

Proposition d'une grille d'évaluation des résultats des traçages en milieu karstique (au moyen de traceurs fluorescents)



Paul-Henri Mondain⁽¹⁾, Philippe Muet⁽²⁾

⁽¹⁾ CALLIGEE – BP 82118 – 1 rue de la Noë – 44321 Nantes cedex 3 –
ph.modain@calligee.fr

⁽²⁾ GINGER Environnement et Infrastructures – BP 885 – 117 route de Nexon – 87016
Limoges Cedex – p.muet@gingergroupe.com

Résumé

Le traçage artificiel des eaux souterraines est une méthode rapide et pratique de reconnaissance des écoulements souterrains. Les traçages sont de plus en plus utilisés à la fois pour délimiter les aires d'alimentation de points d'eaux, captés ou non, et pour simuler des pollutions. Pour ce qui est de la simple reconnaissance des écoulements souterrains la compilation de données anciennes et, malheureusement, la valorisation de données récentes montrent que les résultats de traçages peuvent conduire à des interprétations hâtives voire à des incohérences hydrogéologiques.

C'est pour cette raison que dans les années 1990, Michel Lepiller avait commencé à réfléchir à une grille d'évaluation des résultats de traçages.

L'objet de cette note est de présenter la grille de Michel Lepiller et de reprendre la réflexion là où il l'avait laissée pour aboutir à deux grilles d'évaluation de la fiabilité des traçages : une pour les traçages à résultat positif, l'autre pour les traçages à résultat négatif. Une note allant de 0 à 10 par ordre de fiabilité croissante est alors attribuée à chaque traçage en fonction des techniques mises en œuvre pour étayer le résultat du traçage.

L'intérêt de cette cotation est de pouvoir évaluer, pour chaque expérience, la fiabilité statistique du résultat par rapport à la méthode de détection des traceurs employée. Ces grilles peuvent être utilisées a posteriori pour reprendre des interprétations hydrogéologiques et inciter ainsi l'hydrogéologue à éliminer les expériences peu fiables pour les rééditer à nouveau en ayant recours à des méthodes de détection plus fiables. Elles peuvent également servir à choisir la fiabilité d'une expérience avant de la réaliser, en connaissant les risques d'erreur que l'on prend sur les résultats positifs et négatifs.

Le principal enseignement de cet exercice est qu'il est impératif de demander les moyens de détection utilisés sur les fiches destinées à dresser un inventaire des traçages. De plus, il faut toujours donner le protocole de suivi des restitutions de traçage lorsque que l'on fait une publication.



L'important n'est pas automatiquement que le résultat soit fiable mais que l'on sache s'il ne l'est pas à 100%.

I. INTRODUCTION

I.1. Utilisation des traçages

Le traçage est une technique employée de longue date en hydrogéologie. Les premières « colorations » des eaux souterraines remontent en effet à la fin du 19^{ème} siècle. Les premiers essais relatés ont été réalisés par le Professeur Knop en 1869 pour mettre en évidence des pertes du Danube entre Immendingen et Tuttlingen en Allemagne (1). La coloration française la plus célèbre reste celle réalisée en 1931 par N. CASTERET au « Trou du Toro » qui a démontré que la Garonne prenait sa source en Espagne dans le massif de la Maladetta (2).

Cette technique a été initiée par les spéléologues. Son objectif principal était de mettre en évidence les relations hydrauliques existant entre un point de perte d'un écoulement de surface, ou bien l'extrémité aval d'une rivière souterraine reconnue en spéléologie, et une ou plusieurs sources localisées à la périphérie du massif karstique étudié. Sa finalité était avant-tout, de guider les spéléologues dans leur prospection de nouvelles cavités qui permettent de poursuivre la reconnaissance d'un réseau spéléologique.

Dès le début du XX^{ième} siècle, certains géologues officiels ont recours à cette technique pour mettre en évidence des problèmes d'hygiène publique. Fournier a notamment fait de nombreuses colorations pour démontrer de quelle façon étaient alimentées les fontaines publiques des villages du Doubs et attirer l'attention des Maires sur les rejets d'eau usées qui risquaient de contaminer ces fontaines (3).

A cette époque, le traceur employé était le plus souvent des colorants (fluorescéine principalement) et la détection du traceur se faisait uniquement de façon visuelle par observation de la coloration des sources surveillées. Cela supposait que les observateurs soient présents au bon moment, lorsque le traceur était restitué à la source, et que le traceur ressorte à une concentration suffisante pour que sa coloration spécifique soit perceptible sans équivoque.

De nos jours, parallèlement à cette activité de coloration spéléologique, les traçages sont devenus un outil de premier ordre pour permettre à l'hydrogéologue de définir des périmètres de protection autour des captages d'alimentation en eau potable.

Dans le domaine des aquifères karstiques, on peut reconnaître aux traçages deux principales utilisations :

- **les traçages de reconnaissance** (ou exploratoires) dont la finalité est de reconnaître des circulations souterraines dans le but généralement de déterminer les limites du bassin d'alimentation d'une source captée. Cette approche reste comparable à celle des spéléologues.
- **les traçages de simulation** dont la finalité est de simuler une pollution entre un point potentiel de contamination de l'aquifère et la source captée. et/ou de calculer une restitution d'un éventuel polluant.

Dans les deux cas la fiabilité des résultats doit être primordiale :

- si l'expérience de traçage est positive et conclut à une restitution, il convient de s'assurer que les moyens de détection du traceur utilisés permettent d'affirmer sans ambiguïté que le signal observé au point de restitution est bien dû à la présence du traceur (4) ;
- si l'expérience de traçage est négative et conclut à une absence de restitution, il convient alors de se demander si la période de surveillance de la restitution et la fréquence des échantillonnages étaient bien adaptées, ou bien si la technique de détection était appropriée pour détecter de faibles concentrations de traceur à l'exutoire. Ces questions se posent encore avec plus d'acuité si le traceur injecté n'a été retrouvé sur aucun des exutoires surveillés.

I.2. Rappel des notions de base des traçages

Un **traçage artificiel** consiste à introduire dans le sous-sol un traceur, puis à rechercher cette même substance en un ou plusieurs points d'émergence des eaux souterraines. Le **traceur** est défini comme étant une substance facilement détectable et peu dégradable dans le milieu souterrain, qui est transportée par l'eau et susceptible de représenter son transit.

Notion de système karstique : le système karstique est défini comme étant « un ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains s'organisent pour constituer une unité de drainage » (5, 6, 7 et 8). A l'image d'un bassin versant de surface, le système karstique correspond à l'impluvium au niveau duquel les écoulements souterrains s'organisent en une unité de drainage aboutissant à un nombre réduit d'exutoires.

Notion de système traçage : le système traçage n'est représentatif uniquement que de la zone effectivement parcourue par le traceur entre le point d'injection et le point de restitution. C'est donc un sous-ensemble du système karstique (9). Les résultats d'un traçage ne seront donc représentatifs que de la partie du système karstique dont les écoulements ont été concernés par le transit du traceur injecté. En aucune manière, ils peuvent être extrapolés à l'ensemble des écoulements parcourant le système karstique.

Interprétation des traçages : les données d'un traçage ne permettent pas uniquement d'obtenir une information sur l'existence ou non d'une relation entre deux points, mais permettent également en cas de restitution avérée d'acquérir des informations sur la structure du système traçage et les modalités de transit du traceur, susceptible de simuler un polluant, en son sein. L'interprétation des traçages repose sur l'étude des modalités de transfert de la masse de traceur injectée, laquelle est appréhendée au moyen de l'analyse de la courbe des flux massiques observée à l'exutoire, appelée aussi courbe de distribution des temps de séjour lorsque celle-ci est normée par rapport à la masse de traceur restituée (10, 11, 12).

Le système traçage est alors assimilé à un système scalaire dont la fonction d'entrée est la courbe de flux massique du traceur injecté et la fonction de sortie la courbe de flux massique du traceur restitué à l'exutoire. Le plus souvent la durée de l'injection du traceur peut être considérée comme négligeable et, de ce fait, la courbe des flux de traceur à l'exutoire représente une image de la réponse impulsionnelle du système traçage étudié. Ainsi toute restitution de traceur, doit donner lieu à une courbe de restitution parfaitement structurée (fig 1).

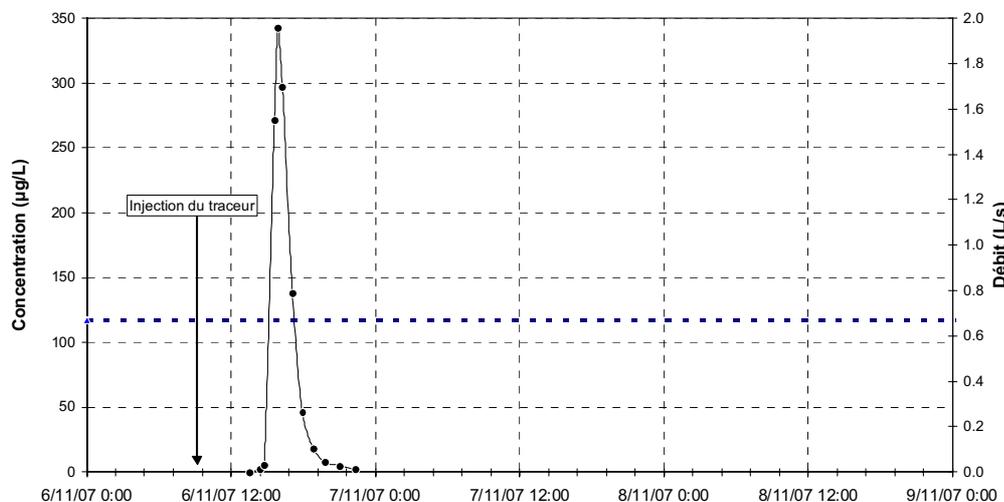


Figure 1 : Exemple de restitution structurée

A l'opposé toute courbe de restitution présentant une restitution aléatoire ou limitée à un ou deux points isolés devra être considérée comme suspecte, et d'autant plus que les teneurs en traceur mesurées à l'exutoire sont faibles.

Lorsque les débits à l'exutoire sont connus, il est important d'effectuer un calcul de bilan de restitution. Il permet d'apprécier pleinement la valeur du résultat obtenu. Lorsque celui-ci est élevé, il est fort probable que la totalité injectée ne concerne que l'exutoire sur lequel la restitution a été constatée. Si celui-ci est faible, d'autres sorties à d'autres exutoires peuvent être suspectées, ou, à défaut, les raisons de cette faible restitution doivent être recherchées. En revanche, si le bilan est excédentaire et qu'il n'y a pas de doute sur la fiabilité des débits de l'exutoire, de fortes suspicions pèsent sur la validité du signal interprété comme étant une restitution de traceur.

Quels que soient les résultats analytiques d'un traçage, ceux-ci n'échappent pas en dernier ressort à la signification hydrogéologique qui en découle. Le résultat obtenu est-il cohérent avec la compréhension des écoulements souterrains que l'on peut se faire sur le secteur étudié ?

I.3. Spécificité des traceurs fluorescents

Un certain nombre de substances fluorescentes aisément disponibles dans le commerce répondent aux différents critères d'un bon traceur en milieu souterrain (13), à savoir : bonne stabilité chimique, faible tendance à l'adsorption, forte solubilité dans l'eau, seuil de détection bas, détection assez aisée, toxicité nulle pour l'homme et les milieux aquatiques et coût d'achat modéré. Ainsi de faibles quantités de traceurs (quelques kg) suffisent généralement pour obtenir des signaux de restitution après plusieurs kilomètres de transit souterrain. Tous ces éléments font que les traceurs fluorescents ont été et sont encore les traceurs les plus communément utilisés en hydrogéologie karstique.

Les techniques de détection des traceurs fluorescents ont évolué au cours du temps :

Détection visuelle : celle-ci est sans équivoque lorsque la coloration au point de restitution est intense, mais elle peut prêter à confusion lorsque la coloration est faible. En effet une coloration naturelle de l'eau peut alors être interprétée comme une restitution. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'une coloration verte qui peut être attribuée à de la fluorescéine.

Fluocapteurs : les traceurs fluorescents sont supposés s'adsorber sur du charbon actif en grain (CAG) immergé dans l'exutoire surveillé. Le traceur fluorescent est ensuite désorbé dans une solution alcoolique de potasse à 10% (14). La restitution est alors appréciée à partir de la coloration visuelle de l'éluat, ou bien après son passage dans un fluorimètre, ou bien un spectrofluorimètre. Il convient de rester très prudent sur les résultats ainsi obtenus. En effet, l'absence de signal ne veut pas dire pour autant absence de restitution : si tous les sites d'adsorption du CGA sont saturés au moment où le traceur est restitué, le traceur ne sera pas piégé sur le fluocapteur. A contrario, une coloration verte non vérifiée par spectrofluorimétrie ne veut pas dire nécessairement restitution de traceur, il peut entre autre s'agir de chlorophylle.

Fluorimètres de terrain : l'utilisation de ces appareils est de plus en plus répandue. D'un usage facile, ces appareils permettent d'obtenir un signal de fluorescence dans une gamme de longueur d'onde donnée. Toutefois il convient de s'assurer que le signal mesuré correspond bien à celui du traceur injecté et qu'il ne provient pas d'un signal parasite venant interférer sur la mesure (diffusion de matières en suspension, matières organiques dissoutes...). De plus ces appareils ont une gamme de mesure peu étendue d'où un risque de saturation en cas de concentration élevée en traceur, et leur seuil de détection reste assez élevé ce qui peut poser problème en cas de faibles concentrations en traceur. Aussi pour un bon diagnostic du résultat, est-il indispensable des pouvoir doser en parallèle quelques échantillons au laboratoire.

Prélèvements réguliers et Analyse spectrofluorimétriques : le recours à des préleveurs automatiques a considérablement allégé la charge de surveillance de la restitution d'un traçage. Les échantillons collectés sont ensuite dosés à l'aide d'un spectrofluorimètre en laboratoire. Si l'on se contente d'une simple analyse, on risque de rencontrer aussi l'écueil d'interférence de signal. Mais il est alors possible de réaliser sur quelques échantillons pour lesquels des doutes analytiques subsistent des spectres d'émission et d'excitation pour s'assurer que l'on retrouve bien des pics aux longueurs d'ondes caractéristiques du traceur recherché (3, 15). Les dosages spectrofluorimétriques associés à la réalisation de spectres constituent la méthode la plus fiable de détection d'un traceur fluorescent.

Ces dosages analytiques associés à des spectres deviennent de plus en plus nécessaires pour étayer un diagnostic de résultat de traçage dans la mesure où les utilisateurs utilisent fréquemment de faibles quantités de traceur afin de rester sous le seuil de détection visuelle en cas de restitution sur un exutoire capté pour l'alimentation en eau potable, ceci dans un souci de ne pas perturber la distribution d'eau.

On retiendra que le résultat positif d'un traçage dépendra à la fois :

- de la quantité de traceur injectée dont découlera l'intensité du signal détecté en sortie du système traçage ;
- de la fenêtre d'observation retenue pour suivre la restitution et de la fréquence d'échantillonnage pour les mesures (ou les observations visuelles) ;
- de la méthode utilisée pour détecter la restitution du traceur.

Parallèlement le résultat négatif d'un traçage pourra avoir diverses origines :

- une quantité de traceur injectée trop faible conduisant à des teneurs en traceur sous le seuil de détection analytique ;
- une période d'observation trop courte par rapport à la durée réelle de transit du traceur au sein du système traçage ;
- une méthode de détection peu fiable
- une absence de surveillance du lieu sur lequel la restitution s'est réellement produite

II. POURQUOI UNE GRILLE D'EVALUATION

Le grand nombre de colorations et de traçages réalisés a débouché sur la réalisation d'inventaires, de bases de données ou d'atlas pour une région donnée (Franche Comté ; Rhône-Alpes, Alpes-Maritimes, cartes hydrogéologiques dans diverses régions de France).

Dans l'avenir, ces bases de données pourraient se développer sur internet et être une source importante de données de base pour de nombreuses études comme la définition des aires d'alimentation des captages (Loi sur l'eau de 2006), ou exploitée en vue d'aménagements futurs ou pour la rédaction de documents d'incidence.

La plupart du temps, ces inventaires accordent la même valeur à toutes les expériences de traçages. Hors, les méthodologies employées pour obtenir les résultats sont très différentes et parfois peu fiables.

L'examen des documents existants montre des incohérences hydrogéologiques ou soulèvent des interrogations pour lesquelles il serait bien de pouvoir évaluer la fiabilité de l'expérience de traçage réalisée (fig. 2).

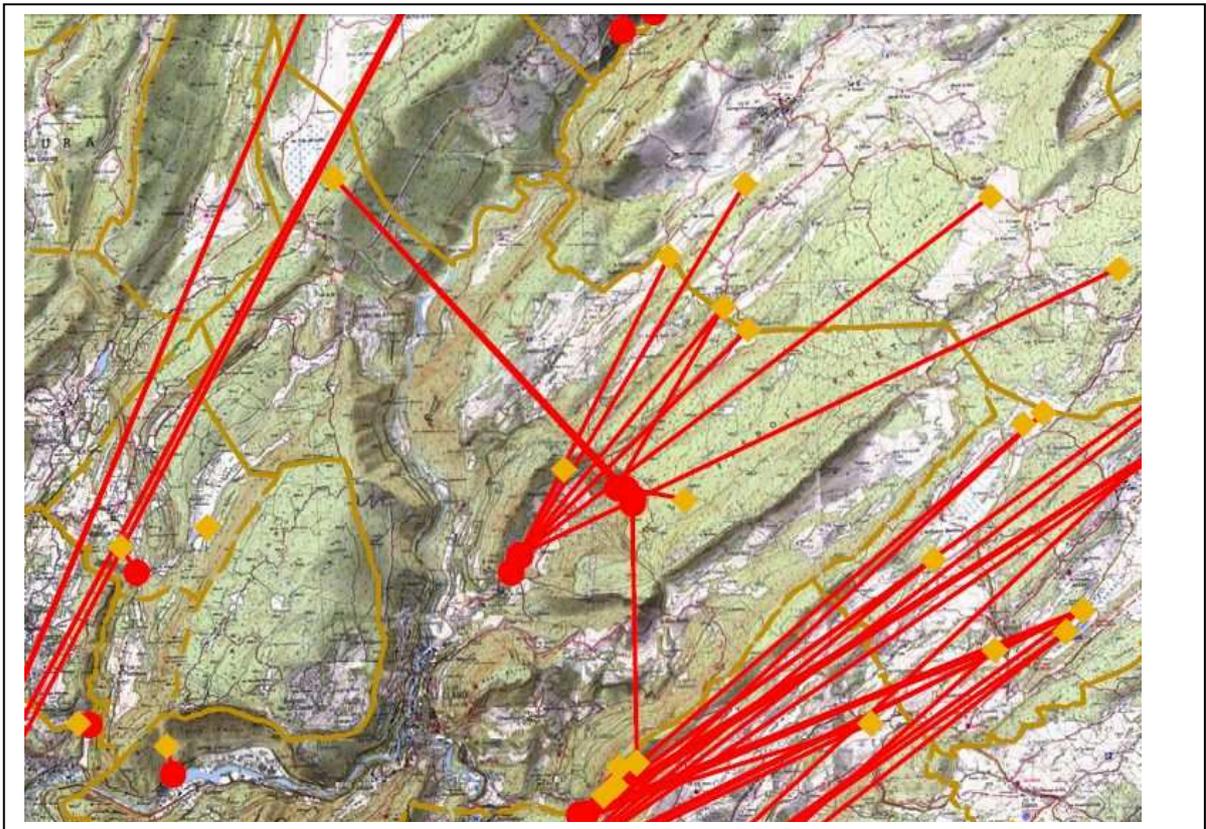


Figure 2 : Extrait de l'inventaire des traçages du département du Jura – Région de Saint Claude (16). On remarque que les structures de drainage sont généralement nord-est sud-est conformément aux structures géologiques locales. Quelques traçages traversent la totalité de ces structures et même la vallée de la Bienne.

Interrogations portant sur :

- la restitution systématique à tous les exutoires suivis,
- les croisements d'écoulements souterrains dans la même formation (fig n°2),
- les vitesses apparentes très élevées malgré des conditions hydrologiques de basses eaux,
- les expériences récentes contredisant des résultats anciens,

Parfois des traçages dont les résultats sont peu fiables amènent à des conclusions hâtives voire, dans certain cas à des théories compliquées sur l'hydrogéologie d'un secteur ou sur le fonctionnement particulier d'un type d'aquifère karstique. Par exemple en Normandie, il est commun qu'une crue sur une émergence qui draine la craie soit associée à une forte turbidité. Le pic de turbidité génère alors un signal parasite qui interfère sur le signal de fluorescence du traceur. En l'absence de contrôle analytique en laboratoire, il peut alors être interprété comme une restitution (fig. 3).

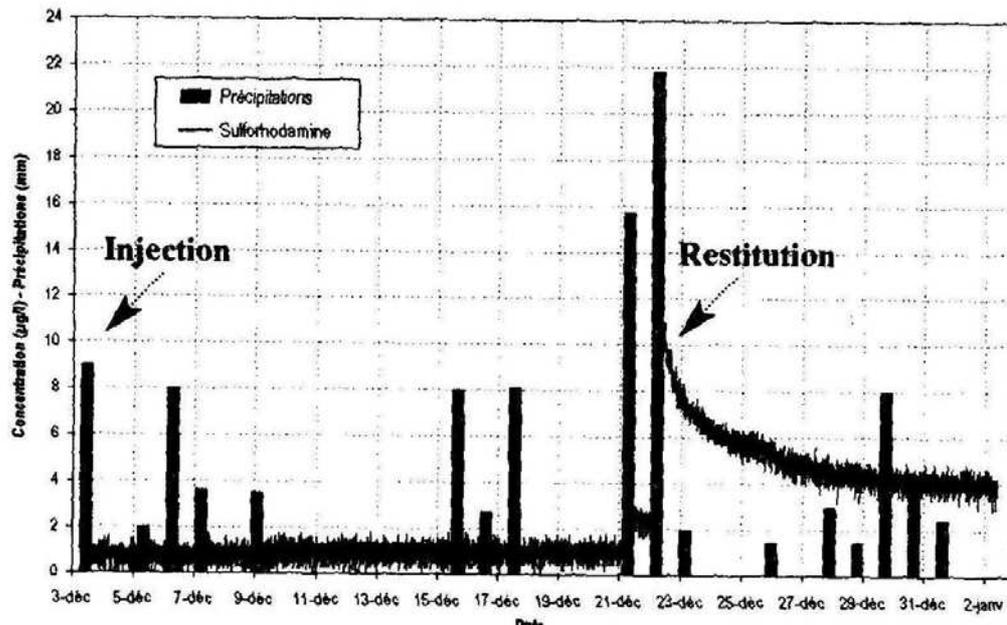


Figure 3 : Exemple de restitution douteuse donnée par un fluorimètre enregistreur de terrain sans contrôle par analyse spectrofluorimétrique. (17)

Malheureusement, ces exemples sont nombreux dans la littérature et sans une grille d'évaluation des résultats des traçages, ces résultats douteux peuvent nuire à la compréhension hydrogéologique des circulations souterraines.

III. GRILLE D'ÉVALUATION PROPOSÉE PAR MICHEL LEPILLER

Dans les années 80, à l'initiative de la Fédération Française de Spéléologie, un inventaire des traçages avait été entrepris dans la région Rhône-Alpes. A cette occasion Michel Lepiller avait été contacté pour les travaux qu'il conduisait dans les Bauges et dans les Bornes. Il avait alors remarqué que les fiches d'inventaire à remplir ne comportaient aucune indication sur les divers critères qui pouvaient permettre *a posteriori* d'évaluer la pertinence des expériences de traçages consignées. Tous les résultats de traçages contenus dans cet inventaire étaient à prendre « pour argent comptant » alors que certains d'entre eux n'étaient pas sans poser quelques problèmes d'interprétation hydrogéologique.

Dans le souci de pallier à cette lacune, Michel Lepiller avait commencé à réfléchir à cette question et nous avait proposé, il y a une dizaine d'années un « projet d'échelle de cotation du degré de fiabilité des résultats d'un traçage de circulation souterraine ».

Degré	Critère
0	Examen visuel seul de l'éluat d'un fluocapteur
1	Examen de l'éluat d'un fluocapteur au fluorimètre avec référence à l'éluat d'un fluocapteur témoin
2	Examen de l'éluat d'un fluocapteur au spectrofluorimètre avec réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
3	Présomption d'une restitution fondée sur l'examen visuel de l'exutoire ayant permis de remarquer une variation de couleur de l'eau compatible avec la restitution du traceur utilisé
4	Examen d'un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs au fluorimètre permettant de fonder une présomption de restitution du traceur sur le tracé d'une courbe de concentration
5	Examen d'un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs au spectrofluorimètre permettant de fonder une présomption de restitution du traceur sur le tracé d'une courbe de concentration, avec réalisation de spectres d'excitation et d'émission
6	Examen d'un échantillon d'eau isolé ou unique (échantillon composé) au spectrofluorimètre comprenant le tracé des spectres d'excitation et d'émission ou un balayage synchrone
7	Examen d'échantillons d'eau en nombre suffisant pour construire une courbe de concentration du traceur et comprenant le tracé des spectres d'excitation d'émission ou un balayage synchrone

Tableau 1 : *Projet d'échelle de cotation du degré de fiabilité des résultats d'un traçage de circulation souterraine (Michel Lepiller – Inédit)*

Un des points importants de ce projet d'échelle de cotation est le faible degré de fiabilité accordé par Michel Lepiller aux résultats obtenus à l'aide de fluocapteurs.

Toutefois, ce projet d'échelle de cotation allant de 0 à 7 devait être amélioré. Nous avons convenu que cette échelle devait aller jusqu'à 10 et que d'autres cas devaient être introduits comme par exemple l'emploi de fluorimètres enregistreurs de terrain qui sont aujourd'hui de plus en plus utilisés pour obtenir des résultats en temps réel.

IV. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE GRILLE D'EVALUATION

IV. Principe généraux d'élaboration de la grille

La cotation attribuée à un traçage doit être considérée comme un indice de fiabilité au sens statistique du terme. Une note faible donnée à un traçage ne veut pas dire que le résultat est faux, mais plutôt dire que statistiquement pour un échantillon de traçages réalisé dans des conditions similaires seul un certain pourcentage des expériences fournit une information correcte telle qu'elle aurait pu être vérifiée avec la méthode de détection la plus fiable.

L'objet n'est pas de rejeter en bloc les expériences de traçages réalisées avec peu de moyens mais plutôt de leur donner un indice de fiabilité statistique compte-tenu des moyens de détection employés.

La cotation proposée varie de 0 à 10 :

- Zéro veut dire que l'information fournie par 100% des expériences réalisées dans ces conditions n'apportent aucune information fiable sur le transit souterrain,
- Dix veut dire que la totalité (100%) des traçages réalisés avec cette méthode de détection apporte une information fiable sur les écoulements souterrains.

Dans cette cotation, et compte-tenu des méthodes actuelles de détection, nous avons retenu pour méthode fiable à 100%, les traçages réalisés avec un nombre suffisant d'analyses spectrofluorimétriques en laboratoire, avec vérification de la nature du produit fluorescent par réalisation de spectres d'excitation et d'émission, permettant de décrire de façon satisfaisante une courbe de restitution structurée et, lorsque que c'est possible, confirmée par un bilan de restitution du traceur cohérent.

Ainsi une note de 3 signifie que sur 10 traçages réalisés dans des conditions similaires 7 peuvent apporter une information erronée et 3 seulement auraient pu être confirmées par des analyses de spectrofluorimétrie complètes en laboratoire.

Cette cotation reste une appréciation subjective basée sur notre expérience et découle de nombreuses discussions que nous avons eues avec d'autres hydrogéologues travaillant sur le karst dont Michel Lepiller. Elle ne repose pas sur une étude purement statistique d'expériences réalisées, faute de pouvoir vérifier *a posteriori*, pour toutes les expériences, leur fiabilité réelle.

Nous avons choisi de nous en tenir aux traçages fournissant un résultat binaire : le traceur a atteint cette source (résultat positif) ou le traçage n'a pas atteint cette source (résultat négatif). En effet, ce type de traçage est le plus courant et surtout la fiabilité de ce résultat conditionne la justesse des cartes et atlas hydrogéologiques publiés.

L'utilisation des fluocapteurs dont le principe rend plus que douteux les résultats négatifs, nous a conduit à proposer deux grilles d'évaluation : une grille pour les traçages dont le résultat est positif et une grille pour les traçages dont le résultat est négatif.

Pour les traçages négatifs et pour simplifier, nous avons pris les hypothèses suivantes :

- la quantité injectée est suffisante pour obtenir un résultat positif si la méthode fiable à 100% avait été utilisée,
- le temps de suivi de la restitution est suffisant pour obtenir un résultat positif si la méthode fiable à 100% avait été utilisée,

Ces grilles ont été élaborées en utilisant, pour chaque technique de détection, un organigramme. Ces organigrammes sont proposés à la fin de cette note. Ils peuvent être utilisés pour automatiser la cotation des expériences de traçage et introduire, par exemple, un code de couleur sur les cartes et atlas hydrogéologiques ou, associer les traçages par note de fiabilité sur des couches SIG.

Dans un souci de cohérence avec la grille de cotation proposée par Michel Lepiller, nous avons regroupé les cas présentant la même note, comprise entre 0 et 10.

Enfin, comme Michel Lepiller, nous nous sommes restreints aux traçages réalisés avec des traceurs fluorescents.

Grille d'évaluation des traçages positifs

Degré	Critères
10	- Fluorimètre de terrain et/ou échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en Laboratoire montrant une restitution structurée du traceur prouvée par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
9	- Observation visuelle par plusieurs observateurs et à plusieurs reprises d'une coloration intense au point de restitution - Echantillons avec analyses spectro fluorimétriques en Laboratoire montrant une restitution structurée du traceur non prouvée par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission. - Fluorimètre de terrain montrant une restitution structurée du traceur avec une seule analyse spectro fluorimétriques en Laboratoire avec réalisation d'un spectre d'excitation et d'émission.
8	- Observation visuelle d'une coloration intense au point de restitution par un observateur et à plusieurs reprises ou par plusieurs observateurs une seule fois. - Restitution structurée obtenue par un fluorimètre de terrain complété par plusieurs analyses en Laboratoire non prouvées par des spectres ou par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés avec analyse en laboratoire et spectres
7	- Observation visuelle une seule fois d'une coloration intense au point de restitution par un seul observateur. - Restitution structurée obtenue par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs non colorés avec analyse en laboratoire et prouvée par spectres
6	- Observation visuelle à plusieurs reprises par plusieurs observateurs d'une coloration faible mais présentant une variation structurée.
5	- Observation visuelle à plusieurs reprises par un seul observateur d'une coloration faible mais présentant une variation structurée - Restitution structurée obtenue par un fluorimètre de terrain sans analyses en Laboratoire ou par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés avec analyse en laboratoire et non prouvée par spectres
4	- Observation visuelle à plusieurs reprises par plusieurs observateurs d'une coloration faible ne présentant pas de variations structurées - Restitution structurée obtenue par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs non colorés avec analyse en laboratoire et non prouvée par spectres
3	- Observation visuelle à plusieurs reprises par un seul observateur d'une coloration faible ne présentant pas de variations structurées. - Restitution non structurée obtenue sur un ou plusieurs éluats de fluocapteurs avec analyses en laboratoire et prouvée par spectres - Variation structurée de la coloration de plusieurs éluats de fluocapteurs sans analyses en laboratoire - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain et/ou d'analyses d'échantillons en laboratoire et prouvée par spectres
2	- Observation visuelle à une seule reprise par plusieurs observateurs d'une coloration faible - Restitution non structurée observée à l'aide d'analyses d'échantillons en laboratoire non prouvée par spectres sur éluats de fluocapteurs - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain et/ou d'analyses d'échantillons en laboratoire et non prouvée par spectres
1	- Observation visuelle à une seule reprise par un seul observateur d'une coloration faible - Restitution non structurée observée visuellement sur des éluats de fluocapteurs colorés. - Restitution non structurée obtenue sur des éluats de fluocapteurs non colorés par analyse en laboratoire non prouvée par spectres - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain sans contrôle par analyse en laboratoire
0	- Aucune information concernant les modalités de réalisation du traçage

Tableau 2 : Grille d'évaluation de la fiabilité des résultats de traçages – résultats positifs

Grille d'évaluation des traçages négatifs

Degré	Critères
10	- un nombre suffisant d'échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire montrant une absence de restitution du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission
9	- Fluorimètre de terrain et échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire montrant une absence de restitution du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
8	- un nombre suffisant d'échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire présentant quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission
7	- Fluorimètre de terrain et échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire présentant quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
6	- Fluorimètre de terrain avec une analyses spectro fluorimétriques en laboratoire prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
5	- Résultat négatifs en laboratoire prouvée par spectres sur un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés ou non, - Résultat négatifs obtenu avec un fluorimètre de terrain sans contrôle par analyse en laboratoire
4	- Eluats de fluocapteurs présentant après analyse en laboratoire sans spectres quelques valeurs positives non structurées du traceur ou pas de valeurs positives.
3	- plusieurs éluats de fluocapteurs présentant après analyse en laboratoire quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée par la réalisation de spectres.
2	- plusieurs éluats de fluocapteurs non colorés présentant après analyse en laboratoire quelques valeurs positives non structurées du traceur sans réalisation de spectres - un seul éluat de fluocapteur coloré ou non, négatif après analyse en laboratoire avec spectres.
1	- plusieurs éluats de fluocapteurs non colorés sans analyse de contrôle en laboratoire - un seul éluat de fluocapteur coloré ou non, négatif après analyse en laboratoire sans spectres.
0	- Absence de coloration visuelle constatée à une ou plusieurs reprises par un ou plusieurs observateurs - un seul éluat de fluocapteur non coloré sans analyse de contrôle en laboratoire, - un seul échantillon avec une analyse spectro fluorimétrique en laboratoire prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission - Aucune information concernant les modalités de réalisation du traçage

Tableau 3 : Grille d'évaluation de la fiabilité des résultats de traçages – résultats négatifs

V. COMMENTAIRES

Comme dans la grille de Michel Lepiller, les résultats obtenus à l'aide de fluocapteurs obtiennent des notes faibles sauf dans le cas où il y a un grand nombre d'éluats de fluocapteurs analysés par spectrofluorimétrie. On peut d'ailleurs remarquer que dans ce cas, si l'on doit relever de nombreux fluocapteurs, il vaut mieux réaliser des prélèvements et les analyser par spectrofluorimétrie, la fiabilité sera bien meilleure.

On peut également remarquer que pour les traçages réputés négatifs, la note obtenue par les fluocapteurs ne peut pas dépasser 5. En effet, on ne peut jamais savoir si le charbon actif n'a pas été saturé par d'autres molécules que celles du traceur.

Dans cette grille nous attirons également l'attention sur la modeste fiabilité des résultats de traçages positifs ou négatifs obtenus par les seules données issues d'un fluorimètre enregistreur de terrain. En effet, il existe dans la nature des molécules qui émettent des intensités lumineuses parfois importantes à la longueur d'onde d'excitation du traceur. C'est en particulier le cas en période de crue (fig n°3) et pour certains traceurs fluorescents. Dans ces conditions, si le signal n'est pas très fort, il y a obligation de réaliser des analyses en laboratoire avec vérification de la nature du traceur à l'aide spectres d'excitation et d'émission pour obtenir une note maximale.

L'observation visuelle reste une méthode fiable pour les résultats positifs à condition de réaliser plusieurs observations et de pouvoir décrire une variation de couleur (9). Toutefois, cette méthode n'est pas fiable pour les résultats négatifs puisque le traceur peut passer à des concentrations inférieures au seuil de détection visuel. Comme pour les fluocapteurs, si l'on doit observer régulièrement des exutoires le mieux est de faire des prélèvements et de les analyser en laboratoire avec vérification de la présence du traceur par réalisation de spectres.

Dans ces grilles, nous n'avons pas tenu compte de tous les cas où il peut y avoir cumul des méthodes de détection. Toutefois, il nous semble que la seule méthode fiable dans tous les cas pour les traçages positifs et négatifs est de réaliser des analyses avec réalisation de spectres sur un nombre suffisant d'échantillons

Nous avons choisi volontairement de ne pas retenir comme critère de fiabilité, le bilan de restitution du traceur car d'une part tous les exutoires ne se prêtent pas à des mesures de débit, et d'autre part, lorsque c'est possible, leur débit n'est que très rarement mesuré à l'occasion du traçage. Nous recommandons toutefois vivement de mesurer le débit des sources surveillées lors d'un traçage.

VI. CONCLUSIONS

Ces grilles sont des propositions qui peuvent bien évidemment être adaptées et améliorées. Elles devront automatiquement l'être avec l'évolution probable des méthodes et techniques de détection.

Le principal enseignement de l'exercice est qu'il est absolument nécessaire de donner les conditions exactes de suivi de restitution d'un traçage pour que l'on puisse lui appliquer une cotation de fiabilité. En fait, peu importe la méthode utilisée, à partir du moment où l'on peut retrouver les conditions de réalisation qui permettent d'en connaître la fiabilité. Cette remarque n'est valable que pour les traçages à venir. Pour ces mêmes traçages on peut également utiliser ces grilles à l'envers et choisir la fiabilité du traçage que l'on veut réaliser.

De la même façon ces grilles peuvent être utilisées par un maître d'ouvrage pour comparer la fiabilité d'opérations de traçages proposées par différents bureaux d'études.

En revanche pour les traçages anciens, l'exercice sera souvent plus délicat car les formulaires disponibles dans les inventaires ont beaucoup de champs pour décrire les résultats du traçage (point d'injection, de restitution, temps...) et le plus souvent très peu, voire aucun, champ permettant de décrire les conditions de suivi des restitutions qui ont abouti à attribuer un résultat positif ou négatif.

Références bibliographiques

- (1) **Kass W.**, 1998 – Tracing Technique in Géohydrology. *Taylor & Francis*. 585 p.
- (2) **Casteret N.**, 1961 - Ma vie souterraine. Mémoires d'un spéléologue. *Ed. Flammarion* : 151-156.
- (3) **Fournier M.**, 1919 – Gouffres, grottes, cours d'eau souterrains, résurgences etc..., du département du Doubs. Essai statistique. *Imp. Jacques et Demontrond, Besançon*. 303 p.
- (4) **Lepiller M.**, 2001 - Traçages appliqués à la dynamique des aquifères : possibilités et limites. *Géologues*, 129 : 79-84.
- (5) **Mangin A.**, 1974 – La notion de système karstique. *Spélunca Mém.*, 8 : 65-68.
- (6) **Mangin A.**, 1975 – Contribution à l'hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat, *in Ann. Spéol.*, 29,3 : 283-332 ; 29,4 : 495-601 ; 30,1 : 21-124.
- (7) **Mangin A.**, 1976 – Les systèmes karstiques et leur méthodologie d'investigation. Actes 2nd Coll. Hydrol. Pays Calcaire, *in Ann. Sc. Univ. Besançon*, 25 : 263-273.
- (8) **Bakalowicz M., Mangin A.**, 1980 – L'aquifère Karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mém. h. sér. Soc. géol. France*, 11 : 71-79.
- (9) **Lepiller M., Mondain P-H.**, 1986 – Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en œuvre et interprétation. *Hydrogéologie*, 1 : 33-52.
- (10) **Guizerix J., Margarita R.**, 1976 – Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masse. *La Houille Blanche*, 3/4 : 205-221.
- (11) **Molinari J.**, 1976 – Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages. Actes 2nd Coll. Hydrol. Pays Calcaire, *in Ann. Sc. Univ. Besançon*, 25 : 275-306.
- (12) **Mangin A., Molinari J., Paloc H.**, 1976 – Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. *La Houille Blanche*, 3/4 : 261-267.
- (13) Société Suisse d'Hydrogéologie, Groupe de travail Traçage, 2002 – Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie. Guide pratique. Rapport de l'OFEG, Série Géologie, 3 : 78 p.
- (14) **Lallemand A. et Paloc H.**, 1964 – Possibilités offertes par la méthode de détection au charbon actif pour les expériences de coloration à la fluorescéine – *Spélunca mém.* 4 : 27-40
- (15) **Jozja N.**, 2008 – Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage. Hydrogéologie et Karst aux travers des travaux de Michel Lepiller, *Journées techniques de CFH-AIH, Orléans, 16-17 mai 2008*.
- (16) **Inventaire des traçages du département du Jura – Région de Saint Claude – in Site internet de la DIREN Franche-Comté**
(http://www1.franche.comte.ecologie.gouv.fr/infos_geo/fiches_cartes/EauxSou/TRA39478.PDF)
- (17) **Gombert P.**, 2007 – Proposition of tracing test protocol in karstic chalk - *European Journal of Water Quality – Tome 38 – Fasc. 1-2007 – page 61- 78*

Annexes :

Mode de suivi : visuel						
Coloration	Observateur	Nb observations	int. Color.	variations	Positif	Négatif
Non	→	→	→	→	 	0
Oui	un	une	forte	→	7	
			faible	→	1	
		plusieurs	forte	→	8	
			faible	oui	5	
			non	3	 	
	plusieurs	une	forte	→	8	
			faible	→	2	
		plusieurs	forte	→	9	
			faible	oui	6	
				non	4	

Mode de suivi : Fluocapteur						
Eluat coloré	Nombre	Fluorimétrie	spectres	Restitution	Positif	Négatif
Non	un	non	→	→	 	0
		oui	non	→	2	1
			oui	→	3	2
	plusieurs	non	→	→	 	1
		oui	non	aucune	 	3
				pas structurée	1	2
				structurée	4	
		oui	oui	aucune	 	5
				pas structurée	2	4
				structurée	7	
structurée	 			 		
Oui	un	non	→	→	1	
		oui	non	→	2	1
			oui	→	3	2
	plusieurs	non	→	pas structurée	1	5
			→	structurée	3	
		oui	non	aucune	 	3
				pas structurée	2	3
				structurée	5	
			oui	aucune	 	5
				pas structurée	3	4
structurée	8	5				

Mode de suivi : Echantillons puis analyses au labo (spectrofluorimétrie)							
Intensité à la longueur d'onde	Nombre	spectres	Restitution	-	Positif	Négatif	
non	un	→	→	→	0	0	
	plusieurs	→	→	→	10	10	
oui	un	non	→	→	2	0	
		oui	→	→	3	0	
	plusieurs	non	pas structurée	→	→	2	9
			structurée	→	→	9	10
		oui	aucune	→	→	10	10
			pas structurée	→	→	3	10
structurée	→	→	10	10			

Mode de suivi : Fluorimètre enregistreur de terrain						
Intensité à la longueur d'onde	Nombre dosages spectrofluorimétriques	spectres	Restitution	-	Positif	Négatif
non	→	→	→	→	5	5
oui	aucun	→	pas structurée	→	1	10
			structurée	→	5	10
	un	non	pas structurée	→	2	10
			structurée	→	6	10
	oui	oui	pas structurée	→	3	6
			structurée	→	9	6
	plusieurs	non	pas structurée	→	2	9
			structurée	→	8	10
		oui	aucune	→	10	10
pas structurée			→	4	10	
structurée	→	10	10			