

# Chapitre 3

## Préliminaires à l'intervention géophysique dans l'environnement

Dans les deux chapitres précédents, nous avons rassemblé quelques relations utiles pour faire quelques premières estimations. Faire des estimations quantitatives, c'est ce qui doit venir à l'esprit dès le premier contact avec un site naturel, qu'il s'agisse d'une étude d'environnement ou de tout autre problème d'ailleurs. Avant de se lancer dans une campagne de mesures géophysiques, en effet, il importe de faire le point. Les problèmes d'environnement sont en général posés d'une manière déroutante, on ne sait trop comment initier l'étude scientifique. La tentation est alors trop grande de se précipiter avec sa batterie de techniques habituelles, chacun avec sa méthode préférée, a priori bonne et utile, évidemment bien meilleure que celle des autres... Or, les mesures géophysiques ne sont pas toutes pertinentes dans tous les contextes; elles sont de plus coûteuses en matériel, en heures de travail sur le terrain, et, plus encore, en heures de traitement des données. Il n'existe certes pas de protocole miracle ni de recette à mettre en œuvre systématiquement. Je propose néanmoins dans ce cours une méthodologie, comme annoncée au chapitre 1, méthodologie qui suggère quelques étapes préliminaires à l'intervention sur le terrain avec les techniques géophysiques.

### 3.1 Contours et contexte du problème posé

#### 3.1.1 *Quel est le problème posé?*

Etant donné la nature particulière et les enjeux souvent importants et insoupçonnables dans la plupart des problèmes d'environnement, mis à part les rares cas sereins où on peut se consacrer librement à des recherches fondamentales, il convient de prendre quelques précautions et de mener quelques réflexions avant de s'engager. Bien qu'il s'agisse d'une évidence, n'hésitons pas à répéter qu'il faut, d'abord, bien écouter l'énoncé du problème. La question posée est-elle suffisamment claire? Avons-nous pris note de tous les détails fournis? Quels sont les documents disponibles?

#### 3.1.2 *Premières recherches documentaires*

Une fois que les contours du problème ont été posés par le demandeur, il n'est pas utile de se précipiter sur le terrain, bien au contraire. Il faut être conscient que l'étude d'un site naturel n'est jamais simple et que, pour garantir un minimum de qualité scientifique, des efforts significatifs devront être investis. L'étude d'un site naturel est rarement un dossier qu'on peut bâcler rapidement et il n'existe pas de site facile à comprendre, de site pareil à un autre, de problème banal. Un petit détail peut changer beaucoup de choses, un petit détail qu'il ne faudra pas rater s'il se manifeste. Il faut donc procéder avec méthode, commencer sans précipitation, et d'abord rassembler les cartes topographiques disponibles, et rechercher des cartes géologiques et hydrogéologiques suffisamment précises. Il n'est pas inutile de déjà se renseigner sur la disponibilité d'images aériennes (IGN) et les forages (site internet du BRGM).

Plus important encore, il faut aussi se renseigner sur le contexte de l'étude. Y a-t-il eu des études antérieures sur le site concerné? Un problème d'environnement n'est jamais anodin,

il convient de se renseigner sur les procès en cours et de se demander quel piège peut receler l'étude scientifique demandée. La tentation est trop grande souvent de se laisser embarquer dans une étude dans l'espoir de collecter quelques fonds. Comme déjà évoqué au chapitre 1, l'empressement sera toujours grand de laisser les scientifiques assumer les responsabilités, et de chercher à les manipuler pour obtenir ce résultat...

### 3.2 La première visite sur le terrain

#### 3.2.1 *Prise de contact avec le problème*

La vie réelle est bien différente d'une série télévisée. Il ne s'agit pas de débarquer sur le terrain avec une armée d'assistants vêtus de belles vestes marquées de logos criards, et des véhicules déjà équipés en matériel, prêts à l'action. Bien au contraire, il vaut mieux arriver discrètement, à une ou deux personnes, sans d'autre matériel que ses propres mains. Qu'il s'agisse d'un site de déchets, d'une usine, d'une institution publique, d'un laboratoire médical, le voisinage est constitué de gens sensibles qu'il n'est pas utile d'impressionner ou d'effrayer. Arrivez dans la campagne avec un véhicule immatriculé à Paris, sortez le théodolite ou tout autre engin évocateur, et vous ne manquerez pas d'attirer les riverains ou les associations de défense de la pêche ou la chasse ou n'importe quoi d'autre. Même si vous arrivez avec la ferme détermination de venir aider les gens, il sera très facile d'être mal interprété. Souvent, les problèmes de pollution amènent des drames personnels. Pensez aux enfants contaminés par le plomb, pensez aux morts de Côte d'Ivoire, pensez aux nappes phréatiques empoisonnées... Le scientifique, quelles que soient ses intentions, devra faire preuve de sa bonne foi et, dans tous les cas, pour remplir sa mission, devra mener des investigations sur des domaines privés. Pour obtenir plus tard les permissions nécessaires et le soutien des bonnes volontés, il vaudra mieux avoir donné une bonne impression dès le début. Autrement dit, dans tous les cas, modestie de rigueur et profil bas.

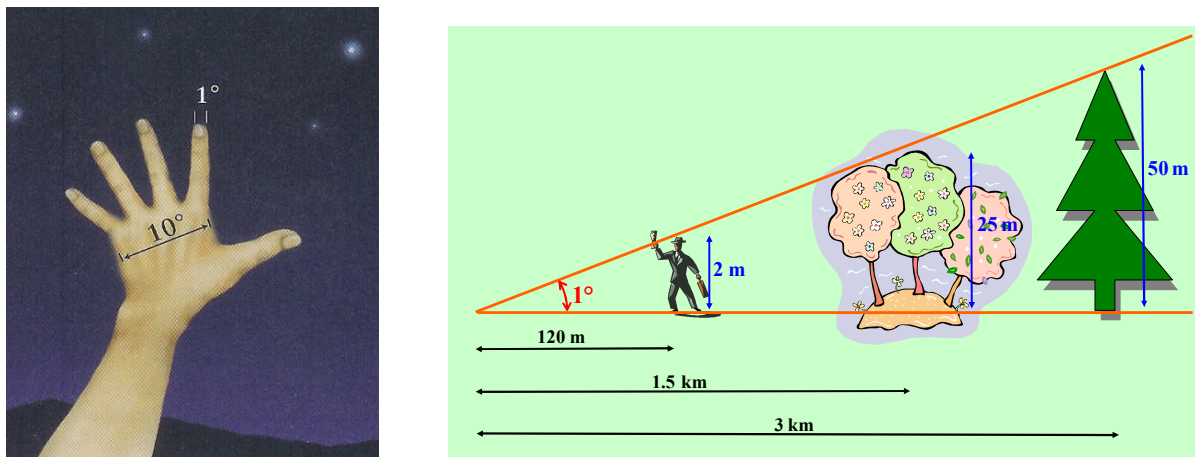
Après avoir pris connaissance du problème avec les personnes et les institutions qui ont fait appel à vos compétences, il faudra, de préférence en leur compagnie, découvrir les principaux lieux concernés. Pour cette prise de contact avec le site, il sera très utile d'être accompagné par une personne connaissant bien la géologie du lieu, de préférence à un géologue généraliste. Cependant, en l'absence de spécialiste, un géologue, qui a l'habitude d'observer le milieu naturel avec minutie, complètera certainement efficacement le regard d'un géophysicien qui n'a pas acquis les mêmes talents et en tout cas pas avec la même acuité. Il sera aussi utile de s'adjoindre le regard d'un naturaliste bien informé en végétation et en biologie générale, surtout en botanique. Souvent, d'ailleurs, le géologue peut remplir ce rôle. On peut en effet faire d'importantes remarques à partir de l'observation de la végétation et des arbres, qui permettent de mettre dès le début le cap dans la bonne direction.

Lors du premier contact, il peut être aussi très utile de noter dans le cahier de terrain, le seul outil dont il est nécessaire de se munir lors de cette première visite, quelques remarques sur la géométrie des installations par rapport au milieu naturel, et quelques observations sur les sols ou les roches à l'affleurement. Il est en général parfaitement inutile à ce stade de faire des prélèvements car on ne sait probablement pas encore ce qu'il est important de prélever et ce qui relève de l'anecdotique. Par contre, si des observations surprenantes viennent à être faites, par exemple sur l'indication de la personne qui fait visiter, alors il est bon de se munir de quelques sacs à échantillons. Même si la tentation est parfois grande de se laisser enthousiasmer, une étude de géophysique de l'environnement n'est pas une enquête policière. Si crime il y a, il est en général caché et sournois, et de toute façon son élucidation relève rarement de l'étude scientifique elle-même dont les objectifs sont en général plus modestes et plus techniques.

### 3.2.2 Dimensionner le contour du système naturel concerné

Après avoir pris connaissance des données et du contexte du problème, il est utile, dès la première visite, de dessiner les contours du système naturel concerné. C'est pour cette raison qu'il est important d'avoir étudié les cartes et de s'être munis de copies sur le cahier de terrain, copies sur lesquelles on va s'efforcer de définir des limites au système concerné et d'identifier les principaux modes de transport en entrée et en sortie du système. Pour une étude de géochimie ou d'épidémiologie, d'ailleurs, on procéderait aussi de cette façon. Si ce n'est pas fait spontanément, alors il faut s'enquérir des cours d'eau, des informations disponibles sur les nappes phréatiques, et se faire remettre les rapports disponibles sur les forages existants ou les stations météorologiques du voisinage.

Pour définir l'extension spatiale du système, il est important de compléter les cartes par des points de repère importants, un bosquet d'arbres, un vallon humide, un ruisseau ou tout autre élément qui pourrait être important au premier ordre. Pour évaluer les distances, il n'est pas utile de sortir des instruments de mesure. Sortir un théodolite alors qu'on n'a pas encore parlé avec les riverains peut amener des réactions violentes dans certaines régions, probablement justifiées par des expropriations, litiges, ou autres déboires passés. Au stade préliminaire, de toute façon, quelques relevés avec l'aide de la main et de ses doigts suffisent largement. Rappelons-nous en effet le petit truc des astronomes: quand la main est relevée au bout du bras tendu, l'ongle couvre une ouverture angulaire de  $1^\circ$  (17 milliradians) tandis que la largeur de la main correspond à environ  $10^\circ$ . Il est d'ailleurs facile de vérifier sa calibration personnelle avec la lune qui a une ouverture angulaire d'un demi-degré. Pour évaluer une distance à partir d'un angle, il suffit de se caler sur quelques repères (Figure 3.1), comme la hauteur d'un homme, d'un arbre moyen (15 à 25 m de hauteur pour un chêne vert, un peuplier ou un érable) ou d'un grand arbre (50 m ou plus pour un épicéa, un hêtre sera en général plus petit, un sapin pourra être parfois plus grand).

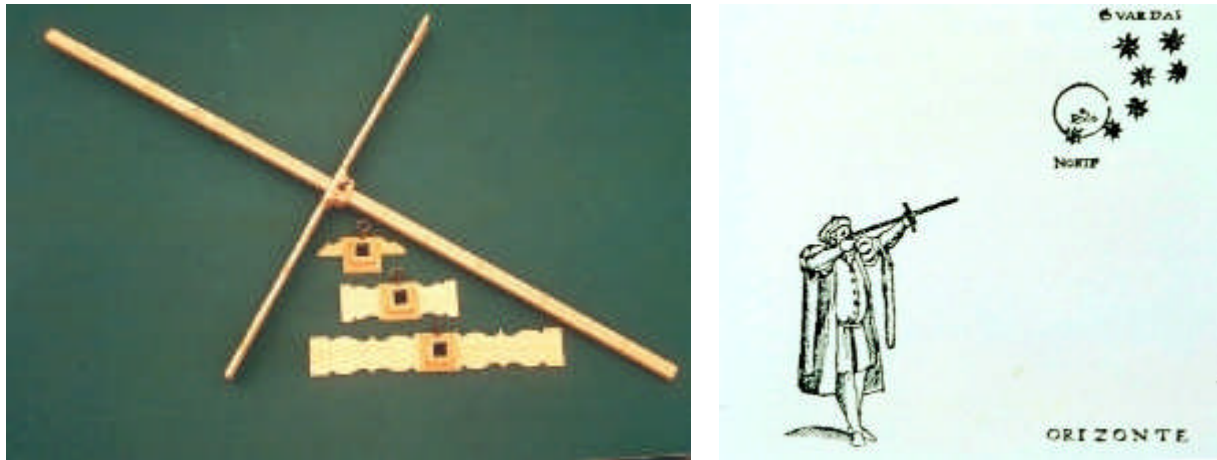


**Figure 3.1.** Eléments de géodésie avec les mains.

Par exemple, si on repère au loin, en bordure d'un cours d'eau, un arbre moyen avec une ouverture angulaire de  $2^\circ$ , alors on peut estimer que la distance entre le point d'observation et la rivière est d'environ 700 m à 800 m. Si une personne est remarquée sur un tumulus avec une ouverture angulaire d'un demi-degré, alors la distance du tumulus est environ 250 m.

Remarquons aussi qu'il est assez facile d'améliorer considérablement la visée "avec les mains" par une mesure d'angle grâce à deux règles graduées, l'une pointant en direction de

l'objet visé, l'autre placée perpendiculairement. L'angle se calcule à partir de la tangente, selon le principe du bâton de Jacob (Figure 3.1b).



**Figure 3.1b.** Le bâton de Jacob (ou arbalétrille).

Une fois qu'un schéma simplifié du système a été réalisé, il n'est pas nécessaire de s'attarder. Si des cours d'eau ou des sources ont été remarqués pendant la visite, il sera utile de recueillir quelques renseignements élémentaires comme leur régime de débit.

### 3.3 Retour au laboratoire: la première réflexion

Une fois le premier contact avec le site effectué, il est encore trop tôt pour ouvrir les armoires et remplir de matériel le coffre de la voiture. Il s'agit en effet de faire le point. Les informations collectées sur le site sont-elles conformes aux attentes? Les données fournies sont-elles suffisantes et acceptables? Il s'agit en effet de tout vérifier. Toute information, tout nombre devra être confirmé. Les problèmes d'environnement donnent lieu à de nombreuses malversations et il convient d'être vigilant. Il pourra être utile de prendre des contacts parmi les institutions publiques ou ses relations personnelles pour collecter des informations complémentaires et effectuer quelques vérifications. Il pourra être utile de noter ses observations subjectives en vrac dès le retour de la visite. Ensuite, il faut commencer une première réflexion à bâtons rompus avec un ou deux collègues, en général face à une feuille ou un tableau blanc.

#### 3.3.1 Reformulation du problème

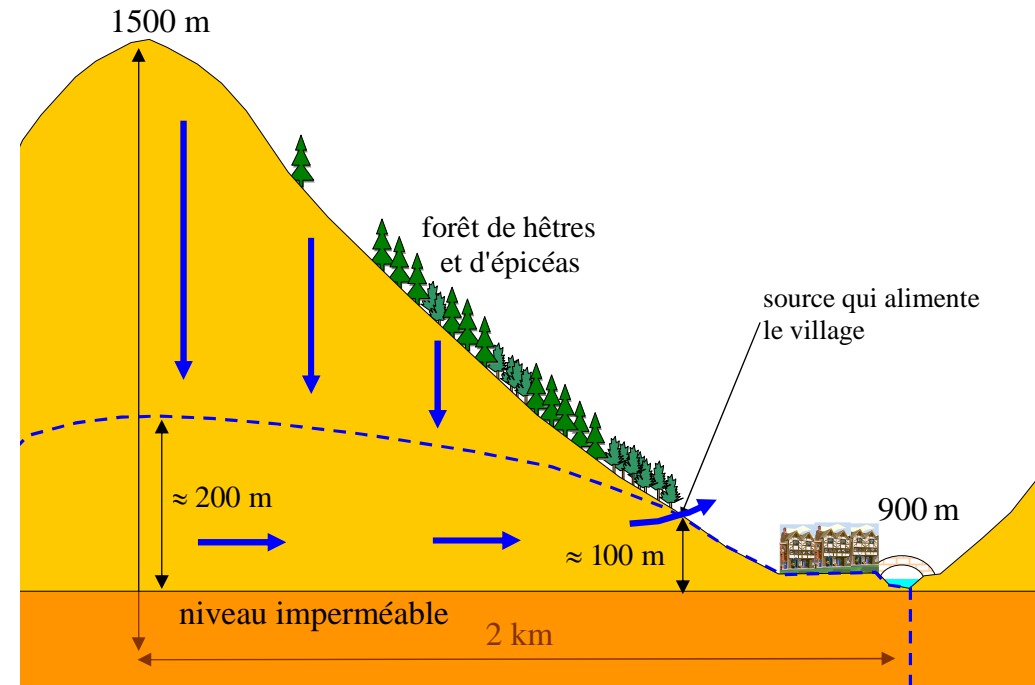
En premier lieu, pour commencer cette réflexion, il est utile de faire la liste des questions posées, éventuellement de suggérer une reformulation du problème si des points de vue différents des points de vue initiaux sont apparus pendant la visite. On pourra commencer par établir d'ailleurs la liste des points qui, pendant la visite, étaient conformes aux attentes, et des points nouveaux, éventuellement les points ayant étonné. On pourra ensuite établir la liste des informations confirmées et la liste des informations demeurant suspectes ou à vérifier. Une fois posé le nouveau contexte de travail, on peut passer à l'étape suivante, l'élaboration de premiers modèles conceptuels.

#### 3.3.2 L'élaboration de modèles conceptuels du site

Il s'agit d'une étape très importante, souvent court-circuitée, et nous allons la décrire ici avec quelque attention. Le but est de proposer différents modèles du site. Ces modèles

peuvent être plus ou moins réalistes, peu importe, il faut essayer de proposer différentes hypothèses.

Considérons par exemple le cas du glissement de terrain introduit au chapitre 1 (Figure 3.2). L'eau est l'agent moteur le plus souvent impliqué dans les glissements de terrain. Il convient donc de réfléchir aux relations possible entre cette zone de pente et les circulations d'eau. Une piste dans le cas considéré est la source située au pied de la zone concernée.



**Figure 3.2.** Un premier modèle conceptuel sur un site de glissement de terrain.

On peut, dans un premier temps, imaginer que le lit de la rivière correspond au niveau imperméable de cette vallée et que la source correspond à l'exutoire principal de cette nappe, et qu'elle survient là où le profil de la nappe recoupe le profil topographique de la pente. Il s'agit d'une première hypothèse, et on peut déjà avancer une variante (Figure 3.3): le niveau imperméable n'est pas le lit de la rivière mais est justement le niveau de cette source. Si les cartes géologiques disponibles ne permettent pas de trancher, ces deux hypothèses sont raisonnables. Il ne faut cependant pas s'arrêter à la simple formulation de ces hypothèses. On peut déjà en évaluer les conséquences. En effet, pour obtenir une nappe libre ayant approximativement la forme considérée, la conductivité hydraulique doit avoir une valeur qu'on peut définir approximativement. On a en effet vu au chapitre 2 que la hauteur maximale de la nappe  $h_{max}$  est liée à la dimension  $L$  du massif, l'infiltration  $a$  et la conductivité hydraulique  $K$  par la relation :

$$h_{max} = \sqrt{\frac{a}{K} \frac{L}{2}} . \quad (3.1)$$

Supposons que la pluviométrie annuelle du lieu soit 1500 mm par an (en se basant par exemple sur la carte de la Figure 2.5), on peut alors estimer l'infiltration à 15 mm par an. Dans le cas du premier modèle (Figure 3.2), on a  $h_{max}=200$  m pour  $L=4000$  m, on a alors :

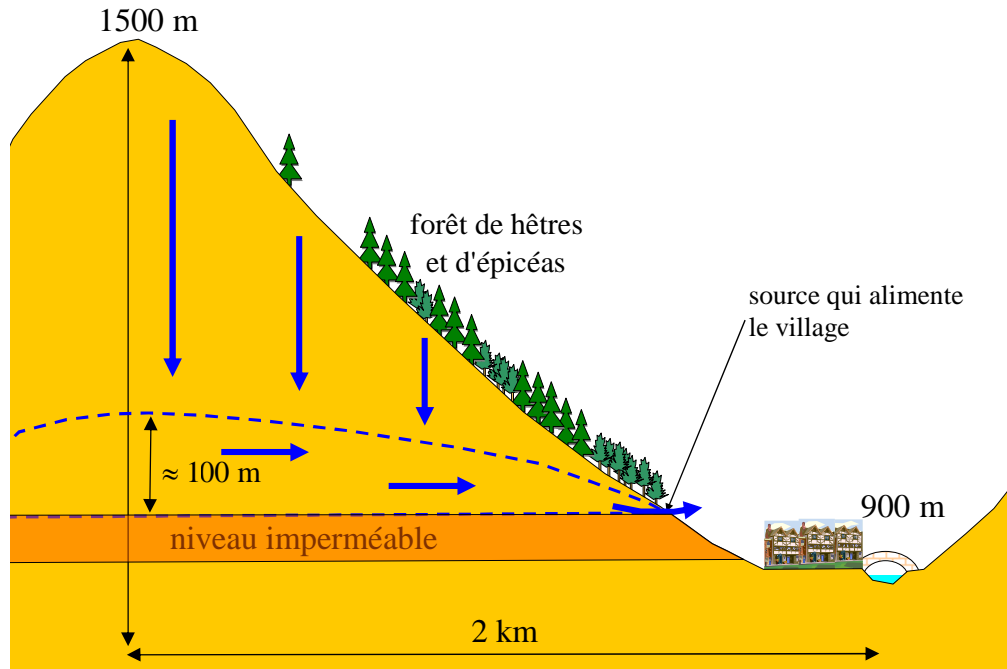
$$K = a \frac{L^2}{4h_{max}^2} = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{16 \times 10^6}{4 \times 4 \times 10^4} = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}, \quad (3.2)$$

qui correspond à une perméabilité de 5 mD.

Dans la seconde hypothèse, on aurait plutôt  $h_{max}=100$  m pour  $L=3000$  m, et par conséquent :

$$K = a \frac{L^2}{4h_{max}^2} = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{9 \times 10^6}{4 \times 10^4} = 11 \times 10^{-8} \text{ m/s}, \quad (3.3)$$

qui correspond à une perméabilité de 11 mD, peu différente de la valeur précédente.



**Figure 3.3.** Un deuxième modèle conceptuel sur le site du glissement de terrain. Le niveau imperméable est cette fois directement sous la source.

On peut aussi imaginer que la nappe libre du massif n'a rien à voir avec cette source (Figure 3.4), et que sa hauteur est en fait petite devant 100 m, inférieure à 20 m. Dans ces conditions, la conductivité hydraulique doit être :

$$K = a \frac{L^2}{4h_{max}^2} = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{16 \times 10^6}{4 \times 4 \times 10^2} = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}, \quad (3.4)$$

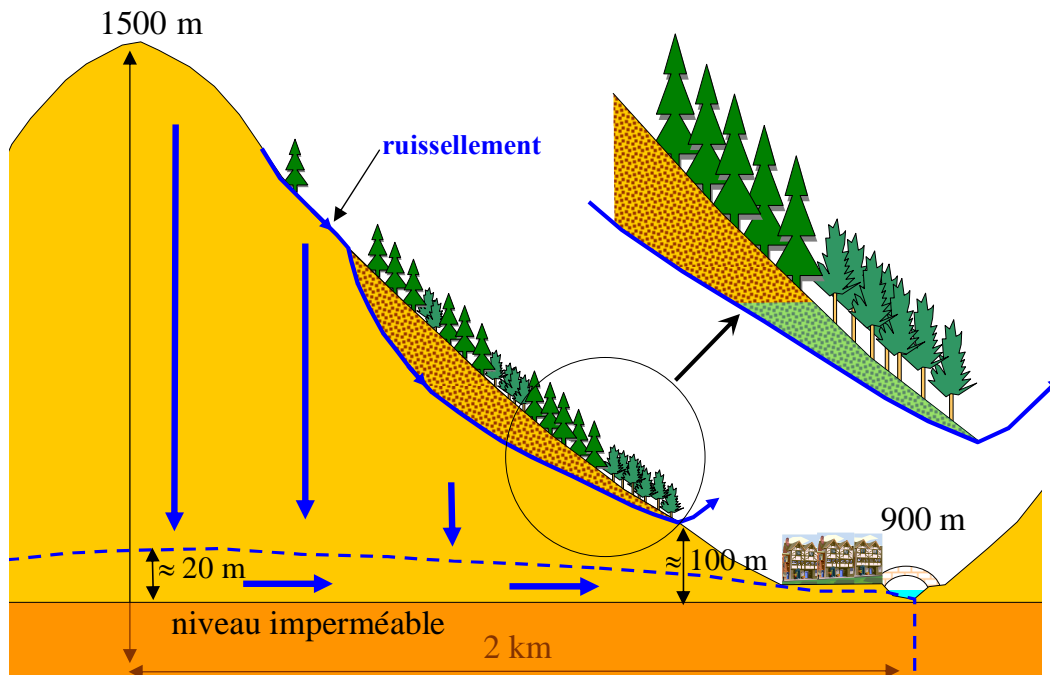
soit une perméabilité de 500 mD, pas nécessairement très vraisemblable pour le type de milieu concerné, mais pas forcément impossible. Des schistes subverticaux peuvent en effet produire des valeurs élevées de la conductivité hydraulique, au moins dans la direction parallèle au plan de schistosité.

Dans cette hypothèse, il faut bien proposer une origine à l'eau de la source, et on peut par exemple imaginer l'existence d'une accumulation d'éboulis de pente, produisant une zone à forte porosité et forte perméabilité. Cette zone peut collecter des eaux de ruissellement provenant du sommet de la montagne. Ces eaux peuvent ressortir rapidement sous le massif d'arbres où la source est observée, ou éventuellement contribuer à une petite nappe dont la source serait l'exutoire. Dans ce scénario, on peut s'attendre à ce que la source possède un débit très sensible aux variations temporelles de la pluviométrie. La source associée à l'exutoire de nappe comme dans les deux modèles précédents sera par contre caractérisée par une plus grande stabilité temporelle, surtout pour les faibles valeurs de perméabilité que nous avons estimées plus haut. La source en sortie de cône d'éboulis pourra aussi être caractérisée par une plus grande variabilité de sa température ou de sa composition chimique. Pour se faire



une idée, il pourra être très utile de venir jeter un œil sur cette source quelques heures après une forte pluie.

On est ainsi amené à proposer deux grands scénarios pour cette source, la sortie de nappe d'une part (Figures 3.2 et 3.3) et la sortie d'éboulis (Figure 3.4), scénarios qui conduisent à des valeurs très différentes de la conductivité hydraulique. Disposons-nous déjà de suffisamment d'informations sur la source pour trancher entre ces scénarios ? Disposons-nous de valeurs de conductivité hydraulique ? Il est clair aussi que ces scénarios, dont on peut déjà imaginer d'autres variantes, ont des conséquences très différentes en termes de risque de glissement de terrain. Se pose aussi directement l'existence d'une zone d'éboulis ou de roches endommagées sous le massif forestier.



**Figure 3.4.** Un troisième modèle conceptuel sur le site du glissement de terrain. Cette fois la source n'est pas liée à la nappe libre du massif mais à des chemins préférentiels de ruissellement sous des éboulis de pente.

Suite au premier contact effectué avec le terrain lors de la première visite, on peut se lancer dans des recherches bibliographiques et se documenter sur des cas similaires dans des conditions proches. A quel glissement de terrain déjà connu le site a pu vous évoquer lors de la première visite (Figure 3.5)? Ces exemples tirés de la bibliographie peuvent aussi suggérer d'autres scénarios précis qu'on peut être amené à retenir aussi dans le cas envisagé.



**Figure 3.5.** A quelle situation votre site ressemble? La zone sur la route près du tunnel du

Mont Blanc (à gauche), l'image du centre ? ou encore la zone du dramatique glissement de terrain de Québec en 1889 (à droite)?

Cette première réflexion et cette première ébauche de modèles conceptuels doivent surtout amener à se poser de nouvelles questions et à suggérer des points à examiner plus précisément. Clairement, il apparaît ici qu'il faut se pencher sur cette source et essayer, si ce n'est déjà fait lors de la première visite, d'obtenir des renseignements sur son débit ou sa variabilité temporelle. On peut d'ailleurs estimer le débit  $Q_1$  s'il s'agit de la sortie d'une nappe libre. Si on a un bassin versant d'environ 500 m de large, alors l'hypothèse précédente sur l'infiltration conduit à une valeur de débit :

$$Q_1 = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times 1600 \times 500 = 0.4 \text{ L/s}, \quad (3.5)$$

Si, par contre, il s'agit de ruissellement, lors d'un fort événement pluvieux, par exemple 100 mm en deux jours, on peut imaginer qu'une proportion importante (50%) de l'eau collectée par le bassin versant (éventuellement de taille plus restreinte, correspondant à la zone de l'éboulis) est transmise à la source dont le débit  $Q_2$  aura une valeur maximale: transitoire :

$$Q_2 = \frac{100 \times 10^{-3}}{2 \times 10^5} \times 500 \times 500 \times 0.5 \cong 60 \text{ L/s}, \quad (3.6)$$

considérablement plus important que  $Q_1$ . On pourra aussi avoir à comparer la source en question avec d'autres sources du voisinage. A-t-on ici une source particulière, associée à cette zone potentiellement particulière, ou cette source appartient-elle à une famille de sources dominant dans la région ? Si la source est simplement une sortie de nappe, on a des chances d'en trouver d'autres avec des caractéristiques très semblables, à la même altitude, dans toute cette vallée. L'examen de la carte topographique peut éventuellement suffire pour répondre à cette question.

Une autre question qui se pose immédiatement est l'existence de cette zone d'éboulis. A-t-on des traces en surface et, si la zone est couverte de végétation, observe-t-on des signes de déformation qui pourraient corroborer les craintes du maire ? Ces signes ne sont pas forcément faciles à déceler et il faudra peut-être se faire assister d'un spécialiste.

L'élaboration de ces premiers modèles conceptuels et la mise en perspective du site avec d'autres sites de référence ou déjà connus, permet de dresser un nouvel inventaire de questions à poser ou d'observations à aller collecter. Cette réflexion permettra aussi ultérieurement de guider le choix des méthodes géophysiques à mettre en œuvre.

L'élaboration de modèles conceptuels n'est pas nécessairement aisée ; il s'agit de proposer des modèles réalistes et testables, et nous pouvons proposer d'autres illustrations. Considérons par exemple le cas de la ville et de l'usine (Figure 3.6), et faisons l'hypothèse que nous disposons maintenant d'une carte géologique détaillée qui confirme en effet le fait que l'usine et la ville sont localisées sur des domaines géologiques différents.

Imaginons d'abord qu'il existe dans toute cette zone une seule nappe libre, avec un niveau imperméable situé assez loin dessous, par exemple à une profondeur de 100 m (Figure 3.6). Les données des forages de l'usine fournissent une contrainte (Figure 1.3), un gradient piézométrique de  $0.5/50=0.01$ , pas négligeable. Or la nappe doit arriver au niveau de la rivière, soit avec une chute de hauteur de 20 m maximum, à 2 km de l'usine. On est alors obligé d'imaginer un changement de lithologie, avec une conductivité hydraulique capable de produire un gradient significatif dans les marnes, et une conductivité hydraulique importante, produisant une nappe approximativement plate dans le calcaire grossier.

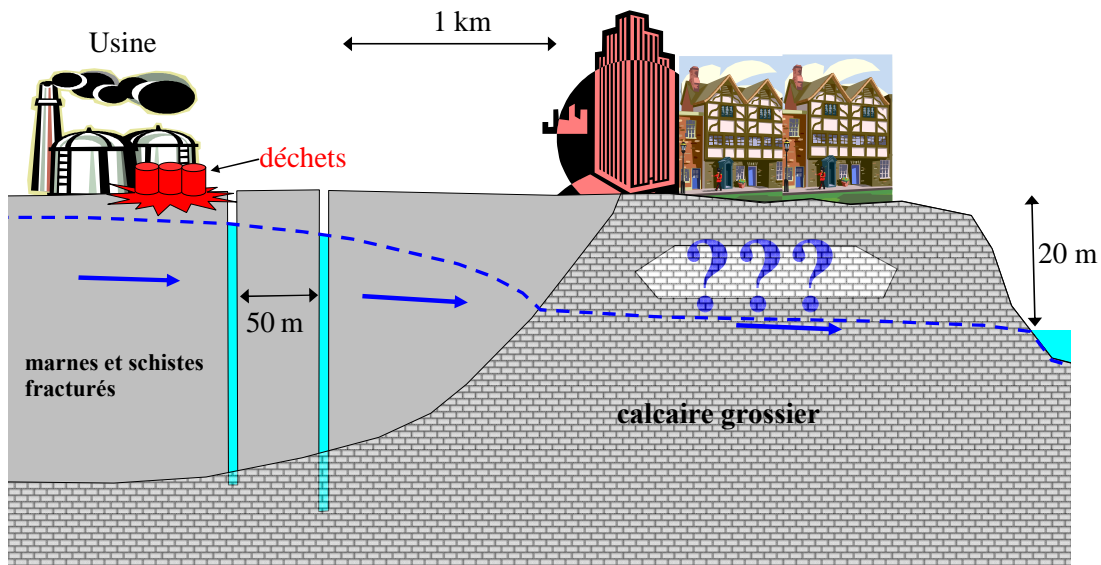
On peut d'ailleurs être plus précis. Si on a dans cette zone une pluviométrie de 600 mm par an (par exemple dans la région parisienne), on aura une infiltration de 6 mm par an



approximativement. Pour obtenir une hauteur maximale de  $120-4=116$  m pour un massif de 1 km de demi-largeur, il faudra une conductivité hydraulique  $K_1$  donnée par (équation 2.42) :

$$K_1 = a \frac{L^2}{4(h_{\max}^2 - h_0^2)} = \frac{6 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{4 \times 10^6}{4 \times (116^2 - 100^2)} = 6 \times 10^{-8} \text{ m/s}, \quad (3.7)$$

qui correspond à une perméabilité de 5 mD. C'est une valeur plutôt petite mais pas impossible pour des marnes et schistes. On remarque que si l'usine dispose de piézomètres, des tests de pompage ont été ou peuvent être effectués. Cette hypothèse est donc parfaitement testable. Ce scénario possède des avantages en regard des problèmes posés. En effet, une faible valeur de perméabilité conduira probablement à des temps de transfert élevés. D'autre part, si la nappe phréatique est stable sous la ville à une profondeur de 20 m, cela pourra d'une part faciliter la recherche de cavités, et d'autre part éviter la possibilité de cavités ennoyées qui pourraient conduire à des formations ou accroissements de vides par dissolution.



**Figure 3.6.** Un premier modèle conceptuel pour l'usine et la ville, reposant sur une seule nappe libre, contrainte par un gradient piézométrique assez important (1 %) sur le site de l'usine.

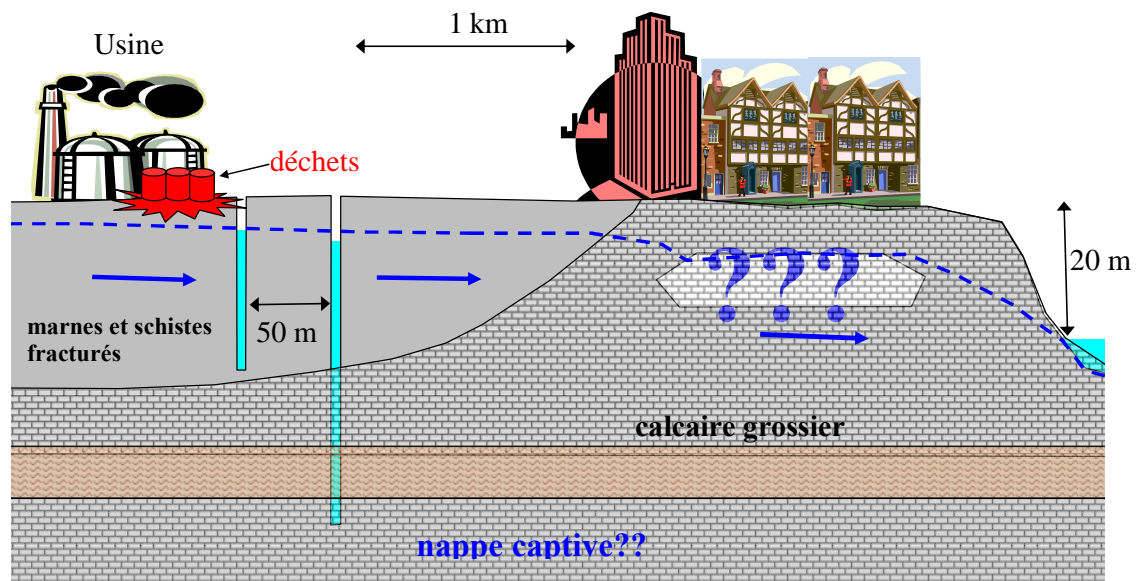
On peut par contre imaginer un scénario différent (Figure 3.7). Imaginons par exemple que les profondeurs des deux forages sont différentes. On peut très bien imaginer que l'un d'entre eux échantillonne une nappe superficielle et l'autre une nappe captive sous-jacente, avec un niveau imperméable à quelque 40 m. Dans cette hypothèse, on n'a plus aucune information sur le gradient piézométrique local, et donc il est tout à fait possible d'imaginer une surface piézométrique haute sur la majeure partie de la zone, avec une belle forme d'ellipsoïde de Dupuit, montrant des gradients seulement sur les bords. Dans cette hypothèse, la nappe phréatique est proche de la surface, quelques mètres, moins de dix mètres peut-être, sous toute la ville. La conductivité hydraulique  $K_2$  peut être estimée grossièrement :

$$K_2 = a \frac{L^2}{4(h_{\max}^2 - h_0^2)} = \frac{6 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{8 \times 10^6}{4 \times (116^2 - 100^2)} = 12 \times 10^{-8} \text{ m/s}, \quad (3.8)$$

assez proche de la valeur précédente.

Une telle configuration cependant complique sérieusement la recherche de cavités, comme on le verra dans le prochain chapitre, et d'autre part peut avoir des conséquences plus graves en cas de cavité calcaire en évolution. Par contre, ces deux hypothèses sont suffisamment différentes pour que, peut-être, des éléments sont déjà aisés à obtenir pour

pointer vers la plus vraisemblable sur ce site. Mais il ne faut pas s'arrêter en si bon chemin, et déjà élaborer d'autres variantes et d'autres scénarios. Ce faisant, comme précédemment, s'enrichit la liste des questions précises à poser et des informations précises à rechercher.



**Figure 3.7.** Un deuxième modèle conceptuel pour l'usine et la ville, reposant sur deux nappes, une nappe libre et une nappe captive ; les deux forages échantillonnant deux nappes indépendantes ne fournissent alors plus d'information sur le gradient piézométrique local à l'usine.

Notons que si une valeur de perméabilité est disponible, par exemple à partir de tests de pompage dans les forages, alors on peut déjà aller plus loin. Imaginons que la valeur annoncée soit 50 mD, peu compatible d'ailleurs avec nos premiers modèles précédents. La vitesse de Darcy pour un gradient hydraulique de 1 % est  $5 \times 10^{-9}$  m/s soit une vitesse moyenne de  $10^{-7}$  m/s dans un milieu de porosité 5 %. On peut alors s'attendre à des propagations de quelques mètres par an d'un contaminant dans la nappe, ce qui est plutôt lent.

Dans certaines situations, comme par exemple le cas du champ sous l'usine en zone de montagne (Figure 1.4), élaborer un modèle conceptuel peut être un exercice plus délicat et plus aléatoire. On peut d'abord essayer d'imaginer un premier modèle où la source est un exutoire de nappe libre. Pour que cette nappe libre recoupe la surface topographique aussi haut, il faudra une valeur de la conductivité hydraulique  $K$  donnée approximativement par :

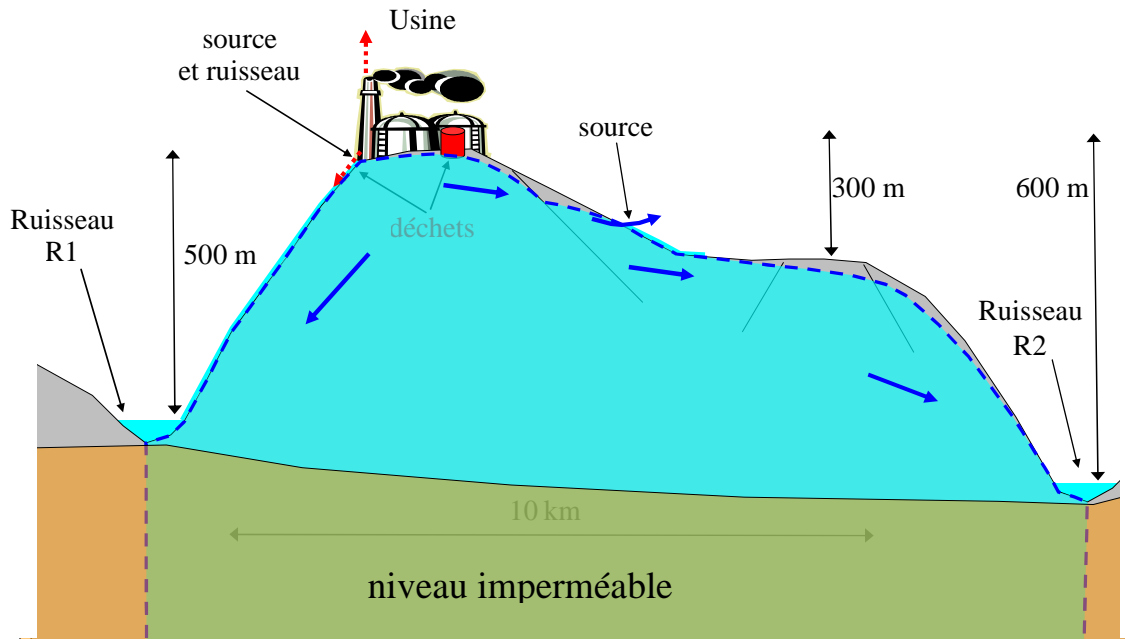
$$K = a \frac{L^2}{4(h_{\max}^2 - h_0^2)} = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{16 \times 10^6}{4 \times (600^2 - 300^2)} = 7 \times 10^{-9} \text{ m/s}, \quad (3.9)$$

soit une perméabilité inférieure au mD. C'est possible mais peu vraisemblable si le massif est fracturé à différentes échelles et géologiquement hétérogène.

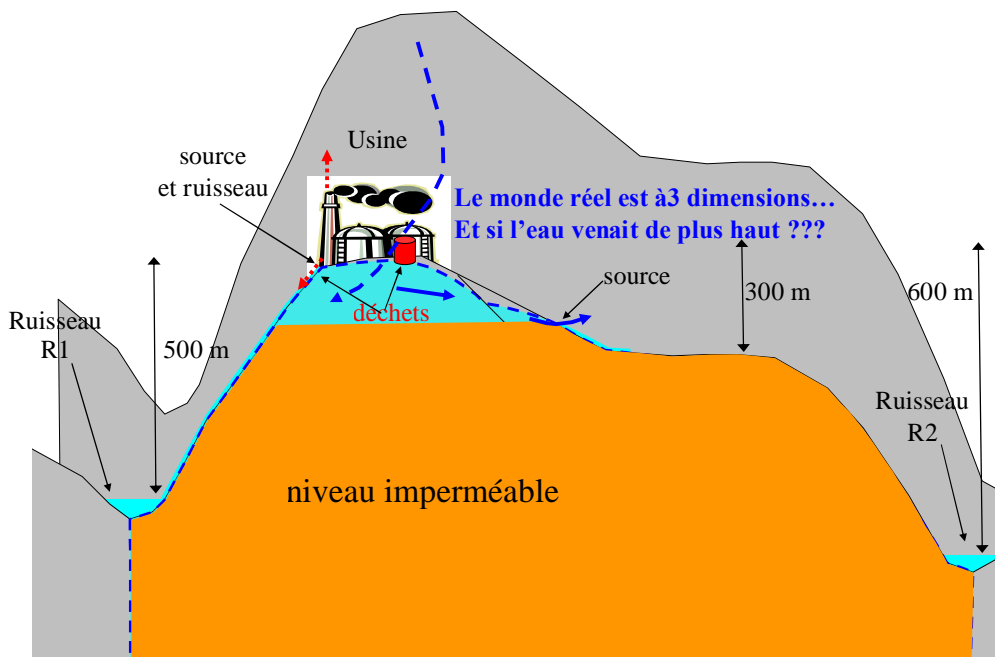
On sera plutôt tenté par une deuxième hypothèse : une source exutoire d'une petite nappe, sortant directement sur le niveau imperméable (Figure 3.9). La conductivité hydraulique compatible avec ce schéma sera alors au moins :

$$K = a \frac{L^2}{4h_{\max}^2} = \frac{15 \times 10^{-3}}{3 \times 10^7} \times \frac{4 \times 10^6}{4 \times 200^2} = 10^{-8} \text{ m/s}, \quad (3.10)$$

mais avec des valeurs plus élevées si on considère que le niveau maximal de la nappe se trouve plus proche du niveau de la source.



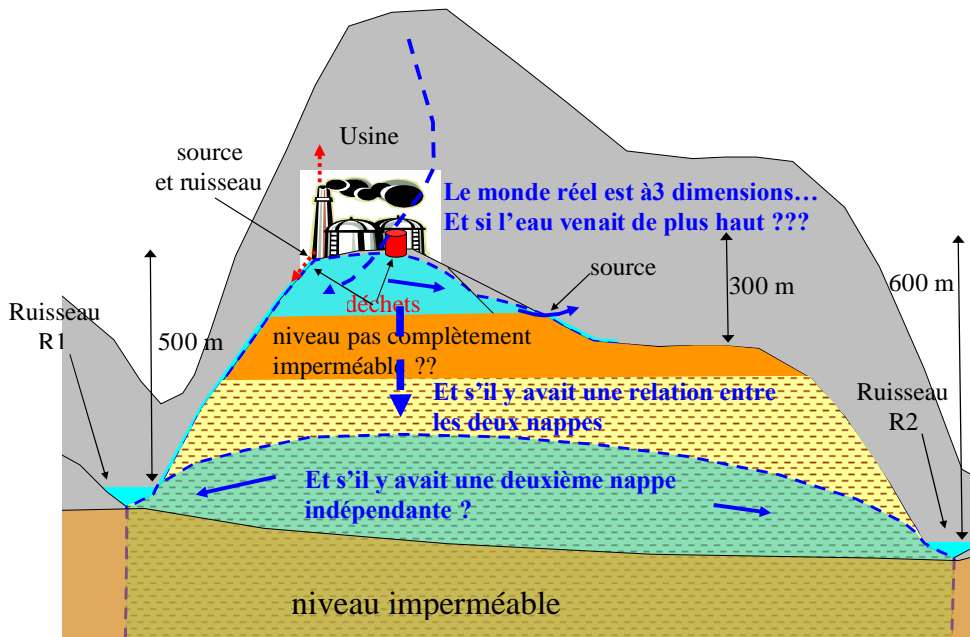
**Figure 3.8.** Un premier modèle conceptuel pour l'usine au dessus du champ. La source qui alimente le champ est-elle compatible avec un exutoire de nappe.



**Figure 3.9.** Un deuxième modèle conceptuel pour l'usine au dessus du champ. Seule la partie supérieure du massif peut abriter une nappe libre. La source qui alimente le champ est-elle compatible avec cette hypothèse ?

Un autre problème à considérer dans tous les cas est le bassin versant de cette source. En effet, si son débit est important, il est peu vraisemblable que l'infiltration dans la nappe suffise à l'alimenter. Il est alors vraisemblable que la coupe montrée cache une forte topographie perpendiculaire à la figure, que cette montagne ne soit que la coupe transversale d'une crête qui provient de plus haute altitude. La source alors draine non pas de simples écoulements dans le plan de la coupe, mais essentiellement des écoulements perpendiculairement à la coupe. Il faut alors regarder la carte de la région et véritablement

étudier le bassin versant de cette source et examiner s'il est compatible avec son débit. Ainsi, il ne faut pas trop vouloir calquer les modèles simples que nous avons appris à manipuler avec les situations réelles, dont la complexité parfois ne peut pas être négligée. Si nous nous trouvons dans le cas d'une situation à forte topographie dans les deux directions horizontales, nos lois d'échelle simples ne conviennent pas et nous ne pouvons plus rien dire sur la valeur de la perméabilité, du moins à ce stade conceptuel. De plus, si les écoulements sont essentiellement perpendiculaires au plan de la figure, les conséquences sur les transports de polluants entre l'usine et le champ sont complètement différentes. En effet, dans cette hypothèse, l'eau de la source ne provient probablement pas des roches ayant circulé sous l'usine.

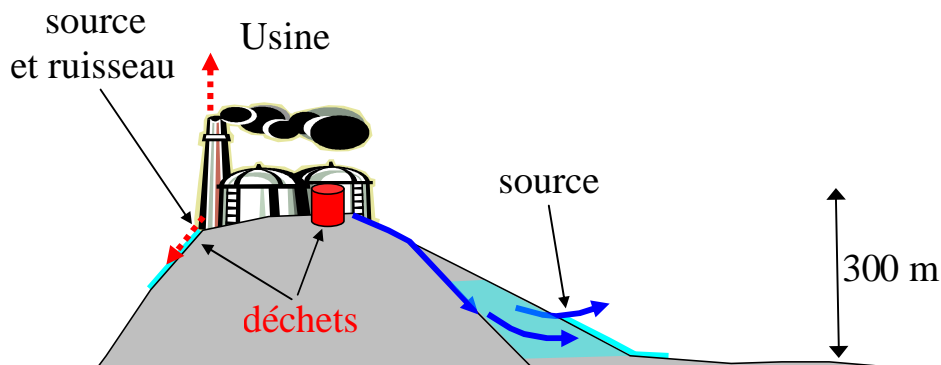


**Figure 3.10.** Un troisième modèle conceptuel pour l'usine au dessus du champ. Seule la partie supérieure du massif peut abriter une nappe libre mais il existe une autre nappe libre dessous, connectée aux deux rivières.

En ce qui concerne le massif lui-même, on peut aussi imaginer qu'il existe une deuxième nappe libre sous le niveau imperméable du sommet, et que c'est cette deuxième nappe qui est liée aux deux rivières (Figure 3.10). On peut même imaginer que le niveau imperméable n'est pas complètement étanche et que, par l'intermédiaire de zones de failles par exemple, l'eau de la nappe supérieure, éventuellement contaminée par l'usine, percole dans la nappe inférieure. Ce scénario n'est pas impossible et n'est pas hors de propos si on s'intéresse à la contamination éventuelle du massif en basse altitude, il est par contre de peu d'intérêt pour le problème originel qui ne concerne que le champ.

Pour le problème du champ, il peut par contre être pertinent d'envisager dès le début de l'étude un scénario différent (Figure 3.11) dans lequel la source ne fait que drainer une petite nappe locale, à travers un massif localement plus poreux et plus fracturé. Cette petite zone de forte perméabilité pourrait servir de conduit de drainage préférentiel pour une partie des eaux de ruissellement en provenance de l'usine. Plus que le régime des nappes phréatiques, c'est plutôt la nature des écoulements et leur dynamique qui va nous concerner. Cette réflexion conduit en tout cas directement à se poser la question des régimes temporels de cette source et la nature du massif entre la source et l'usine, indépendamment de la question de la topographie. Dans un site potentiellement complexe comme celui-ci, il convient de rassembler des informations sur les modèles hydrogéologiques de la région et de ne pas trop

se lancer dans des hypothèses amusantes mais irréalistes et peu testables. Dans un milieu fracturé en présence de forts gradients topographiques, en outre, il n'est pas évident que la notion de nappe ait un sens et il faut élaborer des hypothèses différentes sans trop se limiter à des concepts livresques et trop simples pour décrire la réalité.



**Figure 3.11.** Un troisième modèle conceptuel pour l'usine au dessus du champ. Seule la partie supérieure du massif peut abriter une nappe libre mais il existe une autre nappe libre dessous, connectée aux deux rivières.

Tout en étant conscient des limitations possibles dans certains sites, il est très important de jeter sur le papier les scénarios les plus différents possibles, avant d'être trop conditionné par un travail déjà commencé sur le site. Si on n'imagine pas très tôt des scénarios variés, on risque de se contenter d'une hypothèse de travail unique qui limitera le choix des outils d'investigations. Si on donne vie à des hypothèses différentes, alors on sera plus disposé à les envisager plus tard sérieusement dans l'éventualité où l'hypothèse favorite s'avère ne pas être compatible avec les résultats. Cette réflexion permet aussi souvent d'éliminer rapidement, grâce à de simples estimations d'ordres de grandeur quand ils s'avèrent suffisamment convaincants, des hypothèses qu'il aurait été coûteux et inutile d'analyser sur le terrain.

Cette réflexion issue de l'élaboration de modèles conceptuels permet surtout de se préparer, avec cette fois des idées très précises, à une nouvelle visite sur le terrain.

### 3.4 La deuxième visite sur le terrain

#### 3.4.1 Revoir le site pour se convaincre et envisager de nouvelles pistes

Cette deuxième visite sur le terrain se produit dans un contexte très différent de la première. Les informations disponibles ont été maintenant digérées et on a repéré à l'intérieur du périmètre du système naturel les zones qu'il faut aller regarder de plus près. On a en main plusieurs hypothèses et on a esquissé les moyens de les tester. On sait les questions qu'on veut poser à cet effet et les informations dont on a besoin. Il est donc recommandé de faire cette deuxième visite sans accompagnateur, ou avec un géologue ou spécialiste de ce terrain non lié au problème d'environnement traité. Il sera ainsi facile d'aller librement fureter où bon nous semble.

Il sera alors utile, à ce stade plus mûr, de parler avec les gens du voisinage, de prendre des contacts et de nouer des premières relations qui pourront être utiles quand il faudra aller déployer une instrumentation, parfois lourde et peu discrète, dans des domaines privés. Il faudra à tout prix éviter les fanfaronnades et il ne s'agira pas non plus de poser trop de questions, car c'est rarement bien perçu. Il sera préférable d'écouter, avec la bienveillance mais aussi le silencieux scepticisme de rigueur, les conseils, avis et bavardages, qui parfois comprendront aussi de précieuses informations, surtout venant de personnes familières avec le

terrain comme les pêcheurs, les chasseurs, sans nécessairement prendre pour argent comptant toute affirmation soi-disant basée sur l'expérience de nombreuses années. Comme précédemment, toute information à la portée déterminante pour la compréhension du problème posé devra être soigneusement vérifiée... Mais, d'abord, il faut apprendre à collecter ces informations, et à observer tranquillement l'environnement. Il sera astucieux de rechercher les traces de modifications récentes sur le site comme de la terre retournée, des vestiges de creusement, des traces de camion ou d'engins de chantier.

Observer, il faut prendre son temps de le faire à ce moment là car, une fois lancée la mise en place des dispositifs expérimentaux, il n'y en aura plus guère le loisir. Observer, c'est pourtant crucial, surtout au début. Les meilleurs choix des sites pour déployer des instruments géophysiques ne sont pas nécessairement évidents, et il faut avoir comparé les bénéfices et avantages des différentes options possibles. C'est pour cette raison qu'il n'est toujours pas utile, voire même plutôt déconseillé, de déployer des instruments lors de cette deuxième visite. Quels instruments, d'ailleurs ? On n'a pas encore fait de choix sur la technique à utiliser ! En outre, lors de cette deuxième visite, des modèles conceptuels différents peuvent surgir. Une fois qu'on a commencé cet exercice au laboratoire, il est en général très fructueux de le poursuivre dès le retour sur le terrain ; cela permet d'envisager immédiatement de nouvelles pistes ou d'en fermer d'autres.

#### *3.4.2 Bilan : est-on prêt à se lancer dans l'étude de ce site ?*

Après cette deuxième visite, on dispose d'une vue d'ensemble acceptable sur le site et les problèmes qui s'y posent. On a déjà quelques idées à proposer sur les mécanismes physiques qui y prennent place et on peut commencer à proposer des stratégies en fonction des outils disponibles. C'est le bon moment de se demander si on est vraiment disposé à se lancer dans cette étude. Il ne serait pas raisonnable de le faire plus tôt avant d'avoir recueilli les informations et évalué les problèmes, difficultés et solutions possibles. Mais, maintenant, il faut se poser cette question: oui ou non, faut-il accepter ou refuser ?

Une étude sur un site naturel n'est jamais simple, elle n'est jamais bouclée définitivement en un tournemain. Même en présence de fortes pressions des institutions, et surtout en présence de forts subsides qui peuvent faire tourner la tête en ces temps de détresse économique, il faut froidement et lucidement se poser les questions de base: Est-on capable de produire une bonne analyse scientifique sur ce site ? Avons-nous les moyens, et, surtout, en avons-nous les ressources humaines et le temps ? Souvenons-nous que, dans les sciences de la Terre et de l'environnement, la tendance à la dispersion sur de multiples terrains est une maladie endémique, cause de nombreux échecs, de nombreuses frustrations, et, pire, d'études de médiocre qualité scientifique. Il ne faut pas sous-estimer les enjeux, et, après les deux visites effectuées sur le site, on doit être en mesure de faire une estimation lucide des efforts nécessaires.

Parfois se posera la question plus épineuse, d'ordre éthique, du droit de refuser ou de l'obligation morale d'accepter et d'assumer. Ce sera à chacun de faire face à cette question à sa façon, mais il ne faudra peut-être pas avoir omis de se la poser.

Une fois que le choix de travailler sur le site a été fait, avec des raisons analysées soigneusement, alors c'est le moment de passer en revue les différents outils qui pourront être déployés pour tester les différentes hypothèses possibles, en mettre à jour de nouvelles au cours de l'expérimentation, et tenter de répondre aux questions posées.