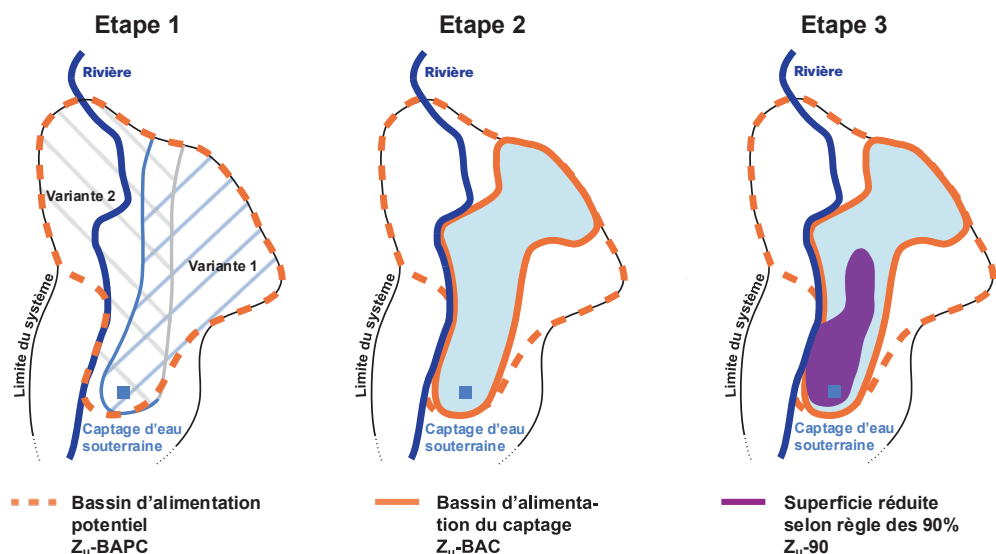


Illustration 2 : Logigramme de la procédure par étapes de dimensionnement de l'aire d'alimentation Z_u .



Objectif	- Élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique initial avec description des processus d'alimentation du captage - Bilan hydrique / bilan des substances pour vérification de la plausibilité	- Caractérisation plus précise des limites du système d'écoulement - Quantification des processus d'alimentation - Modèle conceptuel détaillé	Réduction de la surface selon la règle des 90 %
Données	- Toutes les informations existantes - Pas d'acquisition de données	Acquisition ciblée de données selon le cahier des charges issu de l'étape 1	Acquisition ciblée de données pour paramétrage selon le cahier des charges de l'étape 2
Méthodologie	- Caractérisation du type d'aquifère - Identification des limites potentielles du système d'écoulement - Caractérisation des processus d'alimentation - Identification des lacunes et des incertitudes	- Quantification des processus d'alimentation et clarification des limites du système - Bilan hydrique du système basé sur des données - Analyse des incertitudes comme base pour l'étape 3	- Quantification spatialement différenciée des taux d'alimentation du captage - Application de la règle des 90 %
Résultat	- Inventaire des données disponibles - Cahier des charges comme base pour l'étape 2 - Bassin d'alimentation potentiel (BAPC)	- Cahier des charges comme base pour l'étape 3 - Bassin d'alimentation (BAC)	Superficie réduite selon la règle des 90 %

Illustration 3 : Concept de la procédure par étapes.

2.2 Délimitation hydrogéologique du système d'écoulement

Dans toutes les étapes de la méthodologie, la délimitation spatiale du système englobe la zone qui contribue à l'alimentation du captage d'eau. Cette délimitation peut reposer sur différents critères combinés en fonction de la situation hydrogéologique. Ces critères sont associés à des degrés d'incertitude et de complexité variables. Il est important de comprendre les interactions entre les différents processus d'alimentation (par exemple, la recharge pluviale, l'infiltration fluviale et les flux latéraux) et les exutoires (par exemple, d'autres captages d'eau souterraine, des sources, des lacs et des

rivières), qui ensemble définissent le système d'écoulement nécessaire pour définir l'aire d'alimentation du captage. La difficulté réside dans le fait que la délimitation du bassin d'alimentation devrait être faite en 3D, notamment pour les aquifères complexes, alors qu'elle est souvent réalisée en 2D dans la pratique. La ligne qui délimite le bassin d'alimentation du captage ne se superpose pas toujours exactement aux limites hydrauliques et structures du système d'écoulement en profondeur. Pour combler cet écart entre le système 3D et la conceptualisation 2D, il faut intégrer des informations supplémentaires (p. ex. des modèles hydrogéologiques, des mesures des niveaux d'eau et des directions d'écoulement, des données géophysiques). Ce n'est que grâce à cette combinaison qu'il est possible de délimiter de manière fiable l'aire d'alimentation Z_u , qui tient compte à la fois de la réalité en 3D et de la nécessité pratique d'une représentation en 2D.

Il convient de noter que des situations hydrogéologiques particulières (p. ex. les systèmes karstiques, les sols meubles très hétérogènes ou les captages présentant une forte proportion d'infiltration fluviatile) requièrent une procédure adaptée. Ces cas particuliers sont décrits en annexe A1.

2.2.1 Délimitation topographique

Les critères topographiques comprennent l'identification des limites du système sur la base de la forme du terrain et correspondent aux lignes de partage des eaux en surface (bassin versant). Cela est particulièrement pertinent dans les zones peu hétérogènes, pour autant qu'il n'y ait pas une géologie complexe (voir chapitre 2.2.2). Il convient également de noter que les lignes de partage des eaux souterraines peuvent s'écarter des limites topographiques. Dans les milieux hétérogènes (aquifères karstiques et fissurés), l'analyse topographique est généralement insuffisante.

La question de savoir si une analyse en 2D est suffisante dépend de la complexité du système et doit être évaluée par un spécialiste disposant de solides connaissances en hydrogéologie dans le contexte concerné.

2.2.2 Délimitation structurale

Les critères structuraux servent à délimiter les couches aquifères, car ils marquent les transitions entre des unités géologiques qui se distinguent nettement par leur transmissivité. Les failles, les limites lithologiques ou les couches peu perméables peuvent agir comme des barrières naturelles. La question centrale est souvent de savoir quelles formations, au sein du système d'écoulement, déterminent la perméabilité pour l'infiltration et l'écoulement. Les informations géologiques sont utilisées pour évaluer ces différences de conductivité hydraulique et, sur cette base, élaborer un premier modèle conceptuel du système. Les limites structurales sont particulièrement décisives pour la compréhension des chemins d'écoulements souterrains dans les aquifères karstiques et fissurés, mais elles peuvent également jouer un rôle important dans les aquifères en roche meuble.

2.2.3 Délimitation hydraulique

Les critères hydrauliques définissent les limites du système sur la base de conditions d'écoulement globalement stables dans l'aquifère. Cette situation se caractérise par une faible variabilité temporelle du système d'écoulement. Étant donné que les conditions d'écoulement sont globalement stables, malgré les fluctuations saisonnières ou les variations des débits de captage, le champ d'écoulement du système reste largement constant. Des fluctuations absolues peuvent arriver, mais les limites hydrauliques restent relativement stables. Comme cette stabilité n'est quantifiable que de manière limitée, les limites hydrauliques doivent toujours être étayées par des indicateurs clairs, tels que les eaux de surface, les barrières géologiques ou les données piézométriques de la zone latérale ou des lignes de partage des eaux. Les lignes de partage des eaux superficielles peuvent servir de lignes de démarcation topographiques marquantes, tandis que les lignes de partage des eaux souterraines sont déterminées par le système d'écoulement en 3D et ne coïncident pas nécessairement avec les structures de surface.

Les limites ainsi tracées séparent les zones d'où provient l'eau qui s'écoule vers le captage de celles qui ne l'alimente pas. On peut citer comme exemples les rivières ou les lacs. Si le niveau d'eau d'une rivière ou d'un lac est inférieur à celui de la nappe phréatique, l'eau souterraine exfiltre vers les eaux de surface, qui font alors office de barrière hydraulique contre les flux latéraux. En revanche, si le

niveau de l'eau de surface est plus élevé, l'eau de surface va s'infiltrer dans l'aquifère et contribuer ainsi à l'alimentation du système. Un autre exemple est celui d'un grand fleuve en connexion hydraulique avec les eaux souterraines, qui marque une délimitation effective de l'aire d'alimentation Z_u du côté tourné vers le fleuve, car il n'y a pas d'apport souterrain du côté opposé. Il convient toutefois de noter que, dans certaines conditions, l'écoulement d'eau souterraine peut passer par dessous une rivière et que la position des lignes de partage des eaux souterraines peut varier de manière dynamique en fonction des conditions de captage ou des fluctuations saisonnières.

2.3 Processus d'alimentation

Pour déterminer l'origine de l'eau d'un captage d'eau souterraine, il est important d'identifier et de caractériser systématiquement les processus d'alimentation (Illustration 5). Le triangle des processus constitue un outil efficace à cet effet, car il permet de représenter la proportion des différents processus d'alimentation d'un captage d'eau souterraine le long de chemins idéalisés reliant les trois mailons terminaux des processus d'alimentation (Illustration 4).

Les coins sont coupés à la base du triangle de processus lorsque la part fluviale est supérieure ou égale à 90 % (voir la section 2.3.2) ou lorsque l'apport latéral est supérieur ou égal à 90 % (voir la section 2.3.3). Cela délimite l'espace dans lequel une réduction de la surface selon la règle des 90 % n'est pas pertinente.

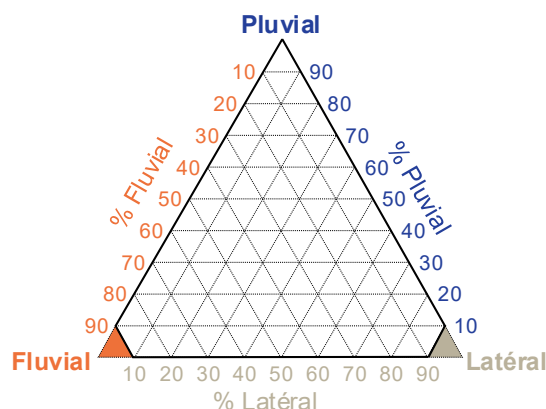


Illustration 4 : Triangle des processus pour la visualisation des différents processus d'alimentation d'un captage des eaux souterraines.

- **Alimentation pluviale** : Processus de recharge des eaux souterraines par l'infiltration des eaux météoriques.
- **Alimentation fluviale** : Recharge des eaux souterraines à partir des cours d'eau.
- **Alimentation latérale** : Flux latéral d'aquifères adjacents ou sous-jacents : Processus de recharge des eaux souterraines par les eaux météoriques et les eaux superficielles qui s'infiltrent dans et sur les aquifères qui sont liés hydrauliquement à l'aquifère exploité par le captage (zones latérales).

Le classement d'un système au sein du triangle des processus constitue une étape importante dans la procédure par étapes visant à délimiter l'aire d'alimentation Z_u , car les différents processus d'alimentation ont des effets très différents sur la taille et l'étendue de cette aire. Étant donné que la délimitation de l'aire d'alimentation Z_u et la mise en œuvre de mesures appropriées visant à réduire les apports de polluants sont particulièrement pertinentes lorsque ces derniers sont introduits dans les eaux souterraines à grande échelle par les eaux pluviales qui s'infiltrent, il est important de déterminer les différents processus d'alimentation tant sur le plan quantitatif que spatial.

Parmi les trois processus, c'est la quantification de l'alimentation pluviale qui présente le moins d'incertitudes. L'infiltration des eaux fluviales est plus difficile à quantifier, tandis que le flux latéral est souvent la plus difficile à quantifier. La classification d'un captage d'eau souterraine au sein du triangle des processus par rapport aux processus d'alimentation pertinents sert alors d'instrument d'évaluation qualitative des incertitudes et d'acquisition ciblée et pondérée de données. Comme les différents processus d'alimentation sont caractérisés par des incertitudes plus ou moins importantes, le triangle des processus permet une évaluation nuancée de l'état des connaissances (Illustration 4).

Afin de cibler l'acquisition de données ultérieure, on effectue donc un premier classement du captage d'eau souterraine dans le triangle de processus dès l'étape 1 dans le but d'identifier à un stade précoce les lacunes et les incertitudes importantes, et de les traiter de manière systématique (Illustration 4). Même si la délimitation spatiale est encore incertaine à ce stade, ce premier classement dans le triangle de processus permet déjà de prioriser l'acquisition de données complémentaire et met aussi en évidence la marge d'incertitude : on identifie ainsi les processus particulièrement importants pour l'alimentation du captage et on évalue avec quelle précision ils peuvent être estimés. Cela permet d'orienter les efforts d'acquisitions de données ultérieures de manière ciblée vers les lacunes pertinentes et d'utiliser efficacement les ressources disponibles. Au cours de la suite de la procédure par étapes, le triangle des processus sert de guide pour définir l'acquisition de données de manière ciblée sur les processus d'alimentation et réduire systématiquement les incertitudes, ce qui se traduit par une surface de plus en plus réduite dans le triangle des processus (Illustration 7).

Les trois processus d'alimentation et leurs différents rôles dans la délimitation de l'aire d'alimentation Z_u sont décrits en détail ci-après.

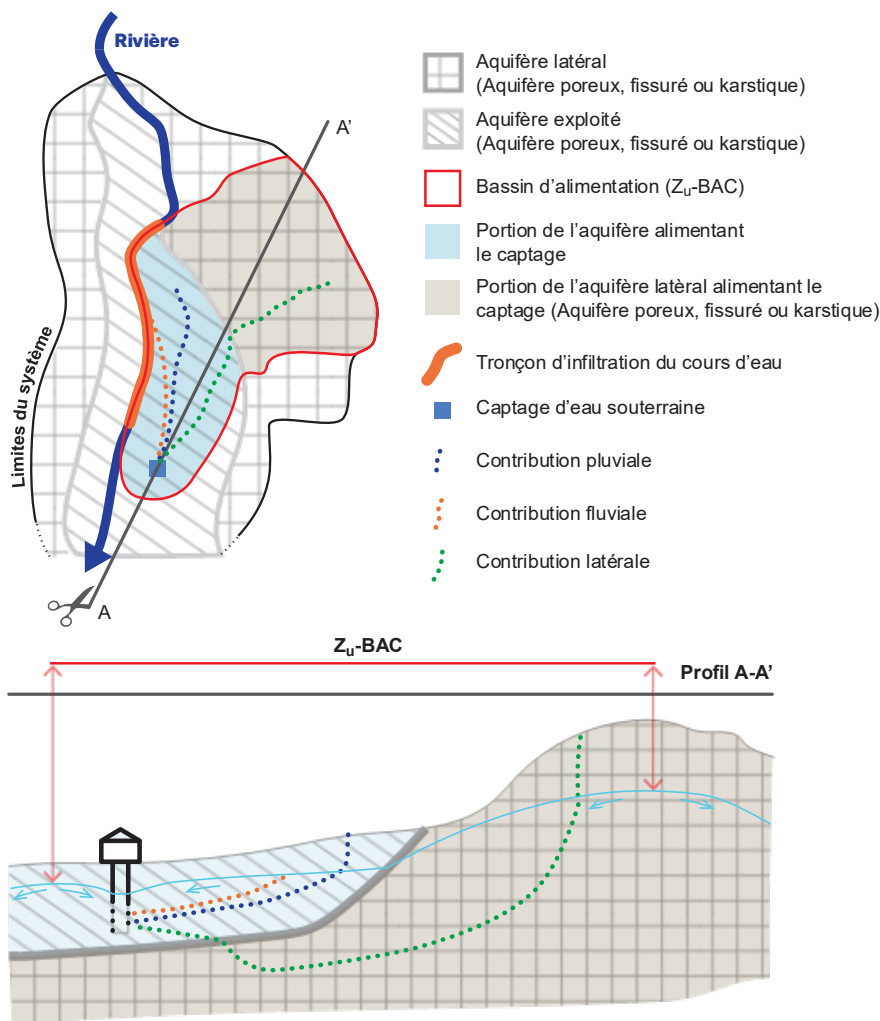


Illustration 5 : Représentation conceptuelle d'un bassin d'alimentation du captage (BAC) avec des différents processus d'alimentation et leur origine y inclus des chemins d'écoulement types.

2.3.1 Processus d'alimentation pluviale

Dans les systèmes à dominance pluviale, l'alimentation s'effectue principalement par infiltration (surtout verticale) des précipitations. L'accent est mis sur la quantification des processus d'infiltration ainsi que sur la prise en compte des variations saisonnières afin de quantifier les conditions hydrologiques moyennes. Les conditions spécifiques au site sont aussi évaluées, telles que l'utilisation du sol, la densité de drainages ou le type de sol, qui ont une incidence sur les propriétés hydrauliques. L'objectif est de représenter de manière hiérarchisée la distribution spatiale et temporelle moyenne de la recharge des eaux souterraines au sein du système. Les bases de données et les méthodes appropriées à cet égard sont décrites à l'annexe A2.

2.3.2 Processus d'alimentation fluviale

Dans les systèmes présentant des interactions entre les eaux de surface (rivères, lacs) et les eaux souterraines, il est important de déterminer l'ampleur et la dynamique de l'infiltration fluviale et de quantifier sa contribution à l'alimentation du captage d'eau. Il s'agit alors, selon l'étape de la procédure, de prendre en compte les fluctuations saisonnières, les gradients hydrauliques et les rapports de mélange possibles entre les différentes composantes des eaux souterraines, ainsi que d'identifier les tronçons fluviaux où se produisent des infiltrations et des exfiltrations.

L'aire d'alimentation Z_0 des eaux de surface est l'instrument de planification permettant de protéger la qualité des eaux de surface grâce à des mesures prises dans le bassin versant. En règle générale, les eaux de surface infiltrées ne sont pas polluées et ont un effet diluant sur les polluants présents dans les eaux souterraines. Cela signifie que plus le taux d'alimentation fluvial est important, plus les apports de substances transportées par l'infiltration pluviale sont dilués. Ainsi, plus le taux d'alimentation fluvial vers le captage est important, plus l'aire d'alimentation Z_u est petite. Dans le cas extrême d'un taux d'alimentation fluvial $\geq 90\%$, l'aire d'alimentation Z_u se réduit, après la réduction de superficie selon la règle des 90 %, au tronçon d'infiltration dans le(s) cours d'eau (Illustration 6). C'est pourquoi la zone présentant un taux d'alimentation fluvial $\geq 90\%$, en bas à gauche du triangle des processus (Illustration 4), est tronquée, car avec un tel taux, la réduction selon la règle des 90 % n'a plus de sens.

Le choix des méthodes d'investigation appropriées, par exemple pour délimiter le tronçon d'infiltration et déterminer le taux d'alimentation fluvial du captage, dépend des conditions locales. L'annexe A2 présente un aperçu détaillé des données de base utilisées et des méthodes appropriées aux différentes étapes.

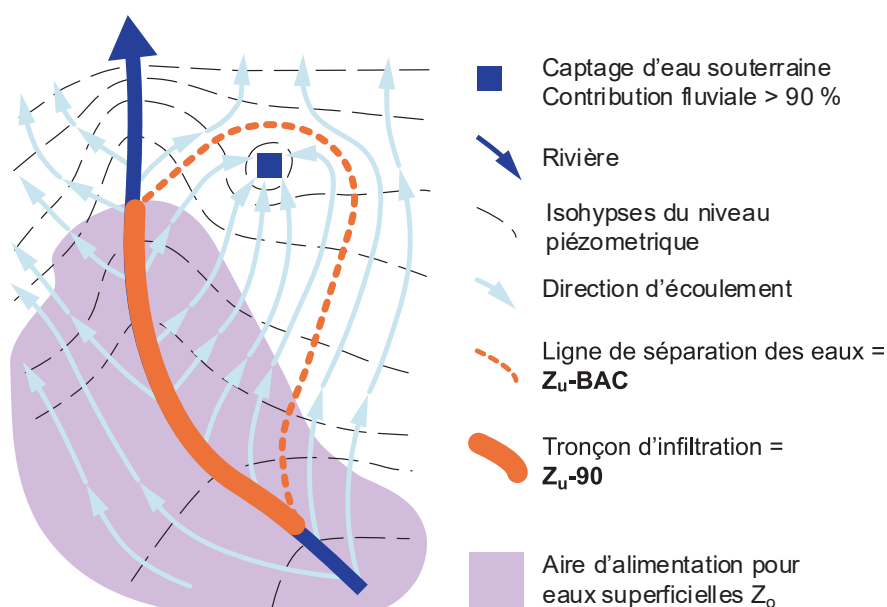


Illustration 6 : Représentation schématique du « Z_u -90 » pour un captage avec une alimentation d'origine fluviale supérieure à 90 %.

2.3.3 Flux latéral

Dans les systèmes caractérisés par un flux latéral (dominant), le défi consiste à quantifier des contributions généralement diffuses et difficiles à évaluer, qui sont souvent caractérisées par une grande incertitude. Le flux latéral désigne l'ensemble des contributions alimentant un captage d'eau souterraine provenant d'un aquifère adjacent (zones latérales) ou sous-jacent, qui est en contact hydraulique avec l'aquifère exploité par le captage d'eau souterraine. Non seulement il est difficile de quantifier cette contribution (flux entre les deux aquifères), mais il peut s'avérer encore plus complexe d'identifier l'origine spatiale de l'eau ainsi apportée.

Pour quantifier les flux latéraux, il est possible de représenter schématiquement les chemins d'écoulement et les contributions potentielles des aquifères adjacents ou sous-jacents, et d'estimer, dans la mesure du possible, la part de ces apports dans l'alimentation du captage d'eau souterraine. Ce processus d'alimentation est, par rapport aux deux autres, celui qui comporte le plus d'incertitudes ; il est souvent calculé comme la partie résiduelle des deux autres processus. Une quantification précise des contributions pluviales et fluviales permet donc de réduire considérablement les incertitudes relatives au flux latéral.

Pour les captages d'eau souterraine dont les processus d'alimentation peuvent être attribués presque entièrement au flux latéral ($\geq 90\%$ de flux latéral), il n'est généralement pas possible de procéder à une réduction significative de la superficie selon la règle des 90 %, car les incertitudes sont trop importantes. C'est pourquoi le coin inférieur droit du triangle des processus (Illustration 4) est également tronqué. Dans ces cas, on délimite généralement soit le BAPC, soit le BAC comme aire d'alimentation Z_u (voir le cas particulier des aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes à l'annexe A1.1). L'annexe A2 présente un aperçu détaillé des données de base utilisées aux différentes étapes et des méthodes appropriées.

2.3.4 Exemples d'application du triangle des processus

Les trois sommets du triangle des processus représentent les cas extrêmes des différents processus d'alimentation. Le placement d'un captage dans le triangle permet un classement hydrogéologique des contributions à l'alimentation grâce auquel il est possible de déterminer le ou les processus d'alimentation dominants. On peut ainsi évaluer l'importance des différents processus pour l'alimentation du captage. Plus les estimations sont incertaines, plus la marge est grande, ce qui conduit à une surface importante dans le triangle des processus (surface orange dans l'illustration 7). La surface se réduit au fil des étapes, grâce à des données de plus en plus solides. Dans un cas idéal sans incertitude, il ne resterait qu'un point. Travailler avec la réduction de la superficie dans le triangle des processus permet donc de réduire systématiquement les incertitudes. Cela permet d'orienter les acquisitions de données au fil de la démarche, en ciblant les lacunes les plus pertinentes, ce qui permet d'utiliser efficacement les ressources disponibles.

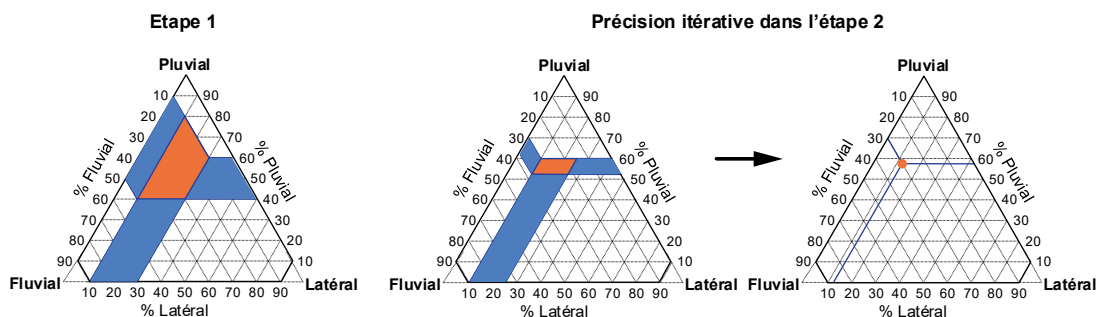


Illustration 7 : Exemple de classement de l'alimentation d'un captage d'eau souterraine dans le triangle des processus et réduction des incertitudes par étapes. Les zones bleues indiquent les combinaisons possibles des trois taux d'alimentation (pluvial, fluvial et latéral). La zone orange marque l'intersection approximative qui semble plausible au regard des données disponibles. Elle symbolise une fourchette de distributions possibles. Même avec des données détaillées, une certaine incertitude subsiste généralement, due aux simplifications du modèle et aux fluctuations saisonnières des processus. Le cas idéal décrit à droite (point dans le triangle) n'est donc pas réaliste.

Dans la pratique, les systèmes se situent quelque part à l'intérieur du triangle des processus et peuvent être décrits par une combinaison des fractions des trois processus d'alimentation (p. ex. 40 à 60 % pluvial, 10 à 50 % fluvial et 10 à 30 % latéral, comme l'indique la zone orange à gauche dans l'illustration 7). La position à l'intérieur du triangle des processus a une influence directe sur l'effort, le choix des méthodes d'acquisition des données et la résolution spatio-temporelle des informations requises.

Les coins tronqués à la base du triangle des processus, correspondant à une part fluviale ou à un flux latéral $\geq 90\%$, délimitent l'espace dans lequel une réduction de la superficie selon la règle des 90 % n'est pas appropriée. Lorsque le taux d'alimentation fluvial du captage d'eau souterraine est $\geq 90\%$, l'aire d'alimentation Z_u se limite, dans ce cas, au tronçon d'infiltration du cours d'eau. Lorsque le taux d'alimentation latérale est $\geq 90\%$, il est approprié de délimiter le BAPC ou le BAC comme aire d'alimentation Z_u (voir le cas particulier des aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes à l'annexe A1.1). Même en y consacrant des efforts considérables, la superficie ne peut être réduite que de façon minime dans ces cas. Certes, l'effort requis peut être faible dans certains cas, mais les incertitudes restent souvent considérables, car les flux latéraux sont difficiles à quantifier et la superficie ne peut souvent être réduite que de façon minime, même au prix d'un effort important.

3 Mise en œuvre de la procédure par étapes

Ce chapitre décrit en détail les paliers de chaque étape en renvoyant aux annexes correspondantes. Comme le montre l'illustration 2, la procédure par étapes commence par l'évaluation de la base des données existantes et suit systématiquement trois étapes qui peuvent s'enchaîner. Pour chaque étape, les données requises, le modèle à appliquer, la manière d'évaluer les incertitudes sont esquissés.

3.1 Étape 1 – bassin d'alimentation potentiel Z_u -BAPC

L'objectif de l'étape 1 est de répondre à la question « D'où peut *potentiellement* provenir l'eau ? » sur la base des données disponibles et d'un modèle conceptuel initial. Celui-ci sert de base à l'élaboration d'un cahier des charges pour l'acquisition de données lors de l'étape 2. Dans certains cas, la description conceptuelle peut déjà suffire à satisfaire aux exigences de protection du captage (zone Z_u -BAPC). Sinon, le modèle conceptuel initial sert de point de départ pour l'étape 2.

Le modèle conceptuel initial doit refléter le type de système hydrogéologique avec ses limites *possibles* et ses processus d'alimentation *potentiels*. C'est sur cette base que la zone Z_u -BAPC est définie. La compréhension conceptuelle des limites du système et des processus d'alimentation de l'aire Z_u -BAPC constitue l'étape fondamentale pour délimiter de la manière la plus fiable possible l'aire d'alimentation Z_u : on distingue ainsi l'aire d'où l'eau peut *éventuellement* parvenir jusqu'au captage de l'aire d'où l'eau *ne peut pas* parvenir jusqu'au captage.

Une approche fondée sur l'étude de variantes doit permettre de cerner l'éventail des situations géologiques et hydrauliques plausibles, en particulier lorsque les données disponibles sont incertaines ou lacunaires. L'emprise des modèles conceptuels plausibles sert de base à la délimitation de l'aire d'alimentation (esquisse de l'étape 1 dans l'illustration 3). Ce chapitre explique les paliers de l'étape 1 conformément au logigramme de l'illustration 2.

3.1.1 Données de base existantes

À l'étape 1, toutes les informations existantes sur le captage, l'aquifère, ainsi que la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie régionales sont récoltées. Aucune nouvelle donnée n'est collectée sur le terrain.

Cette étape repose sur l'examen et l'analyse systématiques des informations existantes, qui comprennent généralement au moins les bases de données suivantes :

Informations facilement disponibles

- Visite du site
- Atlas géologique 1:25'000 avec explications
- Données climatiques de MétéoSuisse
- Modèle altimétrique numérique du terrain et de la surface rocheuse
- Données vectorielles géologiques GeoCover
- Concession de prélèvement des eaux souterraines
- Planification générale de l'approvisionnement en eau

Informations régionales et collectées de façon standard

- Cartographie hydrogéologique
- Expertises hydrogéologiques pour la délimitation des zones de protection des eaux souterraines
- Données d'exploitation du réseau d'approvisionnement en eau (débits et qualité de l'eau brute)

Sources de données ponctuelles plus détaillées

- Relevés géologiques issus de forages réalisés dans le cadre d'investigations de terrains constructibles, de sites contaminés ou pour la géothermie
- Données hydrogéologiques de base existantes (niveaux piézométriques des eaux souterraines, débits des sources, cartes d'isohypses de la surface de la nappe d'eau souterraine, données sur la qualité des eaux souterraines et de surface, etc.)

Travaux préparatoires spécifiques (s'il y a lieu)

- Modèles conceptuels ou numériques des eaux souterraines existants
- Recherches existantes relatives aux conditions hydrogéologiques de la zone

L'annexe A2 propose un outil pour dresser l'inventaire des données existantes. Sur la base de cet aperçu complet, on évalue quelle étape peut être atteinte et si certains paliers des étapes 1 ou 2 peuvent être sautés (Illustration 2).

3.1.2 Modèle conceptuel initial Z_u -BAPC

Sur la base des données existantes, un ou plusieurs autres modèles conceptuels hydrogéologiques sont élaborés (Box 1). Les étapes possibles comprennent notamment la réalisation de coupes hydrogéologiques conceptuelles, l'estimation de directions d'écoulement des eaux souterraines à partir des données disponibles, la délimitation des principaux bassins d'alimentation à l'échelle générale ainsi que l'identification des principaux aquifères sur la base de la géologie régionale. Le modèle conceptuel initial de l'étape 1 doit refléter au mieux les limites du système et les processus d'alimentation possibles, et permettre un classement approximatif du système dans le triangle des processus. La plausibilité de ce classement est vérifiée à l'aide d'un bilan hydrique (Box 2). Le résultat de l'étape 1 est un modèle conceptuel initial qui comprend une ou plusieurs variantes justifiées sur le plan hydrogéologique concernant les limites *possibles* du système et les processus d'alimentation *potentiels*. À cet égard, l'emprise de l'ensemble des variantes plausibles est délimitée spatialement en tant que Z_u -BAPC.

Principes directeurs pour l'élaboration de modèles conceptuels hydrogéologiques Z_u -BAPC

Les modèles conceptuels hydrogéologiques doivent trouver un équilibre entre le réalisme et la simplification du modèle. La conceptualisation nécessite donc une simplification judicieuse des systèmes aquifères complexes pour que les structures essentielles et les processus pertinents puissent être représentés de manière identifiable et compréhensible.

Aussi bien une simplification excessive qu'une abstraction insuffisante comptent parmi les sources d'erreurs les plus fréquentes lors de l'élaboration d'un modèle conceptuel. Un modèle conceptuel initial robuste est indispensable pour que, lors des étapes 2 et 3, des décisions ciblées et compréhensibles puissent être prises concernant l'acquisition des données, la délimitation du Z_u -BAPC, et enfin la quantification des contributions à l'alimentation du captage.

Variantes conceptuelles comme base pour la compréhension du système

Les modèles conceptuels hydrogéologiques ou les variantes conceptuelles du bassin Z_u -BAPC constituent la base de la compréhension du système et servent de modèle de travail pour les étapes suivantes. Dans certains cas, un modèle conceptuel assez clair est identifié et peut suffire à satisfaire aux exigences de protection du captage (bassin Z_u -BAPC). Si les incertitudes sont significatives, alors des variantes conceptuelles seront élaborées et serviront de point de départ pour la suite du traitement. Elles comprennent la caractérisation du type d'aquifère et des processus d'alimentation pertinents, ainsi qu'une première délimitation des limites possibles du système. À cette fin, toutes les informations existantes sont rassemblées, les incertitudes et les lacunes sont explicitement consignées et synthétisées en plusieurs variantes plausibles pour former une vue d'ensemble. La description qualitative de l'écoulement des eaux souterraines est importante pour vérifier la cohérence des hypothèses. Les variantes conceptuelles doivent être considérées comme provisoires : elles ne constituent pas une délimitation définitive, mais un outil permettant d'ordonner les processus, de vérifier les hypothèses et d'identifier les questions prioritaires pour l'acquisition de données ultérieure. Elles décrivent le type de système, la structure et la dynamique possibles de l'écoulement souterrain ainsi que les processus d'alimentation pertinents. Ce faisant, elles intègrent des interprétations géologiques, hydrauliques et hydro(géo)logiques pour caractériser le Z_u -BAPC et leur plausibilité est vérifiée respectivement à l'aide de bilans hydriques et de bilans de matière.

Comment élaborer des variantes du modèle conceptuel hydrogéologique initial ?

Lorsque les données disponibles sur la structure du sous-sol, l'hétérogénéité de l'aquifère ou l'influence de processus importants (p. ex. l'interaction entre les cours d'eau et les eaux souterraines) sont insuffisantes, il est judicieux de développer plusieurs variantes plausibles, qui servent à représenter scénarios plausibles d'alimentation du captage. Elles reposent sur différentes hypothèses concernant les structures géologiques, les chemins d'écoulement et les processus d'alimentation. Une variante comprend toujours une interprétation possible du système. L'étude systématique des variantes de différents concepts vise à représenter l'ensemble des interprétations possibles du système, ce qui permet de vérifier systématiquement l'influence des incertitudes sur les résultats. Les modèles conceptuels des variantes doivent être comparés les uns aux autres dans le cadre de la procédure par étapes suite à l'acquisition ciblée de nouvelles données. Cela permet de se concentrer progressivement sur des variantes de plus en plus plausibles et de quantifier les contributions qui y sont associés, ce qui s'accompagne d'une réduction de la superficie du Z_u-BAPC.

Représentation de modèles conceptuels hydrogéologiques

En plus d'une vue en plan, un profil hydrogéologique peut servir à illustrer les conditions hydrogéologiques du sous-sol dans sa dimension verticale. Il montre la structure des couches aquifères ou aquicludes, la position de la nappe d'eau souterraine ainsi que les chemins d'écoulement de l'eau, depuis les zones de recharge jusqu'au(x) captage(s), aux sources ou aux zones d'exfiltration. Différentes approches peuvent être choisies pour représenter les modèles conceptuels hydrogéologiques. Souvent, plusieurs variantes sont développées, qui reflètent différentes interprétations possibles du système. Celles-ci peuvent être illustrées sous différentes formes en fonction des données disponibles, de la complexité du système et des objectifs visés, par exemple :

- Profils hydrogéologiques ou coupes conceptuelles illustrant la structure verticale des couches et des écoulements souterrains ;
- Cartes générales indiquant les limites des bassins d'alimentation, les zones d'infiltration et les directions d'écoulement potentielles ;
- Autres représentations schématiques permettant d'illustrer des systèmes complexes ;
- Esquisse du système dans le triangle des processus permettant de classer les processus d'alimentation dominants ;

Le choix de la forme de la représentation dépend donc des données disponibles et, en particulier, de la complexité du système. L'objectif n'est pas tant de respecter une forme homogène que de rassembler les informations disponibles de manière cohérente, de mettre en évidence les incertitudes et de donner une image plausible des relations possibles au sein du système.

Box 1 : Principes de base pour l'élaboration de modèles conceptuels hydrogéologiques

3.1.3 Évaluation de l'incertitude

Les variantes conceptuelles et les bilans hydriques qui y sont associés servent à représenter l'ampleur des différents taux d'alimentation estimés (Illustration 4 et Illustration 6), donnant une estimation des incertitudes. L'analyse graphique semi-quantitative indique les incertitudes qui y sont associées. Sur cette base, l'acquisition de données et des investigations complémentaires peuvent être planifiées de manière ciblée.

3.1.4 Cahier des charges de l'étape 2

Le dernier palier de l'étape 1 consiste à rédiger le cahier des charges concret qui, sur la base des incertitudes identifiées, définit des objectifs de recherche concrets et des axes méthodologiques prioritaires pour l'étape 2. Il décrira une proposition pour l'acquisition de données de l'étape 2 et avec une estimation des coûts.

Le cahier des charges précisera quelles incertitudes peuvent être traitées à l'aide de quelles acquisitions ou analyses de données, y compris de l'utilisation d'approches de modélisation, et comment la réduction de ces incertitudes influe sur la délimitation du bassin d'alimentation du captage BAC (annexe A2). À cet égard, il convient d'expliquer de manière compréhensible, pour chaque investigation prévue, i) quelle incertitude est réduite, ii) dans quelle mesure le paramètre concerné influence le résultat global et iii) quel résultat ou quelle amélioration peut être raisonnablement escompté.

Sur la base du Z_u-BAPC défini à l'étape 1 et du cahier des charges comprenant une estimation des coûts pour l'étape 2, le service cantonal compétent évalue les avantages et l'effort d'une nouvelle

réduction de la superficie. En tenant compte des mesures concrètes à prendre, le service cantonal compétent décide si une nouvelle réduction de la superficie est appropriée et proportionnée.

Si tel est le cas, la procédure par étapes mène à l'étape 2. Il convient de noter que le traitement de l'étape 2 peut, dans de nombreux cas, être itératif : de nouvelles connaissances issues d'acquisition de données ou de modélisations peuvent nécessiter une adaptation du programme d'investigation ou une nouvelle vérification de la délimitation du système. Si une réduction de la superficie n'est pas appropriée, le Z_u -BAPC est délimité comme aire d'alimentation Z_u (Illustration 1 et section 1.4).

3.2 Étape 2 – Bassin d'alimentation du captage BAC

L'objectif de l'étape 2 est de clarifier les limites du système et de quantifier les processus d'alimentation. Il s'agit de la base pour délimiter le bassin d'alimentation du captage BAC (Illustration 2 et Illustration 3). L'étape 2 cherche à déterminer d'où vient *effectivement* l'eau. Le travail se concentre sur le développement et la précision du modèle conceptuel hydrogéologique initial élaboré lors de l'étape 1. L'étape 2 consiste à acquérir des données et à procéder à leur analyse approfondie sur la base du cahier des charges établi à l'étape 1.

3.2.1 Acquisition ciblée de données

Au cours de l'étape 2, les données du projet sont systématiquement complétées en fonction du cahier des charges élaboré à l'étape 1. À cette fin, des outils d'analyse hydrogéologique appropriés et des investigations de terrain sont utilisés. L'annexe A2 propose un guide pour l'acquisition de données visant à clarifier les limites du système et les processus d'alimentation.

L'objectif de cette acquisition de données est de réduire autant que possible les incertitudes identifiées grâce à des investigations ciblées pour déterminer de manière fiable la superficie du bassin d'alimentation du captage BAC.

L'acquisition de données s'effectue généralement de manière itérative, en commençant par des méthodes peu coûteuses telles que la cartographie hydrogéologique de surface ou les jaugeages des cours d'eau et de sources, pour aller jusqu'à des investigations coûteuses comme des forages, des investigations géophysiques et des approches de modélisation (annexe A2).

3.2.2 Consolidation du modèle conceptuel BAPC en BAC

L'analyse des données collectées permet de faire évoluer le modèle conceptuel BAPC et le bilan hydrique élaborés à l'étape 1 vers un modèle conceptuel hydrogéologique BAC détaillé. Les données collectées et les évaluations effectuées au cours de cette étape doivent fournir les éléments nécessaires pour exclure ou adapter certaines variantes. Cela permet de réduire de manière ciblée les incertitudes existantes ainsi que les superficies identifiées comme potentiellement contributives.

Ainsi, sur la base du modèle conceptuel initial BAPC de l'étape 1, les lacunes identifiées sont systématiquement comblées lors de l'étape 2 afin de délimiter le BAC de manière précise et fiable. Pour vérifier la plausibilité de la zone délimitée, on valide le BAC à l'aide d'un bilan hydrique (Box 2) et, si possible, en tenant compte des flux de substances dans le BAC.

Validation du BAC au moyen d'un bilan hydrique

Un bilan hydrique compare la somme de tous les apports d'eaux souterraines (p. ex. recharge des eaux souterraines par les précipitations, infiltration des eaux superficielles, flux latéral) aux écoulements souterrains écoulés (p. ex. prélèvement du captage, sources, exfiltration vers les eaux superficielles, drainages, etc.). Il sert à vérifier si le modèle conceptuel est plausible sur le plan hydrologique (contrôle de cohérence) et s'il peut expliquer les volumes d'eau observés. Le bilan hydrique correspond généralement à :

$$\text{Recharge} - \text{décharge aux exutoires} = \text{différence du volume stocké}$$

L'hypothèse fondamentale dans le cadre d'une analyse en régime permanent est que le volume d'eau stocké reste constant dans le temps (c'est-à-dire que les alimentations sont égales aux pertes) et que le bilan peut être établi à partir des valeurs annuelles moyennes. Dans les systèmes qui présentent des tendances à long terme et donc une instabilité interannuelle, il n'est pas pertinent de définir une aire d'alimentation Z_u (invariante dans le temps). La validité d'un régime permanent peut être évaluée à l'aide de données piézométriques. La démarche à adopter face à des systèmes présentant une non-stationnarité est décrite dans la Box 6.

Contrairement à un bilan hydrique du système, le bilan d'un BAC est plus simple, car un bassin d'alimentation du captage BAC n'a, par définition, qu'un seul exutoire, à savoir le captage d'eau souterraine (CES) avec le volume prélevé Q_{CES} [m³/an]. En régime permanent ($\Delta S \approx 0$) et avec le captage d'eau souterraine comme seul exutoire, le bilan hydrique du bassin d'alimentation du captage BAC se simplifie comme suit :

$$\text{Contributions (BAC)} = Q_{CES}$$

Les taux d'alimentation du captage peuvent être répartis en trois processus d'alimentation : Q_P représente la composante pluviale [m³/an], Q_F la composante fluviale [m³/an] et Q_L la composante de flux latéral [m³/an], de sorte que le bilan hydrique du BAC peut s'écrire comme suit :

$$Q_P(\text{BAC}) + Q_F(\text{BAC}) + Q_L(\text{BAC}) = Q_{CES}$$

Parmi toutes les contributions, la composante pluviale Q_P peut être estimée comme suit à partir du taux de recharge moyenne I [m/an] qui a lieu sur la superficie A_{BAC} [m²] (ou du BAPC à l'étape 1) :

$$(P - \text{ETR} - R) \cdot A_{BAC} = I \cdot A_{BAC} = Q_P(\text{BAC})$$

où P [m/an] correspond à la quantité moyenne annuelle de précipitations, ETR [m/an] à l'évapotranspiration moyenne annuelle réelle et R [m/an] au ruissellement superficiel moyen annuel. Selon la situation, la composante pluviale peut être fortement influencée par des facteurs anthropiques (p. ex. surfaces imperméabilisées en milieu urbain ou drainées ou irriguées par l'agriculture, fuites, etc.), ce qui doit bien sûr être pris en compte dans chaque cas et peut même conduire à la prise en compte de processus d'alimentation supplémentaires. À des fins de vérification de la plausibilité, le bilan hydrique BAC est reformulé comme suit :

$$Q_{CES}(\text{BAC}) - Q_P(\text{BAC}) = Q_F(\text{BAC}) + Q_L(\text{BAC})$$

Ce bilan permet de déterminer si le volume prélevé au captage des eaux souterraines peut s'expliquer à la lumière des hypothèses formulées concernant les limites du système et les processus d'alimentation. Si, lors de ce type de vérification de plausibilité, on constate par exemple que le volume prélevé est supérieur à l'apport pluviométrique et qu'aucun autre processus d'alimentation n'est *possible*, cela signifie que le bassin d'alimentation du captage BAC de cette variante est trop petit.

Démarche de vérification de la plausibilité au moyen d'un bilan des substances

Un bilan des substances (p. ex. nitrates ou autres traceurs naturels et artificiels) complètera le bilan hydrique en comparant les flux de substances dans la variante BAC considérée. Le bilan des substances permet de tirer des conclusions sur les zones d'origine et les processus d'alimentation ainsi que sur les temps de résidence.

Box 2 : Vérification de la plausibilité des zones délimitées au moyen d'un bilan hydrique ou d'un bilan des substances.

3.2.3 Évaluation de l'incertitude

Comme pour l'étape 1, le triangle des processus va servir à évaluer les incertitudes. Grâce au bilan et aux nouvelles données, la plage d'incertitude devrait diminuer. Si une approche itérative est appliquée, on devrait voir la diminution à chaque itération. Une simulation numérique simplifiée des écoulements souterrains pourrait / devrait réduire l'incertitude si elle est appliquée.

À des fins de vérification et si les données le permettent, on peut vérifier la plausibilité de la surface du BAC à l'aide d'un bilan des matières. La qualité de l'eau *attendue* compte tenu des limites du système et des contributions identifiées devrait correspondre aux valeurs *effectivement* mesurées au captage. Étant donné que les contributions fluviales, latérales ou pluviales à l'alimentation d'un captage présentent souvent une signature chimique différente, les rapports de mélange de ces signatures peuvent indiquer si la position dans le triangle des processus est cohérente ou non.

L'évaluation et le traitement des incertitudes à l'étape 2 sont complexes et constituent, dans de nombreux cas, un processus itératif (Illustration 4 et Illustration 6).

3.2.4 Cahier des charges de l'étape 3

Le cahier des charges de l'étape 3 comprend l'acquisition de données nécessaires pour élargir et structurer les données disponibles relatives au bassin d'alimentation du captage BAC pour permettre la paramétrisation correcte d'un modèle numérique utilisé pour la réduction de la superficie selon la règle des 90 %. Relevons que, même avec un modèle, les incertitudes peuvent souvent demeurer très importantes ; la cause principale étant, dans de nombreux cas, l'absence de données de terrain suffisantes. Le cahier des charges de l'étape 3 doit également inclure les exigences relatives à la modélisation numérique des écoulements souterrains. Le programme d'investigation proposé doit toujours être chiffré à l'aide d'une estimation des coûts. À cet égard, il convient d'expliquer de manière compréhensible, pour chaque mesure prévue, i) quelle incertitude est réduite, ii) dans quelle mesure le paramètre concerné influence le résultat global et iii) quel résultat ou quelle amélioration peut être raisonnablement escompté.

Sur la base du bassin d'alimentation du captage BAC délimité à l'issue de l'étape 2, du cahier des charges incluant l'estimation des coûts de l'étape 3 ainsi que des mesures concrètes à prendre, le service cantonal compétent évalue l'adéquation et la proportionnalité d'une nouvelle réduction de la superficie. Si une réduction supplémentaire de la superficie est jugée appropriée, la procédure par étapes mène à l'étape 3. Si une réduction de la superficie n'est pas appropriée, le bassin d'alimentation du captage BAC est délimité comme aire d'alimentation Z_u (Illustration 1 et section 1.4).

3.3 Étape 3 – Réduction de la superficie selon la règle des 90 %

Sur la base du modèle conceptuel du bassin d'alimentation du captage BAC, dont la plausibilité et la validité ont été vérifiées à l'étape 2, l'étape 3 consiste en une analyse approfondie visant à déterminer quelles zones du bassin d'alimentation du captage BAC contribuent le plus à l'alimentation du captage d'eau souterraine et dans quelle mesure. L'étape 3 répond ainsi à la question « D'où provient l'eau et *en quelle quantité* ? ». Cette quantification permet de réduire la superficie du bassin d'alimentation du captage BAC à l'aide de la règle des 90 % en délimitant la plus petite superficie possible qui contribue à (environ) 90 % à l'alimentation du captage d'eau souterraine (Box 3 et Box 4).

L'étape 3 nécessite donc une résolution spatiale élevée et une incertitude aussi faible que possible, ce qui ne peut être obtenu que par calcul et, dans de nombreux cas, uniquement à l'aide d'un modèle numérique des écoulements souterrains (sauf dans les cas hydrogéologiques simples, p. ex. pour les captages de sources dont le bassin d'alimentation BAC est clairement délimité et alimenté par les eaux pluviales). Dans les cas hydrogéologiques complexes, un modèle numérique des eaux souterraines permet de tenir compte de l'ensemble des interactions hydrauliques entre les processus (d'alimentation) pour calculer un champ d'écoulement continu entre les processus d'alimentation et la décharge des aquifères.

3.3.1 Acquisition de données pour le paramétrage du modèle

À l'étape 3, la base de données est systématiquement complétée en fonction du cahier des charges de l'étape 2, ce qui permet de déterminer avec plus de précision les paramètres importants pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines (p. ex. perméabilité, porosité, recharge, etc.). À partir de ces paramètres de modélisation améliorés, on établit généralement un modèle numérique des écoulements souterrains ou un modèle mathématique simplifié. Cela permet de procéder à la réduction de la superficie selon la règle des 90 %. L'annexe A2 propose un outil pour l'acquisition ciblée de données.

Comme le laisse déjà entendre la règle des 90 %, la quantification spatiale est au cœur de l'étape 3. L'acquisition ciblée de données sert à paramétrer le système et à quantifier spécifiquement la répartition spatiale des contributions à l'alimentation au travers des trois types de limites (recharge pluviale, fluviale ou latérale). En complément, il est possible de collecter des données supplémentaires (p. ex. analyses hydrochimiques, etc.) afin de permettre une validation indépendante de celle du modèle d'écoulement des eaux souterraines calibré. Cette analyse permettra de préciser les incertitudes du modèle.

3.3.2 Réduction de la superficie selon la règle des 90 %

La règle des 90 % consiste à différencier les contributions à l'alimentation du captage en fonction de leur localisation. Seules les zones qui contribuent à environ 90 % du volume prélevé au niveau du captage seront conservées.

Pour identifier les surfaces correspondantes, les taux d'alimentation spécifiques C_i [m/s] sont classés par ordre décroissant. À partir de ce classement décroissant, on reporte les taux d'alimentation C_i^1 [m/s] sur les surfaces S_i [m²] et on calcule les contributions à l'alimentation [m³/s] respectives au débit du captage. La réduction de la superficie selon la règle des 90 % s'effectue sur cette base : on englobe les surfaces dont la contribution cumulée correspond à environ 90 % du volume prélevé [m³/s] par le captage d'eau souterraine. On identifie ainsi les surfaces qui contribuent le plus à l'alimentation du captage d'eau souterraine (Box 3).

Selon la complexité de la situation hydrogéologique, différentes approches méthodologiques peuvent être utilisées. On distingue deux types de démarches : les estimations de bilan hydrique et les analyses à l'aide de modèles numériques des eaux souterraines (Tableau 1) :

- Les estimations du bilan hydrique reposent sur des bilans de masse. Le taux d'alimentation est quantifié comme le produit de la surface d'une probabilité de sortie donnée avec les taux de recharge spatiales. Cette approche convient particulièrement aux bassins d'alimentation du captage BAC de petite taille présentant des processus d'alimentation et d'écoulement peu complexes, typiquement les captages de sources sur le Plateau ou dans les régions alpines. Les résultats fournissent une quantification spatialement peu différenciée de la contribution à l'alimentation du captage, sans prise en compte explicite des chemins d'écoulement complexes ou des retards temporels (annexe A1.2).
- Les modèles numériques des écoulements souterrains permettent de représenter des situations hydrauliques complexes et de simuler le champ d'écoulement qui en résulte dans l'aquifère. Le champ d'écoulement des eaux souterraines est alors calculé dans un modèle discrétisé (et, s'il y a lieu, dans le temps). Un tel modèle permet de tenir compte des processus complexes d'alimentation et d'écoulement, de l'hétérogénéité de l'aquifère, de diverses conditions aux limites (naturelles et ouvrages), et de différents éléments du système. Le calcul des chemins d'écoulement inversés permet de déterminer les zones d'origine de l'eau captée et de quantifier spatialement le taux d'alimentation du captage (Box 3 et Box 4). Cette approche est particulièrement adaptée aux systèmes à grande échelle et hydrauliquement complexes dans les aquifères poreux ou dans des systèmes fracturés ou peu karstifiés qui permettent une approximation par un milieu continu.

Les deux approches permettent de procéder à la réduction de la superficie selon la règle des 90 %. Une différence essentielle entre les deux approches réside dans la résolution spatiale, le niveau de détail de la modélisation ainsi que les possibilités d'analyse des scénarios et des incertitudes. Alors

que les estimations du bilan permettent des conclusions globales et stationnaires, les modèles numériques des écoulements souterrains permettent des analyses dynamiques dans le temps et une évaluation quantitative des incertitudes. Le choix de l'approche appropriée dépend de la complexité et de la non-stationnarité (annexe A1.2) du champ d'écoulement ainsi que de l'opportunité d'une réduction de la superficie.

Quelle que soit l'approche choisie, les contributions quantifiées de manière différenciée dans l'espace permettent d'étudier les flux d'eau et de substances au sein du bassin d'alimentation BAC. Cela sert, d'une part, à vérifier la plausibilité des superficies délimitées et, d'autre part, cela sert de base pour la déduction et l'évaluation de scénarios d'assainissement concrets. Le résultat de l'étape 3 est la quantification différenciée dans l'espace des contributions à l'alimentation du captage à l'échelle du bassin d'alimentation, ce qui permet de procéder à la réduction de la superficie du BAC pour ne conserver que les parties qui appartiennent à l'aire d'alimentation Z_u selon la règle des 90 % (Z_{u-90}).

Tableau 1 : Aperçu des différentes démarches pour l'application de la règle des 90 %

Démarche	Estimation du bilan	Modélisation numérique des eaux souterraines
Principe fondamental	Bilan non fondé sur un modèle numérique	Bilan fondé sur un modèle numérique
Données disponibles	Taux de recharge des eaux souterraines	Taux de recharge dans l'espace et probabilité de sortie des chemins d'écoulement vers un captage des eaux souterraines
Résolution spatiale	Grossière	Fine (discretisée spatialement, analysable avec précision)
Dynamique temporelle	Stationnaire et / ou non-stationnaire	Stationnaire et/ou non-stationnaire
Complexité du système	Appropriée pour les systèmes simples et bien définis (p. ex. source alimentée par les eaux pluviales)	Appropriée pour les systèmes complexes (p. ex. aquifère en roche meuble à grande échelle, interaction entre les eaux souterraines et les cours d'eau, et flux latéraux)
Chemins d'écoulement et processus de transport	Pas représentés explicitement	Représentables explicitement (y c. chemins d'écoulement, probabilité de sortie, temps de séjour et directions d'écoulement)
Analyse de l'incertitude	Seulement qualitative	Analyse quantitative possible (p. ex. scénarios, analyses de sensibilité, approches stochastiques)
Effort de modélisation	Faible à moyen	Élevé (conception du modèle, calibrage, validation)
Application typique	Puits de pompage et captages de sources sur le Plateau ou dans les régions alpines à la topographie marquée	Puits de pompage dans des dépôts de roches meubles, captages d'eau souterraine à proximité des cours d'eau, bassins d'alimentation étendus avec des captages d'eau souterraine concurrents
Avantages	Rapide, peu coûteuse, claire	Résolution spatiale fine, représentation de rapports complexes, haute pertinence
Désavantages	Résolution spatiale faible, pas de représentation de la dynamique ou de la complexité des chemins d'écoulement	Complexe, gourmande en données, exige des connaissances spécialisées poussées, ne peut pas être mise en œuvre judicieusement pour tous les systèmes d'écoulement des eaux souterraines

Calcul du taux d'alimentation du captage

Pour chaque point i situé dans le bassin d'alimentation du captage, le taux d'alimentation du captage C_i [m/s] est calculée comme le produit des taux de recharge pluviale ou latérale ou d'infiltration fluviale I_i avec la probabilité de sortie respectives P_i :

$$C_i = I_i \times P_i$$

Dans le cas de champs d'écoulement simples sur le plan hydraulique, comme un captage de source dont le bassin d'alimentation du captage BAC alimenté par les eaux pluviales est clairement délimité, on admet une probabilité de sortie homogène de $P_i = 1$. Le choix des unités spatiales (p. ex. pixels ou cellules de modèle) doit correspondre aux besoins de la modélisation : elles doivent être suffisamment petites pour refléter les hétérogénéités spatiales pertinentes. Des unités trop grossières comportent un risque de distorsions systématiques, car les différences locales d'alimentation ou de probabilité de sortie ne sont plus correctement saisies.

Afin d'identifier les principales surfaces contributrices au sein du bassin d'alimentation du captage BAC, les taux d'alimentation $C_i^\downarrow$ [m/s] sont classés par ordre décroissant¹.

Report de la contribution à l'alimentation du captage sur des surfaces pour calculer les taux d'alimentation

Puisque par définition, le taux d'alimentation C_i [m/s] ne représente que la fraction de la recharge qui arrive au captage, il suffit de la multiplier par la surface pour obtenir les contributions volumétriques à l'alimentation.

Le bilan hydrique pour réduire la superficie

Les contributions volumétriques à l'alimentation sont additionnées sur base des taux d'alimentation $C_i^\downarrow$ classés par ordre décroissant jusqu'à ce qu'une proportion donnée λ [-] (comprise entre 0 et 1) du volume prélevé Q_{CES} [m³/s] soit atteinte.

De cette manière, il est possible de déterminer la surface qui contribue, par exemple, à hauteur de 50, 70 ou 90 % à l'alimentation du captage d'eau souterraine. Le bilan hydrique servant à réduire la superficie est calculé à partir de :

$$\lambda \times Q_{CES} = \sum_{i=1}^n C_i^\downarrow \times S_i$$

où Q_{CES} correspond au débit de référence (volume prélevé) [m³/s], $C_i^\downarrow$ correspond aux taux d'alimentation du captage [m/s] classés par ordre décroissant et S_i correspond à la surface globale [m²] pour un même taux d'alimentation, et $\lambda = 0.9$.

Box 3 : Procédure de réduction de la superficie selon la règle des 90 %

¹ On introduit la notation mathématique suivante pour les taux d'alimentation du captage par zones discrètes S_i , et dans l'ordre décroissant : $C_i^\downarrow$.

Calcul de la probabilité de sortie

La probabilité de sortie $P_i(x,y)$ indique la probabilité avec laquelle l'eau souterraine s'infiltrant à un endroit donné du bassin d'alimentation du captage BAC aboutit à un point de sortie défini (p. ex. un captage spécifique des eaux souterraines).

Approche déterministe (basée sur l'équation d'advection-dispersion)

Une approche courante pour calculer $P_i(x,y)$ repose sur la résolution de l'équation de transport advectif-dispersif dans un champ d'écoulement stationnaire. Le calcul s'effectue alors dans le sens inverse de l'écoulement, c'est-à-dire en amont du captage d'eau souterraine. Les conditions de concentration aux limites suivantes s'appliquent :

- au niveau du captage considéré : $P = 1$ (correspond à une probabilité de sortie de 100 %),
- au niveau de toutes les autres sorties du système (p. ex. sources, zones d'exfiltration, captages concurrents) : $P = 0$ (correspond à une probabilité de sortie de 0 %).

La simulation stationnaire dans le champ d'écoulement inversé qui en résulte décrit le mélange d'eau avec $P = 1$ (provenant du captage) et $P = 0$ (provenant d'autres sorties). La distribution des concentrations qui en résulte dans l'espace modélisé correspond directement à la probabilité de sortie recherchée $P_i(x,y)$.

Marche aléatoire (Random walk ou Particle tracking)

Une autre approche repose sur une méthode de suivi des particules par marche aléatoire, avec un suivi de particules vers l'avant ou vers l'arrière. On introduit de nombreuses particules d'eau virtuelles soit sur une superficie (suivi de particules vers l'avant), soit dans le captage considéré (suivi de particules vers l'arrière), et on suit leurs trajectoires dans le champ d'écoulement jusqu'à la sortie ou vers l'entrée. La probabilité $P_i(x,y)$ résulte de la densité relative des particules qui parviennent au captage considéré à partir d'une superficie donnée.

Les deux variantes tiennent compte de différentes manières de l'influence de la dispersion dans l'aquifère et reposent toutes deux sur des champs d'écoulement connus. Le calcul de la probabilité de sortie s'effectue, dans le premier cas, sous la forme d'une simulation de transport stationnaire dans le champ d'écoulement inversé, et dans le second cas, sous la forme d'une étape de post-traitement après la simulation d'écoulement.

Box 4 : Calcul des probabilités de sortie $P_i(x,y)$ avec un modèle numérique.

3.3.3 Évaluation de l'incertitude

Le triangle des processus vu à l'étape 2 peut également être utilisé à l'étape 3 pour évaluer les incertitudes. L'évaluation s'effectue en reportant la gamme de variations possible des processus d'alimentation. La gamme devrait être plus étroite à l'étape 3 qu'aux étapes 1 et 2. Dans les cas complexes, l'évaluation et la réduction des incertitudes s'effectuent de manière itérative. Les modèles numériques incluent néanmoins toujours des incertitudes inévitables, même lorsqu'ils sont soigneusement calibrés. La valeur ajoutée de ces modèles réside principalement dans une meilleure compréhension du système aquifère ainsi que dans l'évaluation systématique des incertitudes. Ils représentent toutefois généralement le meilleur moyen de calculer l'aire d'alimentation Z_{u-90} , mais les résultats doivent toujours être interprétés en tant compte des incertitudes existantes.

Les principales sources d'incertitude sont : i) les erreurs de mesure, qui peuvent être réduites mais pas totalement évitées, ii) la complexité non prise en compte en raison de simplifications spatiales, temporelles ou conceptuelles, iii) l'incertitude liée aux paramètres, car les paramètres hydrogéologiques ne sont pas disponibles ou que ponctuellement et leur précision varie, ainsi que iv) l'incertitude liée aux scénarios en raison de la prévisibilité limitée des évolutions hydrologiques futures, des influences climatiques ou des interventions humaines.

Dans certains cas, les simplifications admises dans le modèle peuvent induire des résultats inattendus. Les analyses de sensibilité constituent donc un outil essentiel pour comprendre les effets de ces facteurs d'incertitude et améliorer la robustesse du modèle. La simplification d'un modèle et les incertitudes liées aux paramètres sont souvent inévitables, notamment en raison de données limitées, de mesures ponctuelles et isolées, mais aussi de simplifications implicitement admises dans l'outil de modélisation choisi. Leur évaluation précise complète l'estimation de l'incertitude du modèle, mais est souvent difficile à quantifier.

Annexe

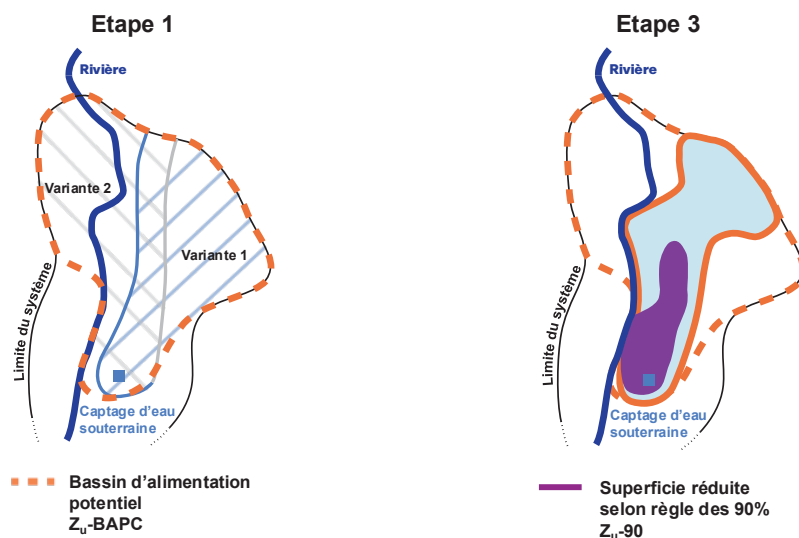
A1 Variantes du concept de base

Dans certaines situations hydrogéologiques, la procédure par étapes, idéalisée et standardisée, atteint ses limites conceptuelles. C'est le cas, par exemple, dans les aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes ou dans les systèmes présentant un champ d'écoulement nettement non-stationnaire où des adaptations appropriées du concept et de la méthodologie s'imposent. De telles configurations ne constituent pas des cas particuliers au sens strict, mais représentent des variantes du concept de base qui, en raison des caractéristiques spécifiques du système, nécessitent une adaptation méthodologique. L'annexe A1 présente des exemples de telles situations et fournit des indications sur les adaptations méthodologiques possibles pour la mise en œuvre.

A1.1 Aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes

Dans les aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes, les vitesses d'écoulement peuvent être très contrastées, de sorte que même des sources de pollution très éloignées peuvent nuire à la qualité de l'eau d'un captage. En raison de la complexité des chemins d'écoulement et de l'hétérogénéité marquée dans les systèmes karstiques, il n'est généralement pas possible de procéder à une estimation quantitative détaillée et fiable des taux d'alimentation au sein de l'ensemble du bassin d'alimentation du captage BAC. Pour une délimitation appropriée, il est en outre indispensable d'examiner les écoulements en trois dimensions, car les limites en surface des bassins topographiques s'écartent souvent fortement des bassins d'alimentation des systèmes d'écoulement souterrains. Compte tenu des recommandations pour la délimitation des zones de protection des eaux souterraines², le bassin d'alimentation du captage BAC doit servir de périmètre de référence pour la cartographie de la vulnérabilité. Dans ces systèmes très hétérogènes, la procédure par étapes se résume donc à deux étapes de traitement (Illustration 8). Les travaux nécessaires de délimitation des zones de protection des eaux souterraines sont généralement effectués avec la méthode EPIK 2.0.

² Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2025. Méthode de cartographie de la vulnérabilité. Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en région karstique. Connaissance de l'environnement, eaux. Berne.



Objectif	▪ Identification des unités lithologiques aquifères et peu perméables et de leur géométrie ▪ Évaluation des zones de recharge ▪ Délimitation BAPC	▪ Modèle conceptuel explicite incluant les processus d'alimentation pertinents ▪ Délimitation BAC
Données disponibles	▪ Toutes les informations existantes ▪ Aucune acquisition de données complémentaires	▪ Clarification des limites du système ▪ Acquisition de données spécifiques au cas
Méthodologie	▪ Élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique initial dont description des processus d'alimentation ▪ Bilan hydrique / bilan des substances pour vérification de la plausibilité des zones	▪ Acquisition de données ciblée pour clarification des limites du système ▪ Bilan hydrique volumétrique fondé sur des données ▪ Délimitation structurale de la zone saturée d'afflux des unités lithologiques perméables ▪ Vérification au moyen d'essais de traçage
Résultat	▪ BAPC ▪ Analyse des points faibles comme base de l'étape 2	▪ BAC

Illustration 8 : Concept adapté de la procédure par étapes pour son application aux aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes.

Dans les systèmes aquifères hybrides karstiques, fissurés et en roches meubles, dans lesquels, par exemple, un aquifère en roches meubles est alimenté par un système karstique adjacent ou sous-jacent, la zone karstique doit aussi être délimitée comme faisant partie du bassin d'alimentation du captage BAC. L'apport provenant du système karstique vers l'aquifère en roches meubles doit être pris en compte dans le calcul des taux d'alimentation (Box 3). La Box 5 illustre la méthodologie de détermination du bassin d'alimentation du captage BAC dans les aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes, de manière analogue à la détermination des périmètres des zones de protection des eaux souterraines.



1 Recensement des unités hydro-stratigraphiques

Sur la base des données lithostratigraphiques disponibles concernant la structure stratigraphique de la zone de recherche, on identifiera systématiquement les couches potentiellement karstiques qui peuvent contribuer à l'alimentation du captage d'eau souterraine. On répertorie également les couches peu perméables qui limitent la propagation verticale ou latérale des eaux souterraines. Il s'agit par exemple de couches marneuses. On peut également identifier certaines structures tectoniques telles que des failles, qui peuvent agir comme des barrières ou drains hydrauliques. L'objectif de cette acquisition de données est de cartographier la succession spatiale et l'épaisseur des unités hydro-stratigraphiques, et les structures tectoniques qui pourraient jouer un rôle sur les écoulements vers la source.

2 Délimitation structurale des couches aquifères

Dans les systèmes karstiques et fissurés, les écoulements, depuis leur infiltration en surface jusqu'à leur sortie dans un captage et / ou une source, sont principalement déterminées par les conditions structurales. C'est pourquoi il est essentiel de représenter de la manière la plus fiable possible la géométrie des unités lithologiques aquifères et peu perméables respectivement. Lorsque la structure géologique est simple, l'analyse structurale peut être effectuée sur une carte, de préférence, à l'aide d'une application SIG. En cas de structure géologique plus complexe, par exemple dans les zones fortement plissées et soumises à des contraintes tectoniques, il est généralement judicieux de créer un modèle géologique en 3D afin de mieux comprendre les structures souterraines et, par conséquent, les chemins d'écoulement.

3 Identification des zones de résurgence

L'identification des zones de résurgence est un autre élément essentiel du recensement conceptuel des chemins d'écoulement dans les systèmes karstiques et fissurés. En effet, elles fournissent de précieuses indications sur les conditions d'écoulement souterrain et permettent de mieux comprendre les directions d'écoulement, les rapports entre les gradients hydrauliques ainsi que les connexions hydrauliques entre le bassin d'alimentation et le captage d'eau souterraine. Sur la base des informations disponibles, comme les cartographies des sources, les débits observés ainsi que les tronçons de cours d'eau à débit temporaire ou permanent, il est possible de tirer des conclusions sur le système de drainage actif.

4 Délimitation des zones saturées

Sur la base des structures cartographiées des couches peu perméables et du modèle géologique en 3D (étape 2), la zone saturée des unités lithologiques aquifères est déterminée à partir du niveau de sortie des eaux souterraines. Pour ce faire, on suppose généralement un gradient faible, de l'ordre du pour mille, qui est ensuite reporté sur des profils hydrogéologiques élaborés précédemment (étape 2 ci-dessus). Lorsque la structure géologique est simple, l'analyse peut être effectuée manuellement ou à l'aide d'une application SIG. Dans le cas d'une structure géologique complexe, il est généralement opportun de créer un modèle géologique en 3D afin de délimiter de manière fiable la zone saturée.

5 Délimitation du bassin d'alimentation du captage BAC

La délimitation du bassin d'alimentation du captage BAC est basée sur la géométrie déterminée de la zone saturée et sur la géométrie de la couche aquifère. En fonction des conditions à la surface, des zones supplémentaires peuvent être ajoutées au bassin d'alimentation du captage BAC, car elles contribuent à l'alimentation du captage des eaux souterraines par le ruissellement superficiel.

6 Vérification de la plausibilité au moyen d'un bilan hydrique et d'essais de traçage

Un bilan hydrique, établi à partir de toutes les émergences (étape 3 ci-dessus) provenant de l'aquifère, permet d'évaluer la plausibilité de la superficie du BAC. La Box 2 décrit la démarche générale utilisée pour calculer le bilan hydrique. Si des incertitudes persistent quant à l'appartenance de certaines zones au bassin d'alimentation du captage BAC, la connexion hydraulique avec le captage doit être vérifiée au moyen d'essais de traçage.

Box 5 : Méthodologie de détermination du bassin d'alimentation du captage BAC dans les aquifères karstiques et fissurés très hétérogènes.

A1.2 Champ d'écoulement non-stationnaire

Importance de la non-stationnarité pour l'aire d'alimentation Z_u

Tous les systèmes hydrogéologiques présentent une non-stationnarité temporelle (p. ex. saisonnière) et spatiale du champ d'écoulement. Pour l'identification de l'aire d'alimentation Z_u , il est important d'évaluer si les variations du champ d'écoulement sont suffisamment marquées pour devoir être prises en compte dans la délimitation spatiale de l'aire d'alimentation Z_u . En d'autres termes, il convient de vérifier si le champ d'écoulement transitoire peut être approché avec une précision suffisante en partant de l'hypothèse de conditions stationnaires (moyennes). Si la non-stationnarité est significative et n'est pas prise en compte, elle peut conduire à une *sous-estimation* ou même une position erronée de la surface du bassin d'alimentation du captage BAC ou de la superficie réduite selon la règle des 90 %. L'évaluation de la pertinence des non-stationnarités requiert des connaissances spécialisées, fondées sur des séries temporelles de mesures et des observations à long terme, qui doivent permettre d'appréhender et de quantifier la dynamique du système.

Causes et types d'non-stationnarités

La complexité liée aux non-stationnarités (régimes transitoires) dépend essentiellement du système hydrogéologique considéré, de ses processus d'alimentation des conditions aux limites du système (p. ex. pompage) et des activités anthropiques au sein du bassin d'alimentation. À cela s'ajoutent les évolutions à long terme, dus par exemple au changement climatique, aux modifications de l'utilisation des sols ou aux interventions anthropiques telles que la régulation ou la renaturation des cours d'eau.

Non-stationnarité spatiale : influence de situations hydrogéologiques sur l'étendue du bassin d'alimentation du captage BAC

L'extension du bassin d'alimentation du captage BAC et la surface réduite selon la règle des 90 % sont fortement influencées par la situation hydrologique. Les fluctuations saisonnières ont des effets variables selon le processus d'alimentation dominant :

- **Systèmes à dominance pluviale :**
Dans ces systèmes, la recharge élevée des eaux souterraines pendant les périodes de hautes eaux fait que des surfaces réduites suffisent à alimenter la majeure partie du volume prélevé. En revanche, pendant les périodes de basses eaux, la recharge des eaux souterraines diminue, ce qui élargit la surface de contribution au débit du captage.
- **Systèmes à dominance fluviale :**
Dans ces systèmes, la contribution provenant de l'infiltration fluviale dépend fortement des conditions d'écoulement dans le cours d'eau, du volume prélevé au captage et de la distance entre celui-ci et le cours d'eau.
- **Systèmes à dominance de flux latéral :**
Pendant les périodes de hautes eaux, des chemins d'écoulement supplémentaires provenant de zones plus éloignées peuvent entrer en jeu sur le plan hydraulique. En période de basses eaux, en revanche, le flux diminue souvent considérablement, de sorte qu'une contribution plus importante des sources locales (pluviales ou fluviales) ou de l'aquifère devient nécessaire pour alimenter le captage d'eau souterraine.
Les situations hydrologiques extrêmes pertinentes, en particulier les périodes de basses et hautes eaux prononcées, peuvent influencer l'étendue spatiale effective du bassin d'alimentation du captage BAC et / ou la superficie réduite selon la règle des 90 %. Les périodes sèches ou humides constituent généralement un phénomène régional et influencent simultanément tous les processus d'alimentation, mais avec un décalage temporel dans certaines circonstances.

Importance de l'inertie du système

Pour évaluer la non-stationnarité, outre l'ordre de grandeur du changement et le moment où il se produit, l'inertie du système est déterminante. Cette dernière est largement déterminée par le rapport entre la taille du réservoir et le débit moyen du système, et donc par le temps de résidence moyen :

plus ce dernier est long, plus l'inertie du système est importante. Les événements extrêmes de courte durée, tels que de fortes pluies pendant quelques heures ou une crue, peuvent certes se produire de manière très localisée et intense, mais n'influencent parfois que très peu le champ d'écoulement, en fonction de l'inertie du système et de son comportement de stockage. Ainsi, même si une forte dynamique en surface était attendue, la lenteur des réactions du système aquifère pourrait notablement l'atténuer et la retarder.

Il convient donc d'évaluer au cas par cas si un état hydrologique donné, une fluctuation saisonnière ou un événement extrême est effectivement déterminant pour délimiter le bassin d'alimentation du captage BAC et la réduction de la surface selon la règle des 90 %.

Adaptation méthodologique pour la mise en œuvre pratique

La Box 6 décrit comment la non-stationnarité du champ d'écoulement peut être saisie et évaluée aux différentes étapes.



Étape 1 : Délimitation du BAPC en tenant compte des états possibles du système

À l'étape 1, le BAPC est délimité sur la base des limites du système *possibles* et des processus d'alimentation *potentiels* (chapitre 3.3.1). L'analyse de la non-stationnarité s'effectue à l'étape 1 selon une approche qualitative (bilans hydriques simples avec des plages de valeurs plausibles, p. ex. variabilité annuelle des précipitations, données de suivi existantes etc.), qui permettent de décrire la non-stationnarité des régimes hydrologiques et hydrogéologiques (recharge des eaux souterraines) et des régimes d'exploitation du prélèvement des eaux souterraines. Si les données existantes sont suffisantes, on peut effectuer une description de l'interaction non-stationnaire entre différents régimes hydrogéologiques (roches meubles / karst / fissures / interaction cours d'eau-eaux souterraines). Le BAPC est délimité comme l'emprise définie par les limites possibles du système, les processus d'alimentation potentiels et les *états possibles du système*.

Étape 2 : Délimitation du BAC dans le champ d'écoulement non-stationnaire

À l'étape 2, l'analyse de la non-stationnarité est effectuée de manière itérative. Dans un premier temps, les séries temporelles de mesures et les observations à long terme des isopièzes sont analysées en lien avec les processus d'alimentation identifiés. Diverses méthodes d'analyses de séries temporelles sont disponibles à cet effet. Une telle analyse permet une caractérisation systématique du comportement du système hydrogéologique sur de longues périodes et sert ainsi d'indicateur intégratif pour l'analyse des processus hydrologiques. Elle peut être utilisée pour quantifier différents aspects de la dynamique d'un système aquifère, tels que sa réactivité aux influences climatiques ou anthropiques. Les signatures hydrologiques typiques comprennent par exemple la variabilité des niveaux des eaux souterraines, les temps de réponse aux précipitations ou à la fonte des neiges, les schémas de persistance ainsi que les amplitudes de variation au cours de l'année. Cette analyse permet d'évaluer les amplitudes non-stationnaires et les décalages temporels auxquels on peut s'attendre. Dans un deuxième temps, des conditions moyennes représentatives sont déterminées sur la base de cette évaluation, sur lesquelles on s'appuie pour délimiter le bassin d'alimentation du captage BAC. Les séries temporelles et les signatures hydrauliques ou hydrochimiques ne fournissent certes pas d'informations directes sur la délimitation spatiale, mais elles permettent d'ajuster et de valider le modèle conceptuel, ce qui permet de garantir que toutes les données disponibles sont prises en compte de manière cohérente et que les limites du BAC sont déduites de manière plausible.

Lorsque la situation hydraulique est complexe, il est possible de recourir à des méthodes quantitatives plus sophistiquées qui permettent de modéliser l'interaction, variable dans le temps, entre différents processus d'alimentation hydrogéologiques dans le cadre d'une simulation transitoire du champ d'écoulement. L'analyse des chemins d'écoulement inverses, par exemple à l'aide de méthodes numériques telles que la marche aléatoire (angl. random walk, suivi des particules), est particulièrement adaptée. À cette fin, des particules fictives sont introduites dans le captage à différents moments de la simulation et rétro-suivies. Cela permet d'évaluer l'inertie du système et d'approcher sa dynamique *réelle*. Le BAC est délimité comme l'emprise définie par les chemins d'écoulement simulés.

Étape 3 : Réduction de la superficie selon la règle des 90 % dans le champ d'écoulement non-stationnaire

Dans le champ d'écoulement non-stationnaire, la probabilité de sortie et les taux de recharge d'un point $i(x,y)$ varient dans le temps, tout comme le taux d'alimentation $C_i(x,y)$ à l'alimentation du captage. Une réduction de la superficie selon la règle des 90 % (Box 4) pour différents états du système impliquerait, selon la saison ou la situation hydrologique, l'identification de différentes aires d'alimentation Z_u , ce qui n'est pas approprié dans la pratique. Sur la base des évaluations de l'étape 2, on évalue si la réduction de la superficie selon la règle des 90 % peut être effectuée par un modèle stationnaire (Box 4 et Box 5) à l'aide des conditions *moyennes* représentatives définies à l'étape 2. Dans la pratique, il n'existe actuellement aucune expérience permettant de prendre *explicitement* en compte la non-stationnarité au moyen de modèles de transport transitoires pour réduire la surface selon la règle des 90 %. Si la non-stationnarité du champ d'écoulement est telle que les conditions moyennes ne reflètent pas suffisamment le système, une réduction de la superficie au moyen de la règle des 90 % n'est pas pertinente.

Box 6 : Prise en compte de la non-stationnarité aux différentes étapes de délimitation des zones Z_u .

A1.3 Concurrence entre captages d'eau souterraine

Les grands aquifères du Plateau suisse sont généralement exploités par de multiples captages d'eau souterraine dont les bassins d'alimentation BAC ou les aires d'alimentation Z_u , peuvent s'influencer mutuellement. Le long des aquifères de fond de vallée en Suisse, on trouve souvent plusieurs captages d'eau potable disposés en série, qui interagissent entre eux via l'aquifère commun et peuvent ainsi s'influencer mutuellement. L'évaluation et la gestion des captages d'eau potable situés en aval nécessitent donc de prendre en compte les effets potentiels des prélèvements situés en amont. Ces effets peuvent concerner les conditions d'écoulement, la recharge et la qualité de l'eau.

La présence *éventuelle* d'une telle influence doit être vérifiée à l'étape 1, par exemple en fonction de l'emplacement, du volume prélevé et des conditions d'écoulement régionales. S'il existe une influence mutuelle *potentielle* entre les captages d'eau souterraine considérés, l'utilisation d'un modèle numérique des écoulements souterrains est généralement nécessaire pour analyser l'hydrodynamique résultante du champ d'écoulement.

À l'étape 2, on détermine le bassin d'alimentation du captage BAC du captage considéré en tenant compte de l'exploitation simultanée des captages concurrents. Les situations suivantes peuvent se présenter :

- Superposition complète :
Un captage plus petit se trouve entièrement dans le bassin d'alimentation du captage BAC d'un captage plus grand.
- Superposition partielle :
Les bassins d'alimentation du captage BAC se recoupent, mais comportent aussi des parties propres.
- Superposition dynamique :
En fonction de la variabilité temporelle du volume prélevé et de la non-stationnarité du champ d'écoulement, la limite du BAC peut se déplacer, ce qui entraîne une superposition variable dans le temps des bassins d'alimentation respectifs et des aires d'alimentation Z_u correspondantes. Des indications sur l'évaluation des champs d'écoulement non-stationnaires se trouvent à l'annexe A1.2.

A2 Guide pour l'acquisition de données dans la procédure par étapes

Le présent guide est un instrument qui permet de dresser un inventaire pragmatique des données existantes et de définir de manière systématique et ciblée la future acquisition de données. Une matrice (Illustration 9) permet d'associer les types de données aux objectifs de recherche, aux limites du système et aux processus d'alimentation.

Les critères de délimitation du système ainsi que les processus d'alimentation jugés pertinents sont répertoriés verticalement, tandis que les méthodes hydrogéologiques sont classées horizontalement en fonction du type de données qui y sont associées. Il est ainsi possible de voir quelles données servent à quels objectifs de recherche et comment ces données peuvent être analysées.

À l'étape 1, la matrice aide à établir l'inventaire des données existantes. Il est possible de montrer de manière claire quelles limites du système et quels processus d'alimentation sont déjà couverts par les données disponibles pour un site en particulier. Cela permet d'identifier les types de données manquants, sur la base desquels le cahier des charges de l'étape 2 et celui de l'étape 3 sont établis.

Pour une meilleure lisibilité de la matrice, les types de données sont classés par objectifs de recherche. Le contenu de chaque case de la matrice est décrit en fonction des résultats de l'analyse des données. La structure de la matrice est conçue de manière à offrir un cadre flexible et à pouvoir être complétée à mesure que de nouvelles méthodes sont développées ou de nouvelles sources de données sont trouvées.

La matrice permet une gestion flexible des différentes données et aide tant le service cantonal compétent que le bureau spécialisé mandaté à planifier et à mener à bien l'acquisition de données de manière ciblée et progressive.

			Objectif de recherche					
			Délimitation du système			Processus d'alimentation		
			Topo.	Struct.	Hydraul.	Pluvial	Fluvial	Latéral
Type de donnée	1D inv. dans le temps	1.1						
		1.2						
		1.3						
		1.4						
		1.5						
	1D transitoire	2.1						
		2.2						
		2.3						
		2.4						
		2.5						
		2.6						
		2.7						
		2.8						
	2D invariant dans le temps	3.1						
		3.2						
		3.3						
		3.4						
		3.5						
		3.6						
		3.7						
		3.8						
		3.9						
		3.10						
		3.11						
		3.12						
		3.13						
		3.14						
		3.15						
		3.16						
		3.17						
	2D transitoire	4.1						
		4.2						
		4.3						
		4.4						
		4.5						
		4.6						
		4.7						
		4.8						
		4.9						
	3D inv.	5.1						
		5.2						
	3D trans.	6.1						
		6.2						
		6.3						

Illustration 9 : Matrice guidant l'acquisition de données en fonction des objectifs de recherche.
État au 27.01.2026

Catalogue pour la collecte de données

Délimitation du système

T = Topographique
 S = Structurale
 H = Hydraulique

Processus d'alimentation

P = Pluvial
 F = Fluvial
 L = Latéral

État au 27.01.2026

Type de données 1D Invariant dans le temps		
1.1	S H	Forage
		Interprétation hydrogéologique du forage : épaisseur de l'aquifère, profondeur de l'horizon peu perméable, conductivité hydraulique
1.2	S	Sondage par battage
		Détermination de la structure du sol et de la compacité
1.3	H	Piézomètre
		Mesure du niveau des eaux souterraines, conductivité hydraulique
1.4	H P F L	Paramètres physico-chimiques
		Identification des paramètres caractéristiques pour l'analyse de la provenance de l'eau et les effets de mélange dans l'aquifère
1.5	H P F L	Isotopes hydrochimiques
		Détermination de l'origine et du temps de séjour de l'eau, et différenciation des processus d'alimentation

Type de données 1D Transitoire		
2.1	P	Mesures des précipitations
		Détermination de l'apport en eau pluviale comme intrant pour le bilan hydrique et l'évaluation de la recharge
2.2	H P F L	Piézomètre
		Séries temporelles du niveau, de la température et de la conductivité électrique
2.3	H P F L	Débit de captage ou débit de source
		Volume prélevé pour le bilan hydrique
2.4	P	Essais d'infiltration
		Détermination des taux d'infiltration réels pour quantifier la recharge pluviale
2.5	F	Mesure du gradient hydraulique dans le lit du cours d'eau et le long des rives
		Mesure directe des gradients verticaux entre le cours d'eau et les eaux souterraines sous-jacentes, et interaction avec les eaux souterraines adjacentes (tronçons de cours d'eau exfiltrants ou infiltrants)
2.6	H P F L	Paramètres physico-chimiques
		Identification des paramètres caractéristiques pour l'analyse de la provenance de l'eau et des effets de mélange dans les eaux souterraines
2.7	S H	Investigations géophysiques 1D (VES - vertical electrical sounding, diagraphies)

		Détermination de la distribution verticale des conductivités hydrauliques pour l'identification des horizons aquifères, respectivement peu perméables.
2.8	H L	Flowmeter
		Détermination de la direction des écoulements verticaux dans un forage ainsi que de leurs débits, et détermination du profil de perméabilités.

Type de données 2D Invariant dans le temps		
3.1	H F L	Jaugeages
		Quantification de l'écoulement pour distinguer les tronçons de cours d'eau à exfiltration de ceux à infiltration, respectivement déterminer le débit des sources.
3.2	H P F L	Débit de captage ou débit de source
		Volume prélevé et volume écoulé pour le bilan hydrique
3.3	P	Essais d'infiltration
		Détermination des taux d'infiltration réels pour quantifier la recharge pluviale
3.4	F	Mesure du gradient hydraulique dans le lit du cours d'eau
		Mesure directe des gradients verticaux entre le cours d'eau et la nappe souterraine sous-jacente
3.5	P	Humidité du sol
		Identification du déplacement de l'eau dans les sols non-saturés pour déterminer l'infiltration potentielle
3.6	H P F L	Paramètres physico-chimiques
		Identification des paramètres caractéristiques pour l'analyse de la provenance de l'eau et des effets de mélange dans les eaux souterraines
3.7	H F L	Essais hydrauliques (essais de pompage, essais d'injection-relaxation, etc.)
		Détermination des paramètres hydrauliques tels que la transmissivité, le débit spécifique et les limites hydrauliques
3.8	T	Cartes topographiques / MNT
		Base de calcul pour les bassins d'alimentation superficiels
3.9	S	Cartographie géologique
		Informations stratigraphiques et structurales permettant de déterminer les limites et barrières lithologiques
3.10	S H	Cartographie hydrogéologique
		Représentation spatiale des types d'aquifères, conductivités hydrauliques, directions d'écoulement et isohypses des eaux souterraines
3.11	S	Profils géologiques
		Visualisation de la succession des couches et accidents géologiques en profils pour identifier les formations potentiellement aquifères et leur géométrie.
3.12	S	Investigations géophysiques 2D
		Représentation à grande échelle des structures géologiques pour une meilleure caractérisation du système, topographie des horizons peu perméables.
3.13	S H	Images satellite
		Application de méthode de télédétection pour l'identification des types d'utilisation du sol, des indicateurs (végétation, humidité du sol, etc.) et des structures morphologiques

3.14	P	Cartes des sols
		Déduction du potentiel d'évaporation et d'infiltration pour déterminer l'apport pluvial
3.15	H P F L	Essai de traçage
		Injection de traceurs pour déterminer l'appartenance d'un point donné (injection) au système étudié et indiquer la vitesse d'écoulement, la dispersion et le temps de séjour
3.16	S	Pendage des couches
		Direction et orientation de l'inclinaison d'une surface de couche géologique
3.17	H F L	Analyse des champs d'écoulement (cartes piézométriques)
		Évaluation de cartes à grande échelle représentant les niveaux moyens des nappes phréatiques pour identifier les directions d'écoulement régionales

Type de données 2D Transitoire		
4.1	H P F L	Bilan hydrique
		Bilan des composantes de recharge et d'écoulement pour la validation du modèle conceptuel
4.2	H P F L	Modèle numérique 2D
		Simulation stationnaire ou transitoire des processus d'écoulement et de transport
4.3	P	Apports par fuites
		Prise en compte des apports provenant de canalisations non étanches en tant que composante anthropique de la recharge des eaux souterraines
4.4	P	Drainage
		Analyse des écoulements évacués par les systèmes de drainage dans les zones agricoles afin d'estimer l'alimentation pluviale réduite
4.5	P	Irrigation
		Quantification de l'apport d'eau supplémentaire provenant de l'irrigation agricole en vue du bilan des contributions pluviales d'origine anthropique
4.6	P	Soil Moisture Monitoring (capteurs d'humidité du sol)
		Mesure de l'humidité des sols pour évaluer le déplacement de l'eau dans les sols non saturés et déterminer l'infiltration potentielle
4.7	F	Profils de température de la section transversale du cours d'eau
		Mesure des gradients de température verticaux dans le lit du cours d'eau pour identifier les remontées (upwelling) ou les plongées (downwelling) d'eau souterraine
4.8	F	Mesure différentielle du débit (amont-aval)
		Détermination de la perte ou du gain net par comparaison des débits mesurés sur un intervalle défini
4.9	H F L	Analyse régionale des champs d'écoulement (cartes piézométriques)
		Évaluation de cartes à grande échelle représentant les niveaux des nappes phréatiques pour identifier les directions d'écoulement régionales

Type de données 3D Invariant dans le temps		
5.1	S H	GeoMol



		Modèle géologique 3D du bassin de molasse suisse et son outil de visualisation
5.2	S H	Modèles géologiques 3D
		Représentation spatiale des structures géologiques complexes pour délimiter le système

Type de données 3D Transitoire		
6.1	H P F L	Essai de traçage
		Détection directe des chemins d'écoulement et détermination de la vitesse d'écoulement, de la dispersion et du temps de séjour
6.2	H P F L	Modélisations numériques transitoires 3D
		Modélisation des processus d'écoulement et d'alimentation variables dans le temps
6.3	P F L	Analyse de l'incertitude / analyse de la sensibilité
		Évaluation des effets de paramètres d'entrée imprécis sur les résultats des modèles ou des bilans à des fins d'aide à la décision