

## EXPLORATION ET RECONNAISSANCE

C'est la phase de recueil des données disponibles en géologie, hydrogéologie, hydrogéochimie, climatologie, etc... Sur la base des données existantes, des études complémentaires peuvent être mises en œuvre pour mieux appréhender les caractéristiques d'un contexte donné.

### **1- Cartographie :**

L'utilisation de la cartographie géologique et hydrogéologique permettent d'avoir des informations concernant les caractéristiques (nature et qualité) de l'aquifère et des différentes formations où se trouve. Ces informations sont en particulier :

- l'endroit et l'étendue de l'aquifère
- le type de la nappe (libre, captive, semi captive)
- la structure de l'aquifère (fissures, failles...etc.)
- la structure des limites : toit et substratum
- la liaison et les relations avec les écoulements de surface (cours d'eau, plan d'eau...etc.)

**1-1- Cartes hydrogéologiques :** Les données obtenues par études géologiques et structurales conduisent à la réalisation des cartes et coupes hydrogéologiques. Ces coupes hydrogéologiques sont élaborées par la superposition sur des coupes géologiques, des données de l'écoulement souterrain (la surface piézométrique, la surface d'alimentation directe ou indirecte, le drainage et les pertes en surface et en profondeur).

**1-2- Cartes structurales :** Les cartes structurales dont leur but est de présenter les formations perméables (réservoir), sont élaborées par la synthèse des données géologiques, des conditions aux limites et des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, pente, vitesse, gradient hydraulique). Ce type de cartes permet d'établir la carte isohypse (d'égale altitude), la carte isobathe (d'égale profondeur), et la carte isopaches (d'égale épaisseur de l'aquifère).

**1-3- Cartes piézométriques :** Les cartes piézométriques présentent en un temps donné, la distribution spatiale de la charge hydraulique. Elles sont obtenues par les mesures des niveaux piézométriques. L'analyse de la surface piézométrique vise le tracé des lignes de courant et l'indication sur elles le sens d'écoulement ; dont des courbes fermées traduisent des dômes (sommets) caractérisant des zones d'alimentation, ou bien des dépressions des zones de captage. Pour une section constante d'écoulement, le gradient hydraulique est proportionnel au débit d'écoulement dans la nappe, et inversement proportionnel à la perméabilité de la nappe. Pour une largeur constante de l'aquifère, la variation du gradient hydraulique (piézométrique) est le résultat de la variation de la perméabilité, de l'épaisseur de la nappe ou bien du débit (infiltration par exemple). Des ruptures de la piézométrie peuvent être le résultat de présence d'accidents tectoniques. Des accidents sont souvent associés à des alignements de sources artésiennes. L'analyse des fluctuations temporelles de la piézométrie des nappes libres donne des informations sur la recharge par infiltration, sur la réserve disponible et

sur les niveaux et débits d'étiage des cours d'eau. D'autres cartes sont encore utiles : la carte topographique, la carte hydrologique, la carte pédologique et la carte d'occupation de sol.

**1-4- Photos aériennes :** La photographie aérienne peut fournir des informations qui ne peuvent pas être directement observées sur le terrain ; certaines failles et anciens lits de rivières. Elle forme aussi un moyen efficace pour l'identification et l'analyse des fractures, qui constituent des lignes naturelles d'une taille infra-kilométrique sur la photo aérienne, les traces linéaires dont la largeur dépasse l'ordre de kilomètre sont appelées linéaments ; qui représentent fréquemment des zones de grande perméabilité. Elle indique aussi des informations essentielles pour l'implantation des forages et puits.

**1-5- Télédétection :** Réalisée par des images satellites, elle permet le traitement numérique des images pour mieux systématiser et simplifier le traitement de l'information, et en même temps la reconstitution de documents à des échelles différentes. Elle permet encore l'identification des structures géologiques et des matériaux de surface, l'identification des zones humides (résurgences, affleurements de nappes, zones de recharge), et l'obtention et la mise à jour de l'occupation de sol pour l'évaluation de la vulnérabilité des nappes. La nouvelle génération de satellites qui présente une bonne résolution au sol est formée par : Spot-France, ERS-1-Europe, Landsat-TM-USA, Radarsat-Canada, J-ERS-1-Japon, IRS-1CInde... etc.

## **2- Méthodes géophysiques :**

Les méthodes géophysiques consistent à effectuer depuis la surface du sol, des mesures de paramètres physiques dont l'interprétation permet d'imaginer la nature, la structure et les caractéristiques du sous sol. Les informations recherchées par ces méthodes sont :

- l'épaisseur et la nature du recouvrement                    - la présence et la nature des zones fissurées
- l'existence des fractures                                         - la profondeur du substratum
- la localisation et les caractéristiques de l'aquifère

**2-1- prospection par sismique de réfraction :** Le principe de la sismique de réfraction est qu'un ébranlement à la surface de sol, se propage dans le sol en s'amortissant à la façon d'une onde sonore. La sismique de réfraction consiste à étudier la propagation des ondes élastiques (ondes longitudinales). Leurs temps d'arrivée, mesurés en différents sismographes ou géophones (récepteurs des ondes sonores) disposés le long d'un profil, sont par la suite portées en graphique en fonction des distances de ces géophones Si au point d'explosion E (point d'ébranlement : point d'impact).

**2-2- Prospection électrique :** elle permet d'étudier les variations latérales et verticales de la résistivité apparente du sous sol **pa**. Pour cela, on envoie dans le sol, grâce à des électrodes A et B,

un courant d'intensité I, puis on mesure la différence de potentiel  $\Delta V$ , produit par l'effet d'Ohm, entre deux électrodes de référence M et N (dispositif quadripôle).

**2-3- La Diagraphie :** Elle consiste à utiliser différents dispositifs d'électrodes afin de mesurer des résistivités directement dans le trou de forage. Réaliser juste à la fin de la foration, pour permettre de localiser avec grande précision les zones productrices d'eau, et donc définir la position optimale des crépines.

**2-4- méthodes VLF :** Elles se basent sur la caractéristique suivant : les antennes VLF (very low frequency) sont parcourues par un courant électrique oscillant, de fréquences comprises entre 15 et 30 kHz. (Utilisées à des fins militaires pour les communications longes distances). Les équations de Maxwell stipulent que tout courant électrique oscillant génère une onde électromagnétique. Lorsque le champ électromagnétique primaire recoupe une cible conductrice, ce conducteur crée à son tour un champ électromagnétique dit secondaire ( $H_s$ ), de même fréquence mais déphasé.

Dans la pratique, les discontinuités géologiques (terrains de nature différentes, failles, filons...etc.) se comportent comme des cibles et créent des champs électromagnétiques secondaires.

**2-5- TDEM :** Le TDEM (time domain electro magnetism) utilise la propriété qu'ont les champs magnétiques variant dans le temps d'induire des courants dans les sols conducteurs. Ces courants induits engendrent à leur tour des champs magnétiques secondaires que l'on mesure en surface. Le TDEM se distingue du VLF par la maîtrise de la source d'énergie (pas de dépendance d'une antenne d'émission non contrôlable), par le fait que l'on mesure un signal induit après coupure du champ primaire, et par la possibilité de réaliser de véritable sondage, c'est-à-dire de contrôler la profondeur d'investigation.

**2-6- RMP :** La RMP (résonance magnétique des protons) exploite la propriété qu'ont les atomes d'hydrogène de produire un champ magnétique de relaxation lorsqu'ils sont excités à une certaine fréquence. La très grande majorité des atomes d'hydrogène dans le sous sol provenant des molécules d'eau. Cette méthode permet une détection directe de l'eau souterraine, alors que les autres méthodes n'apportent que des renseignements indirects.

**2-7- Méthode gravimétrique :** La gravimétrie mesure et étudie le champ de la gravité terrestre qui est équivalent à une accélération ( $g$  : en  $m/s^2$ ). La différence de répartition des densités dans le sous sol (changement de formations) se traduit par des anomalies du champ de gravité. La mesure de  $g$  s'effectue par gravimètre dans les différents secteurs de la zone étudiée.

### **3- Sondages (forages) de reconnaissance :**

Les sondages de reconnaissances sont des puits de petit diamètre de l'ordre de 6 à 8 cm ; dont leur réalisation et équipement est similaires à ceux des forages d'exploitation. Les sondages (forages) de reconnaissance permettent de vérifier les hypothèses émises et apportent des informations

indispensables (investigation, mesures et essais, prélèvement d'échantillons d'eau et de sol, observations périodiques) comme ils permettent d'effectuer des diagraphies et des essais de pompage.

## LES FORAGES ET LES OUVRAGES D'EAU

### **Introduction**

Les techniques de captage des eaux souterraines classiquement mises en œuvre dans les milieux poreux et fissurés sont peu variées. Le choix de la technologie à adapter est en fonction non seulement de l'hydrogéologie (géométrie de l'aquifère, paramètres hydrodynamiques, potentialités) mais également de contraintes externes, comme la topographie, la hydrographie, le risques de salinisation et de transfert de pollution depuis la surface, l'occupation des sols, les conditions d'exécution et les équipements. Enfin, l'ouvrage doit pouvoir être réalisé dans des conditions économiquement supportables.

### **1. Les forages de reconnaissance**

Les sondages de reconnaissances sont des puits de petit diamètre de l'ordre de 6 à 8 cm, dont leur réalisation et équipement est similaire à ceux des forages d'exploitation. Les sondages (forages) de reconnaissance permettent de vérifier les hypothèses émises et apportent des informations indispensables (investigation, mesures et essais, prélèvement d'échantillons d'eau et de sol, observations périodiques) comme ils permettent d'effectuer des diagraphies et des essais de pompage.

### **2. Les forages d'exploitation verticaux :**

Les ouvrages verticaux sont les plus utilisés et les plus adaptés pour exploiter des aquifères poreux et relativement étendus. La majorité des aquifères fissurés sont également exploités à l'aide de ces ouvrages.

**2.1. Les puits :** Ils constituent des ouvrages de captage très répandus, ils ont été généralement réalisés à la main et, de ce fait, il captant les nappes peu profondes. Les diamètres de ces ouvrages sont généralement très importants (de 1 à 3 mètres de diamètre). Ces ouvrages sont souvent mal protégés de la surface et très sensibles aux fluctuations de niveau des nappes dont ils ne captent souvent que la partie supérieure. Leur rendement est généralement faible du fait de ce mode de captage.

**2.2. Le forage :** à la différence d'un puits, est un trou vertical profond, de plusieurs dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres et de diamètre plus restreint. Il est creusé par un procédé mécanique à moteur (foreuse) en terrain consolidé ou non, dans les défais très rapides.

Les forages constituent probablement le type de captage le plus répandu pour l'eau potable, ils ont l'avantage qu'ils permettent de capter des niveaux aquifères bien précis et individualisés,

notamment les nappes captives, avec une excellente sécurité contre les pollutions de surface. La partie non captant peut (et doit) en effet être parfaitement étanche et cimentée sur toute la hauteur.

**2.3. La pointe filtrante :** c'est un ouvrage de captage peu profond (8 m maximum) réalisé généralement dans les sols sableux. Ce type de captage est aménagé en enfonçant manuellement ou mécaniquement le tubage dont le diamètre intérieur varie de 2,5 à 5cm (8 cm au plus). L'extrémité inférieure constitue la crête par laquelle s'effectue l'aspiration de l'eau. Les pointes filtrantes, isolées ou en batteries sont couramment employées dans le domaine des travaux publics pour le rabattement des nappes mais peu usitées pour l'exploitation des eaux souterraines. Le captage par pointes filtrantes permet de répartir les prélèvements sur une plus grande surface et de diminuer les rabattements. Sa mise en œuvre, d'un coup de revient modeste, ne nécessite ni matériel complexe, ni main d'œuvre qualifiée.

### 3. Les ouvrages de captage d'eau horizontaux

**3.1. Les galeries drainantes :** Les galeries sont des petits tunnels creusés dans la roche de manière à traverser et donc à drainer une nappe d'eau souterraine. Ces ouvrages sont généralement subhorizontaux et de sections de l'ordre de 1.80 à 2 mètres de hauteur et 1 à 2 mètres de large. Les eaux souterraines sont collectées puis canalisées par une galerie où des drains horizontaux ou subhorizontaux complémentaires viennent parfois se brancher à la galerie. La longueur de ces galeries est variable : de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

Les eaux souterraines nécessitent parfois d'être collectées par d'importantes surfaces de drains lorsque les caractéristiques de la nappe aquifère sont très mauvaises. C'est le cas de formations superficielles très peu épaisses mais constamment mouillées, qui permettent néanmoins de produire des débits intéressants si la longueur des drains est suffisante. Les drains sont, en quelque sorte équivalents à une multitude de forages très proche les uns des autres et reliés entre eux.

Des captages par galeries drainantes sont parfois effectués dans des formations calcaires fissurées. L'obtention de débits importants nécessite alors le creusement de galeries souterraines dont le développement permet la collecte de toutes les arrivées d'eau, à la manière de galerie de mine. Ces ouvrages sont toutefois très sensibles aux sécheresses. Un abaissement, même faible du niveau de la nappe peut traduire par une importante diminution de débit.

Le choix de la méthode de réalisation d'une galerie dépend principalement de la nature des terrains encaissants et de leur homogénéité. L'uniformité de la méthode de réalisation d'une galerie sur tout le linéaire est recommandée étant donné les surcoûts et le temps nécessaire à l'aménée de nouveaux matériaux. Les méthodes d'abattage sont les suivantes :

**3.1.1. Abattage à l'explosif (méthode traditionnelle) :** technique la plus utilisée dans les terrains rocheux, en pleine ou demi section. Le plan de tir doit être adapté pour limiter l'effet des tirs sur le terrain encaissant et assurer un découpage soigné de la section, malgré des vitesses de creusement faibles, cette technique à l'avantage de permettre un suivi géologique et hydrogéologique précis. Ce dernier consiste à identifier les venues d'eau ponctuelles au sein des structures géologiques, à surveiller l'évolution des débits à l'intérieur du tunnel et à réaliser des analyses d'eau afin de préciser la provenance des eaux.

**3.1.2. Abattage à attaque ponctuelle :** l'abattage est assuré par différents moyens ou non (pelle mécanique) et adapté aux terrains tendres :

\***à l'aide d'un microtunnelier** (galerie de diamètre inférieur à 3m), cette méthode est généralement utilisée en milieu urbain pour la pose de nouvelles canalisations et pour le captage d'eau souterraine. Il a l'avantage de pouvoir être entièrement commandé et dirigé de l'extérieur depuis un poste de pilotage en surface. Le microtunnelier assure, comme les tunneliers classiques, l'excavation du sol, le soutènement des parois du tunnel, l'évacuation des déblais. Le microtunnelier, capable de creuser dans toutes les classes de terrain, il permet une avance journalière des travaux de 9 à 2 m. Le microtunnelier est certainement le moyen le plus rapide pour construire une galerie, pour autant qu'il puisse être utilisé dans des conditions optimales, cependant il ne permet pas d'améliorer les connaissances géologiques (interprétation des déblais évacués difficile et revêtement de la galerie au fur et à mesure du creusement) contrairement à la méthode traditionnelle où un suivi peut être mené au cours du creusement. Par ailleurs, en cas d'hétérogénéité des terrains, les performances de cet outil peuvent être considérablement diminuées. Le recours à une méthode traditionnelle peut s'avérer nécessaire en cas de difficulté majeure.

\***par abattage mécanique** : lorsque le terrain est homogène, de dureté et d'abrasivité acceptable, il est intéressant d'utiliser l'abattage mécanique, l'avancement sera rapide. Cet intérêt est réduit dans le cas de terrain hétérogène où l'on est amené à rencontrer des roches de caractéristiques différentes nécessitant parfois l'emploi d'explosif pour l'abattage ou inversement le recours à un abattage manuel. Il en résulte une immobilisation de la machine dont les conséquences financières sont importantes, et qui peuvent être accrues par la nécessité d'un équipement de foration mécanique pour la mise en place de l'explosif. Dans ce cas la présence sur le chantier de ces équipements et leur utilisation discontinue pénalise fortement le procédé.

**3.2. Le puits à drains rayonnants :** Il s'agit d'un puits muni de drains tubulaires horizontaux disposés selon plusieurs directions radiales et accroissant son rayon efficace. Ce sont des captages construits en général pour la production de débits importants (1000 à 3000 m<sup>3</sup>/h par ouvrage) sur des nappes aquifères puissantes de nature alluviale. Ils sont constitués d'un cuvelage de gros

diamètre nécessaire au fonçage des drains et d'un ensemble de drains horizontaux enfoncés dans la formation alluviale selon différentes techniques. Un cuvelage vertical étanche, en béton armé, de 2 à 4 m (voire 6 m) de diamètre intérieur, est foncé dans le sol à une profondeur variable (5 à 50 m) selon le contexte hydrogéologique. Le fond du cuvelage est ensuite fermé par un radier en béton immergé (de 1 à 4 m d'épaisseur). Les drains horizontaux sont foncés dans l'aquifère, depuis l'intérieur du cuvelage, à l'aide d'une presse hydraulique. D'un diamètre de 200 ou 300 mm et d'une longueur de quelques dizaines de mètres, les drains sont en général au nombre de deux à huit (souvent 4 ou 6). Les avantages du puits à drains rayonnants horizontaux sont liés à des rendements hydrauliques considérables, à une durée de vie très importante et à une possibilité de capter, sur un front de nappe étendue, des horizons parfois peu épais, en profondeur. Enfin il faut mentionner que cette technique d'exploitation est appliquée dans les terrains de faible perméabilité.

**3.3. Le puits avec galeries drainantes :** La combinaison de ces deux techniques permet d'augmenter le volume d'eau soutiré. Une galerie drainante horizontale peut être creusée au fond d'un puits ou plusieurs puits peuvent être reliés entre eux par une ou plusieurs galeries drainantes horizontales enterrées. Disposées parallèlement au lit des rivières, elles peuvent ainsi drainer les eaux des alluvions.

**3.4. Le Foggara :** Il existe d'autres systèmes de captage tels que des tranchées drainantes de très grande longueur (plusieurs kilomètres) qui sont conçues pour amener l'eau d'un aquifère poreux par gravité. On les appelle de foggara (Algérie), khettara (Maroc) ou encore qanat (Iran). L'opération consiste à creuser un puits en altitude afin de connaître la profondeur de la nappe. Une galerie de la taille d'un homme est ensuite creusée de l'aval vers l'amont et en pente douce afin de rejoindre la zone humide initialement découverte. À intervalle régulier, des puits sont creusés afin d'évacuer les déblais et afin d'aérer. La galerie devient drainante dès qu'elle rejoint la couche aquifère. Afin d'accroître le débit, il suffit d'allonger la galerie par d'autres galeries annexes. L'avantage de ce système est de fournir un débit en continu sans aucun travail d'exhaure et sans évaporation, par contre en période de faible utilisation, l'eau est gaspillée.

**3.5. Le forage horizontal :** C'est quant à lui une technique permettant de faire passer des canalisations et des câbles sous des obstacles (chaussées, bâtiments, cours d'eau...) sans avoir à réaliser de tranchée. Grâce au forage horizontal les sources difficiles d'atteindre en forage classique du fait d'obstacles géologiques (lithologies rebelles) ou de la structure de l'aquifère, deviennent accessibles.

La méthode du forage horizontal consiste à foncer dans le sol, à l'horizontal, une gaine (acier, béton...). Un puits de départ et un puits d'arrivée doivent être aménagés à la profondeur requise. Une tête de forage rotative (ou un marteau fond de trou) perce le sol, et des tarières évacuent les

déblais au fur et à mesure que des tubes sont poussés dans le sol. Ce type de forage peut être réalisé en pente.

**4. Le piézomètre :** C'est un dispositif servant à mesurer la " hauteur " piézométrique " en un point donné d'un aquifère, en indiquant la pression en ce point. Il donne l'indication d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. (Dictionnaire français d'hydrogéologie. G.Castany, J.Margat.1977).

Il s'agit, dans tous les cas, d'un sondage équipé d'un tubage, généralement de faible diamètre, permettant essentiellement des mesures du niveau de l'eau. Par extension, le piézomètre désigne tout forage destiné à effectuer des mesures et des prélèvements sur une nappe.

Un piézomètre c'est un trou de forage dans lequel est installé un tubage, dont une partie est «aveugle » (tubage plein) et une partie est «crépinée» (tubage perforé pour laisser passer les fluides). L'espace annulaire est cimenté sur une certaine hauteur pour éviter que des produits indésirables ne puissent s'écouler par cet espace et polluer gravement la nappe. La tête du piézomètre est également protégée pour éviter les accidents et les risques d'introduction de produits polluant directement dans le piézomètre.

**5. le puits d'observation (ou de prélèvement) :** C'est un tube analogue au piézomètre (quoique d'un diamètre plus grand) afin de réaliser des prélèvements d'eau dans la nappe, pour en analyser la composition. Cela est souvent le cas après une pollution où la qualité de l'eau de la nappe doit être surveillée, parfois durant plusieurs années. Dans ce dernier cas, il vaut mieux parler de « tube d'observation ou de prélèvement » pour éviter toute confusion, car de tels forages ne sont pas alors destinés à mesurer la charge hydraulique.