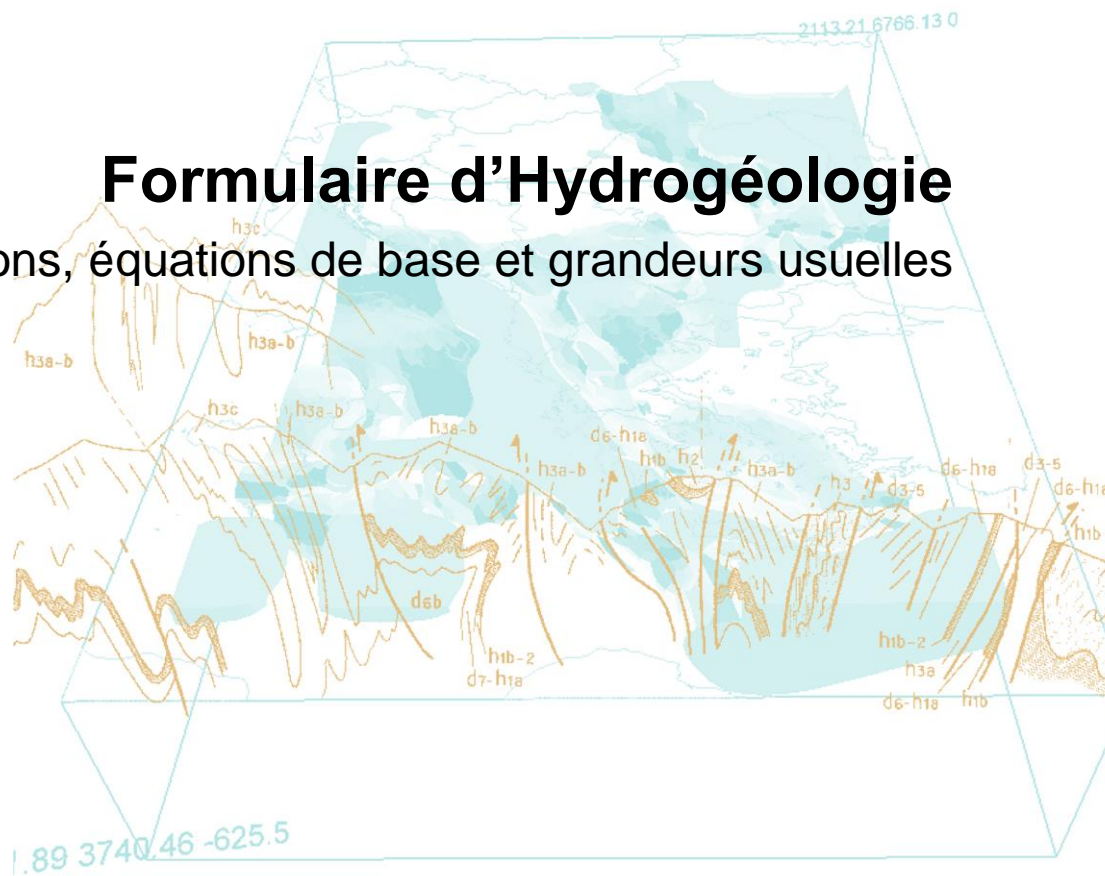


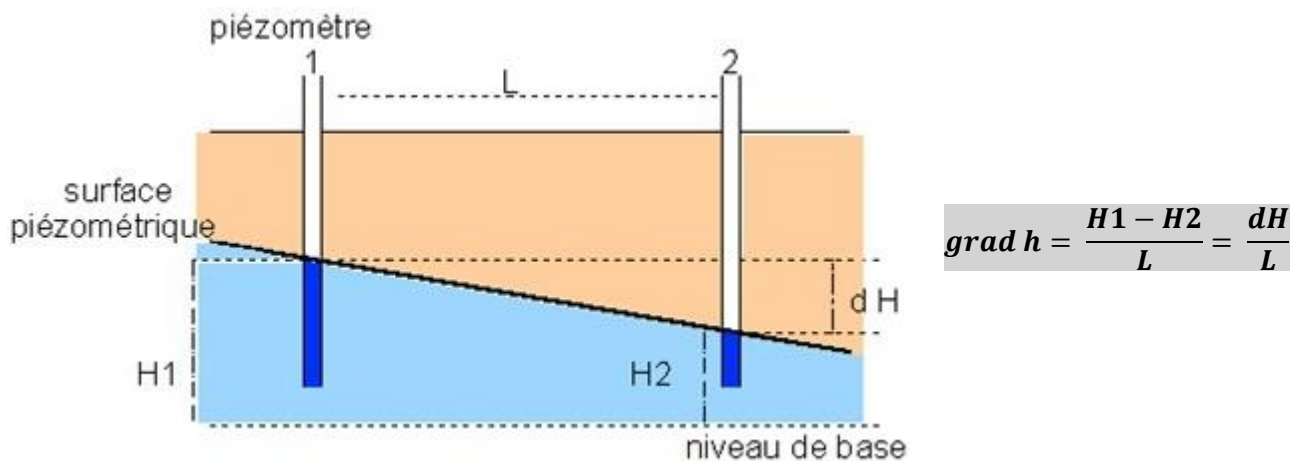
# Formulaire d'Hydrogéologie

Définitions, équations de base et grandeurs usuelles



# 1. Niveau piézométrique et gradient hydraulique

La surface de la nappe est appelée **niveau piézométrique** ou **charge hydraulique**. Elle est mesurée en relevant le niveau d'eau dans les puits et piézomètres, ou le niveau topographique à l'emplacement d'une source (qui correspond à une résurgence de la nappe). Entre la zone d'infiltration et l'exutoire, l'eau souterraine se déplace dans l'aquifère par gravité, soit des zones les plus hautes vers les points les plus bas. La surface de la nappe est donc en pente. Cette pente est appelée **gradient hydraulique** (*grad h*) et peut être calculée entre deux points de la même manière qu'une pente topographique : en divisant la différence de niveau de la nappe entre les deux points par la distance les séparant.



Comme pour l'altitude topographique, le niveau piézométrique est généralement indiqué en mètres NGF (*m NGF*). Le réseau du Nivellement Général de la France est le réseau de nivellement officiel en France métropolitaine. Le « niveau zéro » (0 *m NGF*) correspond au niveau de la mer déterminé par le marégraphe de Marseille.

## 2. Porosité et porosité efficace

Les formations géologiques, des plus meubles aux plus compactes, contiennent toutes des espaces vides résiduels entre les grains ou blocs qui la constituent. La **porosité totale** ( $\omega$ ) d'une roche correspond au ratio entre le volume des « vides » dans la roche et le volume total. C'est dans ces espaces « vides » que l'eau va s'accumuler pour former les nappes.

Néanmoins, seule une partie de l'eau contenue dans les formations géologiques est disponible pour les écoulements. En effet, une partie de l'eau contenue au sein des pores est liée aux grains de la roche par des forces de capillarité. On l'appelle l'**eau liée**, par opposition à l'eau disponible pour les écoulements, dénommée l'**eau libre**.

De plus, tous les pores ne sont pas connectés entre eux : certains sont isolés à l'intérieur des grains de la roche et l'eau contenue dans ces vides ne peut donc pas circuler.

On distingue donc la porosité totale ( $\omega$ ) de la **porosité cinématique** ( $\omega_c$ ), qui est le ratio entre le volume des « vides » disponibles pour l'écoulement et le volume total.

Le tableau ci-dessous propose un ordre de grandeur des porosités totale et cinématique pour différents types de formations classées suivant leur granulométrie (la taille des grains de la roche) :

Type de formation	Porosité totale	Porosité cinématique
Graviers	25 %	25 %
Sables et graviers	20 %	20 %
Sables grossiers	25 %	15 %
Sables fins	30 %	10 %
Limons	35 %	2 %
Argiles	45 %	0.1 %

### 3. Loi de Darcy et perméabilité

La vitesse d'écoulement de la nappe est liée au gradient hydraulique et à la **perméabilité** ( $K$ ) de l'aquifère. Celle-ci se définit comme la faculté de la roche à se laisser traverser plus ou moins facilement par l'eau.

La loi de Darcy, du nom d'Henry Darcy, le savant dijonnais qui l'a mise en évidence en 1856, définit ainsi la vitesse d'écoulement de la nappe, appelée **vitesse de filtration** ou **vitesse de Darcy** ( $U$ ) :

$$U = K \cdot \text{grad } h$$

Le gradient hydraulique étant sans unité, la perméabilité a la dimension d'une vitesse et s'exprime donc en mètres par seconde. Comme les valeurs sont généralement très faibles, on utilise le système des puissances de 10 : ainsi  $10^{-3}$  m/s correspondent à une vitesse de 1 mm/s, soit 86,4 m/j.

Le tableau ci-dessous propose un ordre de grandeur de la perméabilité pour différents types de formations classées suivant leur granulométrie :

Type de formation	Perméabilité (en m/s)
Graviers	$1 \cdot 10^{-1} = 0,100\ 000\ 000$
Sables et graviers	$1 \cdot 10^{-2} = 0,010\ 000\ 000$
Sables grossiers	$1 \cdot 10^{-3} = 0,001\ 000\ 000$
Sables fins	$1 \cdot 10^{-4} = 0,000\ 100\ 000$
Limons	$1 \cdot 10^{-7} = 0,000\ 000\ 100$
Argiles	$1 \cdot 10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$

## 4. Vitesse de l'eau dans la nappe

La vitesse de Darcy peut être assimilée à une vitesse fictive : on considère que l'écoulement se produit au travers d'une section de terrain où roche et pores sont pris en compte globalement, comme si toute la section était traversée. En réalité, comme l'eau ne passe que par les pores, la vitesse dans les interstices est plus importante que celle, fictive, issue du calcul effectué selon la loi de Darcy, au travers de toute la section de terrain, grains de roche et pores compris.

La **vitesse réelle de l'eau** dans la nappe ( $V$ ) peut donc se calculer en divisant la vitesse de Darcy par la porosité efficace :

$$V = \frac{U}{\omega_c}$$

## 5. Vitesse d'un composé chimique dans la nappe

Les composés chimiques solubles dans l'eau ne se déplacent pas nécessairement à la même vitesse que les molécules d'eau. En effet, leur mouvement peut être ralenti (ou accéléré) en raison d'interactions physico-chimiques avec la roche. Ainsi, à chaque instant, une fraction du composé chimique peut être adsorbée sur les grains de la roche.

Le **coefficient de sorption** ou **coefficient de rétention** ( $K_d$ ) est défini comme le rapport de la concentration de l'élément sorbé sur les grains de la roche ( $C_s$  en  $mol/L$ ) sur la concentration en de l'élément en solution ( $C_l$  en  $mol/L$ ), en fonction du rapport massique solide/liquide ( $S/L$  en  $g/mL$ ) :

$$K_d = \frac{C_s}{C_l} \cdot \frac{L}{S}$$

Avec  $L$ , le volume de solution (en  $mL$ ) et  $S$  la masse de solide (en  $g$ ).

Le tableau ci-dessous propose un ordre de grandeur du coefficient de sorption ( $K_d$ , en  $mL/g$ ) pour différents composés chimiques et différents types de formations classées suivant leur granulométrie :

Composé chimique	Type de formation			
	Gravier	Sable	Limon	Argile
Naphtalène	3,11	3,37	3,94	5,10
Phénanthrène	2,61	1,80	2,26	2,31
Pyrène	2,89	2,42	2,72	2,76
Trichloroéthane	0,05	0,16	1,66	4,22
Trichloréthylène	0,28	0,57	6,17	8,93
Tétrachloréthylène	0,35	1,00	21,90	29,10

*Données librement inspirées de la base de données SORP-BIO éditée par l'INERIS.*

Le **coefficient de retard** ( $R$ ) dû à l'adsorption se calcule alors à partir du coefficient de sorption, de la porosité totale et de la **densité volumique des grains** de la roche ( $\rho_s$ ) :

$$R = 1 + K_d \cdot \frac{\rho_s \cdot (1 - \omega)}{\omega}$$

La densité volumique du quartz, qui est le minéral prédominant dans les terrains alluviaux, est de 2,65 kg/L.

La **vitesse du composé chimique** dans la nappe ( $V_c$ ) peut donc se calculer en divisant la vitesse réelle de l'eau par le coefficient de retard :

$$V_c = \frac{V}{R} = \frac{U}{\omega_c \cdot R}$$