

Code de Bonne Pratique Auxiliaire 3

Pompage de l'eau souterraine pour le rabattement

Bruxelles Environnement



Table des matières

1. INTRODUCTION	4
2. DESCRIPTION DES TECHNIQUES ET DES PRINCIPES TECHNOLOGIQUES MIS EN ŒUVRE	5
2.1. PUISARD	6
2.2. CANNES FILTRANTES	7
2.3. PUIS PROFOND.....	9
2.4. VARIANTES ET COMBINAISONS	10
2.4.1. <i>Electro-osmose</i>	10
2.4.2. <i>Système EDUCTOR</i>	11
2.4.3. <i>Drains verticaux</i>	12
2.5. SELECTION DE LA METHODE	13
3. GESTION DES IMPACTS POTENTIELS	15
3.1. DESCRIPTION DES IMPACTS.....	15
3.1.1. <i>Erosion</i>	15
3.1.2. <i>Tassement différentiel</i>	16
3.1.3. <i>Altération de la contrainte effective</i>	16
3.2. MESURES DESTINÉES À ATTÉNUER LES IMPACTS	17
3.2.1. <i>Erosion</i>	17
3.2.2. <i>Tassement différentiel</i>	17
3.2.3. <i>Altération de la contrainte effective</i>	18
4. INFORMATIONS A COLLECTER POUR LE DIMENSIONNEMENT	20
4.1. SOURCES DOCUMENTAIRES	20
4.2. ESSAIS SUR TERRAIN.....	20
4.2.1. <i>Forage de reconnaissance</i>	20
4.2.2. <i>Mesure des paramètres hydrodynamiques</i>	21
4.2.3. <i>Mesure des paramètres mécaniques</i>	22
4.2.4. <i>Géophysique</i>	22
4.2.5. <i>Détermination du gradient hydraulique initial</i>	23
4.3. ANALYSE DU VOISINAGE	23
4.3.1. <i>Captage</i>	23
4.3.2. <i>Site potentiellement pollué</i>	23
4.3.3. <i>Infrastructures</i>	23
4.4. RECOMMANDATIONS	24
5. MODELISATION	25
5.1. DEBIT DE POMPAGE	25
5.2. ESPACEMENT ENTRE CANNES	25
5.3. ESTIMATION PREALABLE DES TASSEMENTS	25
6. SUPERVISION ET CONTROLE	27
6.1. MONITORING PIEZOMETRIQUE.....	27
6.2. SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU	27
6.3. RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE	27
7. CHECK-LIST A L'ATTENTION DES ENTREPRENEURS ET EXPERTS	28
8. SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES	31
9. ANNEXES	32
9.1. GEOLOGIE DE BRUXELLES	32
9.2. RAPPORT DE PROJET DE DEMERGEMENT	33

9.3. ARBRE DECISIONNEL34



1. INTRODUCTION

Ce Code de Bonne Pratique concerne une technique d'intervention qualifiée d'auxiliaire, en ce sens qu'elle n'est pas utilisée seule mais en complément d'autres techniques d'intervention visant, elles, à assainir essentiellement une pollution du sol. La technique auxiliaire porte sur le rabattement de l'eau souterraine en vue de permettre des travaux de génie civil et [de traitement](#) sous le niveau de nappe.

Les eaux pompées proviennent soit de l'extérieur de la tâche de pollution (pompage périphérique), soit de l'intérieur du panache et peuvent être polluées de sorte qu'elles requièrent un traitement avant rejet. Le traitement en surface du sol de l'eau pompée fait l'objet d'un Code de Bonne Pratique auxiliaire distinct (Code de Bonne Pratique auxiliaire 1).

Ce code présente l'éventail des techniques disponibles et fournit un modèle de sélection de la méthode la plus appropriée en vis-à-vis du projet. Le code envisage ensuite l'ensemble des impacts potentiels générés par la pratique d'épuisement et fournit les mesures à mettre en place en vue de limiter les impacts.

D'un point de vue pratique, le code décline l'ensemble des éléments à acquérir en vue de programmer les travaux d'épuisement et présente dans la continuité les paramètres nécessaires au design du procédé et de l'évaluation des impacts.

La rédaction de ce code poursuit un objectif principal : il doit fournir au designer un guide méthodologique d'orientation décrivant les paramètres nécessaires à acquérir au projet ainsi que leur utilisation en vue de sélectionner la méthode la plus adaptée et d'évaluer la nécessité de mise en œuvre de mesures visant à limiter l'impact du projet.

Remarque

L'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués et ses arrêtés d'exécutions stipulent dans plusieurs articles le respect des codes de bonnes pratiques. En ce qui concerne les codes de bonnes pratiques relatifs au traitement, l'expert en pollution du sol agréé peut, dans certains cas, par exemple sur proposition de l'entrepreneur en assainissement, déroger aux dispositions reprises dans les codes de bonnes pratiques, moyennant une argumentation dûment fondée. Dans ce cas, Bruxelles Environnement se réserve à tout moment le droit de demander des informations complémentaires ou de demander des investigations de terrains supplémentaires, sur base des dispositions reprises dans les codes de bonne pratique, s'il le juge nécessaire et pertinent.

Nous précisons que ce code est d'application pour tous travaux impliquant un traitement par assainissement ou par gestion de risque, y compris les traitements de minime importance, les traitements de durée limitée, les mesures de suivi et les mesures d'urgence .

2. DESCRIPTION DES TECHNIQUES ET DES PRINCIPES TECHNOLOGIQUES MIS EN ŒUVRE

Le **traitement** de terrain pollué nécessite parfois l'excavation sous le niveau de la nappe phréatique. Lors de ces opérations, il convient d'abaisser le niveau statique de la nappe afin d'éviter les phénomènes de boulangerie ou de rupture de pente en fond d'excavation et d'assurer des conditions de travail sécuritaires pour les travailleurs et les édifices ou infrastructures avoisinantes.

L'abattement du niveau statique de la nappe phréatique peut être réalisé au moyen d'une ou plusieurs installations adaptées à la nature et à la perméabilité du sol, à l'étendue de la zone à démerger, à la profondeur de la nappe phréatique et à la quantité d'eau à gérer.

On dénombre trois méthodes principales de contrôle des eaux souterraines :

- **les puisards** : Lorsque le drainage de surface et écoulement par gravité sont les moyens utilisés pour acheminer les eaux en direction d'une cavité d'où elles sont éliminées par pompage ;
- **le prédrainage** : Lorsque plusieurs types de puits et drains souterrains sont utilisés pour abaisser la nappe phréatique avant l'excavation ;
- **le confinement** : Il s'agit de positionner des obstacles physiques à l'écoulement de l'eau, tels que des palplanches ; le confinement est nécessairement pratiqué en même temps que les deux techniques précédentes.

Dans ce qui suit, nous focaliserons notre attention sur l'utilisation des techniques suivantes :

- puisard,
- systèmes à cannes aspirant,
- puits profonds forés,
- variantes et combinaisons des techniques.

Les techniques traditionnelles s'appliquent aux terrains aquifères de bonne perméabilité. L'épuisement trouve donc sa principale utilisation dans les sables et graviers fins. L'**Annexe 1** présente un rapide tour d'horizon sur la géologie de la région de Bruxelles-Capitale. Force est de constater la dominance des formations tertiaires sableuses comme substrat. L'utilisation de techniques de démergement prend donc toute son importance.

Dans les sols à granulométrie trop grossière, la nappe ne peut être rabattue car les débits à évacuer sont trop importants ($k > 10^{-2}$ m/s) et supérieurs à ceux que peuvent évacuer les pompes. Le confinement est alors envisagé afin de limiter les flux d'eau entrant dans la fouille. Les techniques de confinement sont abordées dans le Code n°10 relatif aux excavations.

Les sols à granulométrie trop fines ne pourront être drainés efficacement ($k < 10^{-6}$ m/s). Il faut dès lors envisager une combinaison de procédés (pompage sous vide, électro-osmose et drains verticaux).

2.1. PUISARD

La méthode la plus simple consiste à recueillir l'eau dans un fossé en fond de fouille et à l'évacuer par pompage. Un puisard est ménagé en fond d'excavation à partir duquel l'eau est pompée (**Figure 1**) menant éventuellement à un cours d'eau de surface ou le réseau de collecte des eaux usées.

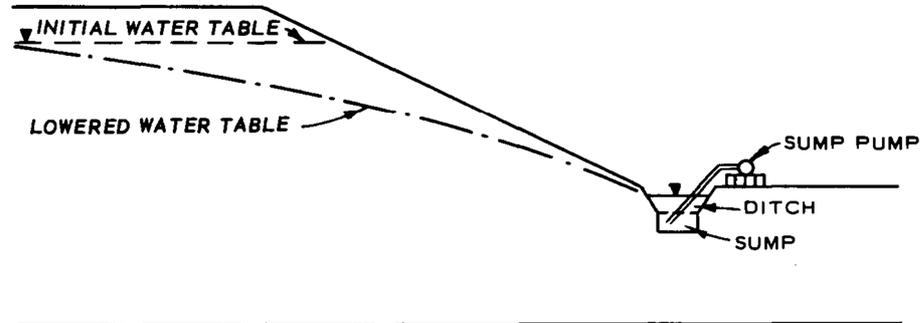


FIGURE 1. SCHÉMA DE PRINCIPE (DEWATERING AND GROUNDWATER CONTROL (2004))

L'acheminement des eaux vers le puisard est purement gravitaire mais peut être facilité par la mise en place de drains ou tranchées ouvertes en périphérie intérieure d'excavation. Cette méthode est le procédé le plus habituel et économique.

La profondeur du puisard est généralement de 0,6 à 1 m de profondeur. Les parois du puisard sont protégées afin de se prémunir d'un éboulement ou de la rupture/effondrement du puits. Les mesures les plus communément prises sont d'aménager les parois du puisard par des lattes en bois ou de disposer dans le puisard un fut perforé en acier ou en béton (**Figure 2**).

Les fossés et les drains doivent être dimensionnés de manière appropriée pour permettre une exhaure adéquate. Le dimensionnement s'appuie sur les équations d'écoulement en canaux découverts. Il est bon de rappeler qu'outre le volume de l'eau d'exhaure, le système doit être conçu pour prendre en charge les eaux pluviales qui viennent gonfler le volume d'eau à évacuer.

La mise en suspension des sédiments constitue le principal défaut de cette technique. Elle peut être à l'origine du charriage d'un important volume de sol. Afin de limiter la mise en suspension, les tranchées peuvent être remplies de gravier drainant, couvertes par un géotextile et équipées d'un drain.

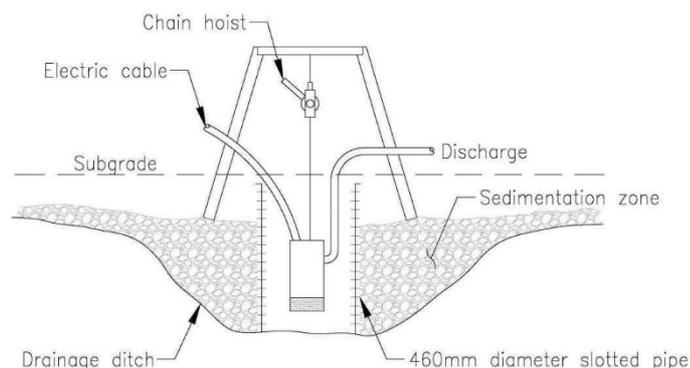


FIGURE 2. SCHÉMA D'UN PUISARD (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

2.2. CANNES FILTRANTES

L'utilisation de cannes filtrantes est le système de démergement le plus fréquent et souvent une option avantageuse financièrement (pré excavation).

La technique est bien adaptée à des situations où la nappe phréatique doit être rabattue à 4,5 - 6 m de profondeur par rapport à son niveau statique. Le rabattement maximal étant de six mètres, il est nécessaire de prévoir plusieurs étages pour les fouilles profondes (**Figure 3**). La profondeur efficace est limitée en raison des capacités de succion du système de pompage situé en surface et des problèmes de cavitation.

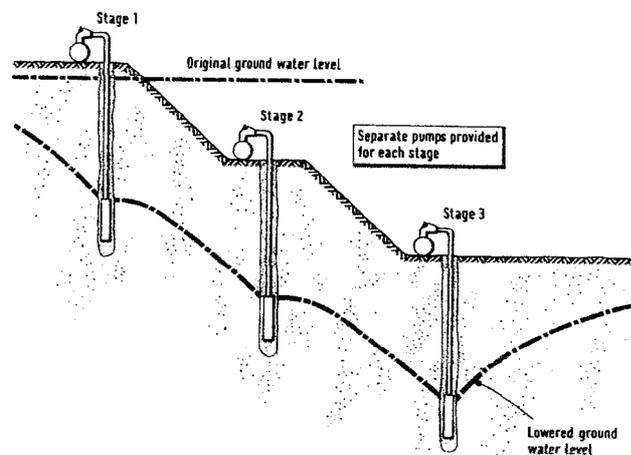


FIGURE 3. UTILISATION DES CANNES ASPIRANTES EN ÉTAGE (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

Le réseau d'épuisement est constitué de trois éléments de base, à savoir la pompe, le tuyau collecteur et les connexions, et les pointes filtrantes individuelles (**Figure 4**).

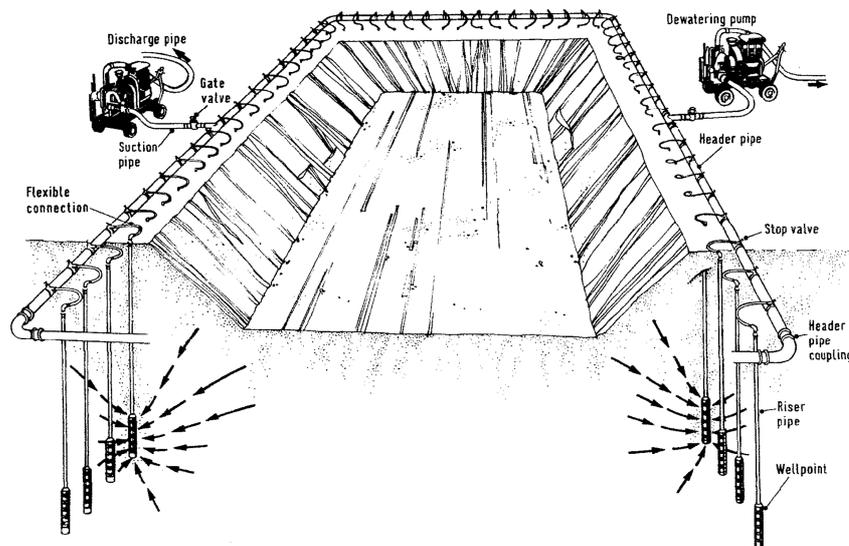


FIGURE 4. DESIGN GÉNÉRAL (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

La pompe est généralement une pompe à vide susceptible de créer un vide suffisant pour assurer la remontée des eaux. D'un point de vue pratique, on table sur une pompe par 100 m de collecteur s'ouvrant sur 70 à 100 pointes filtrantes.

Le montage doit être pourvu de vanne pour permettre l'isolement de certaines sections aspirantes ou certaines cannes. Les cannes sont généralement de petit diamètre (4-5 centimètres) et sont crépinées à leur base sur une hauteur d'un mètre. La crépine des cannes est généralement munie d'un filtre à sable afin de limiter la migration de fines particules dans le système.

Les cannes sont positionnées par fonçage ou à l'aide de différents outils de forages. Idéalement, la section crépinée ou d'aspiration est placée bien au-dessous de la hauteur désirée de rabattement de la nappe. En effet, lorsque la crépine est désaturée, le système commence à aspirer de l'air.

L'espacement des pointes filtrantes peut avoir un effet significatif sur la performance du système, et doit être défini sur la base des conditions de terrain et des flux attendus. L'espacement classique pour pointes filtrantes de petit diamètre est compris entre 1 et 4 m.

Pour les aquifères relativement homogènes de grande puissance, l'espacement des cannes peut être sélectionné sur la base de la quantité d'eau à extraire. Le volume pompé total est divisé entre le nombre de pointes filtrantes en prenant soin de s'assurer que les pertes de charge soient maintenues à des niveaux acceptables.

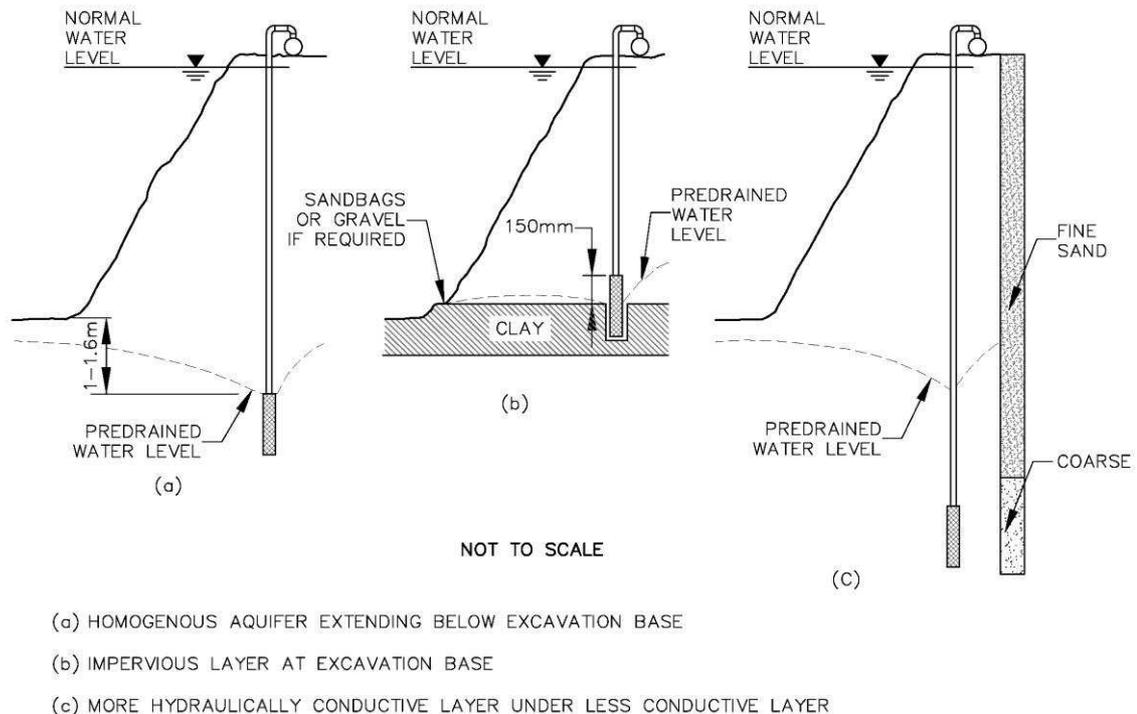


FIGURE 5. SCHÉMA DE PRINCIPE (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

En lieu et place de cannes aspirantes, l'expert peut proposer l'installation de conduites drainantes. Il s'agit de conduites filtrantes en PVC souples, annelées, crépinées et enrobées de fibres de noix de coco

ou de géotextile. Ces drains sont placés à une profondeur de 8 m maximum par un engin spécial (haveuse ou trancheuse). Les drains sont raccordés à des pompes à vide du même type que les pompes installées sur les cannes filtrantes.

La mise en place de ce type d'installation nécessite un dégagement physique important dans la zone des travaux.

2.3. PUIS PROFOND

Cette méthode implique le forage d'un rideau de puits profonds disposés le long et à proximité de la zone à excaver.

Les puits ont un diamètre supérieur à ceux des cannes aspirantes, généralement de 15 cm jusqu'à un mètre. Chaque puits est équipé d'une section crépinée entourée d'un massif filtrant. Le D50 (taille médiane de grain) du massif filtrant doit être 4 à 8 fois plus grand que le D50 du matériau constituant l'aquifère. Une pompe immergée est installée dans chaque puits. La **Figure 6** présente un schéma de principe.

Les puits sont généralement largement espacés et installés à une profondeur bien en dessous du fond de fouille. Ils sont particulièrement efficaces dans les aquifères homogènes de grande puissance.

Les coûts d'installation sont, en général, élevés compte tenu des travaux de forage et d'équipement.

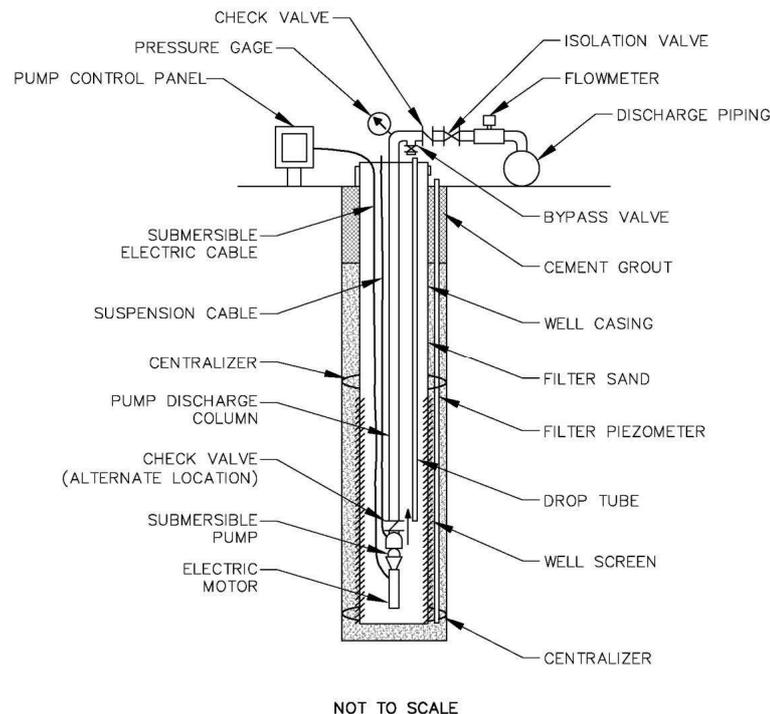


FIGURE 6. SCHÉMA DE PRINCIPE (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

Les puits sont installés en utilisant différents types d'équipements dépendant de la nature des terrains à forer. Ces méthodes peuvent être divisées en quatre groupes principaux, résumés dans le tableau suivant.

TABLEAU 1. MÉTHODE D'INSTALLATION DES PUIITS (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

WELL INSTALLATION METHOD	DESCRIPTION OF METHOD	TYPICAL WELL DIAMETER And MAXIMUM DEPTH
Jetting	Holepuncher on swinging or fixed leads is jetted into ground using high pressure water.	Diameters up 600 millimeters (mm), Depths up to 35 m
Bucket Auger Drilling	Bucket auger driven by Kelly bar, typically mounted on excavator or crane is used for excavation. Similar to drilled shaft excavation.	Typical diameters: 40 cm to 1 m, Depths up to 27 m
Rotary Drilling	Drill rig circulates fluid (drill mud or water) to move cuttings to surface. Typically drilled with roller or drag bits.	Diameters up to 450 mm typical, Depth dependent on capacity of drill rig, very deep depths possible.
Cased Drilling	Drilling method where casing is advanced with the drill head to maintain borehole stability. Bit is typically advanced by means of rotary percussion. Numerous applications and proprietary brand names.	Dual Rotary ("Barber"): diameters from 300 to 600 mm Duplex Percussive ("Odex", "Tubex," "Summetrix"): diameters up to 915 mm Down the hole percussive (best used in rock with casing above rock line): diameters up to 200 mm Sonic Drilling: diameters up to 305 mm Depth dependent on capabilities of drill rig, very deep depths possible.

Les puits sont disponibles en différentes matières (PVC, HDPE, acier) et tailles (3" à 8"). La taille du puits sera, entre autres, dictée par l'encombrement de la pompe.

Le dimensionnement du fentage des crépines a toute son importance. Le fentage varie de 3 à 45% de l'aire de la surface latérale. La superficie du fentage du filtre du puits doit être sélectionnée afin de maîtriser/limiter la vitesse d'entrée d'eau.

2.4. VARIANTES ET COMBINAISONS

2.4.1. ELECTRO-OSMOSE

Certains sols de plus faible perméabilité, tels que les limons, les limons argileux et les sables limoneux argileux, ne peuvent pas être épuisés efficacement par unique pompage à partir des pointes filtrantes



ou des puits. Le rendement de pompage peut être amélioré par la création d'un flux de courant électrique continu à travers le sol en direction des puits (**Figure 7**). L'objectif consiste à provoquer l'expulsion et la mobilisation de l'eau des pores à partir d'une électrode positive (cathode) vers une électrode négative (anode) matérialisée par la canne de pompage sous vide.

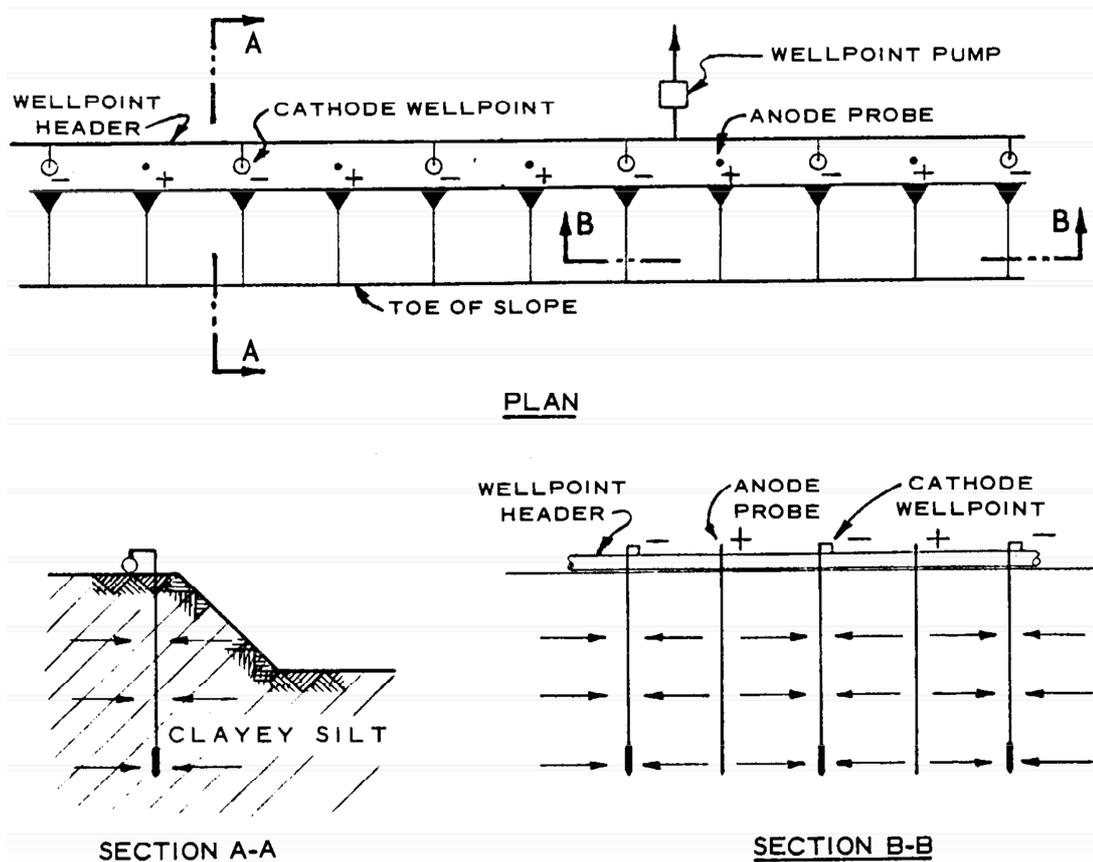


FIGURE 7. UTILISATION DE L'ELECTRO-OSMOSE POUR L'AMÉLIORATION DU DRAINAGE DES SOLS MOINS PERMÉABLES (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004).

2.4.2. SYSTEME EDUCTOR

Le système est similaire au système de pointes filtrantes (à l'exception du mécanisme de pompage). Au lieu d'utiliser une pompe à vide pour remonter l'eau souterraine, le système propulse de l'eau à haute pression à travers un tube venturi localisé dans la tête filtrante, créant ainsi une dépression ainsi qu'une remontée d'eau (**Figure 8**). Le système est avantageusement utilisé pour drainer les excavations profondes (10 à 45 m) dans des aquifères de faibles perméabilités.

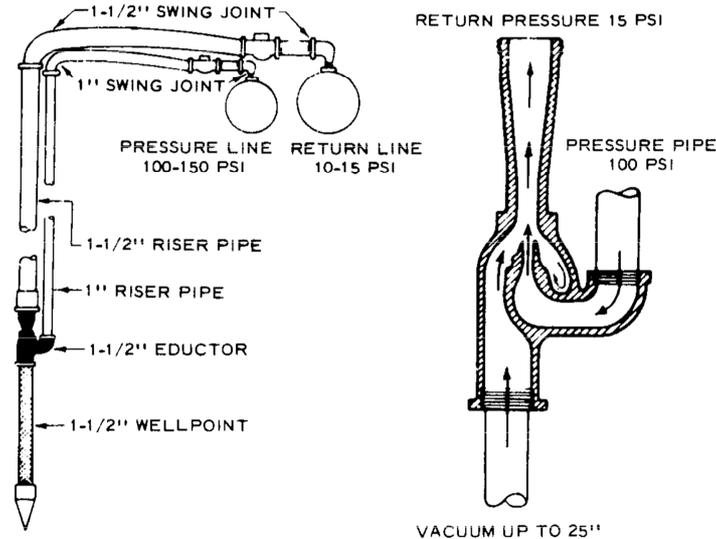


FIGURE 8: SYSTÈME JET-EDUCTOR (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004)

2.4.3. DRAINS VERTICAUX

Dans un sous-sol stratifié, constitué d'une alternance de couches aquifères de perméabilités variables couvrant un aquifère perméable qu'il convient de drainer, l'utilisation mêlée de puits profonds et de tranchées drainantes verticales constitue une bonne alternative.

La nappe phréatique dans la couche supérieure est abaissée au moyen de drains verticaux de sable comme représenté sur la **Figure 9**. Le drain a pour objectif d'intercepter l'infiltration dans la partie supérieure et d'acheminer les eaux vers le bas dans la zone de démergement par puits.

Le drain se compose d'une colonne de sable perméable. La capacité du drain peut être augmentée de manière significative par l'installation d'un drain de 1" ou 2" à l'intérieur du massif filtrant.

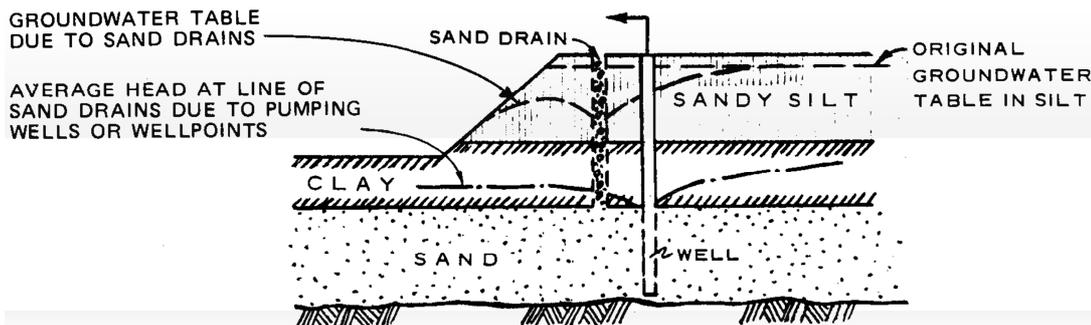


FIGURE 9. US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004

2.5. SELECTION DE LA METHODE

La sélection de la méthode la plus adaptée au cas d'étude doit l'être sur une base de faisabilité technique et financière.

Le **Tableau 2** synthétise l'applicabilité de chaque technique.

TABLEAU 2: US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004

Me	Ap	Re
Sumps and ditches	Collect water entering an excavation or structure.	Generally water level can be lowered only a few feet. Used to collect water within cofferdams and excavations. Sumping is usually only successful in relatively stable gravel or well-graded sandy gravel, partially cemented materials, or porous rock formations.
Conventional wellpoint system	Dewater soils that can be drained by gravity flow.	Most commonly used dewatering method. Drawdown limited to about 15 ft per stage; however, several stages may be used. Can be installed quickly.
Vacuum wellpoint system	Dewater or stabilize soils with low permeability. (Some silts, sandy silts).	Vacuum increases the hydraulic gradient causing flow. Little vacuum effect can be obtained if lift is more than 15 ft.
Jet-eductor wellpoint	Dewater soils that can be drained by gravity flow. Usually for deep excavations where small flows are required.	Can lower water table as much as 100 ft from top of excavation. Jet-eductors are particularly suitable for dewatering shafts and tunnels. Two header pipes and two riser pipes, or a pipe within a pipe, are required.
Deep-well systems	Dewater soils that can be drained by gravity flow. Usually for large, deep excavations where large flows are required.	Can be installed around periphery of excavation, thus removing dewatering equipment from within the excavation. Deep wells are particularly suitable for dewatering shafts and tunnels.
Vertical sand drains	Usually used to conduct water from an upper stratum to a lower more pervious stratum.	Not effective in highly pervious soils.
Electroosmosis	Dewater soils that cannot be drained by gravity. (Some silts, clayey silts, clayey silty sands).	Direct electrical current increases hydraulic gradient causing flow.
Cutoffs	Stop or minimize seepage into an excavation when installed down to an impervious stratum.	See paragraph 2-8 for materials used.

Les **Figures 10** et **11** présentent des outils de sélection selon le type de matériaux à démerger et la puissance du démergement nécessaire.

Le domaine d'application est également renseigné selon la perméabilité de l'aquifère.

Soil type	Average particle size (mm)	Coefficient of permeability (m/sec)	Suitable dewatering depth							
			4 m	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m	28 m	
Coarse gravel	60 ~ 20	> 1								
Medium gravel	20 ~ 6	> 1								
Fine gravel	6 ~ 2	$+10^{-1}$								
Coarse sand	2 ~ 0.5	$>10^{-2}$								
Medium sand	0.5 ~ 0.2	$>10^{-3}$								
Fine sand	0.2 ~ 0.05	$>10^{-4}$								
Coarse silt	0.05 ~ 0.02	$>10^{-5}$								
Medium silt	0.02 ~ 0.005	$>10^{-6}$								
Fine silt	0.005 ~ 0.002	$>10^{-7}$								
Clays	< 0.002	$<10^{-7}$								
Suggested dewatering method			Open sump method	Well point method	Vacuum well point method	Electro-osmosis method	Deep well method	Deep wells + auxiliary vacuum pumps		

FIGURE 10. CONDITIONS D'APPLICATION DE DIVERSES METHODES D'EPUISEMENT (DEWATERING GUIDELINES 2014)

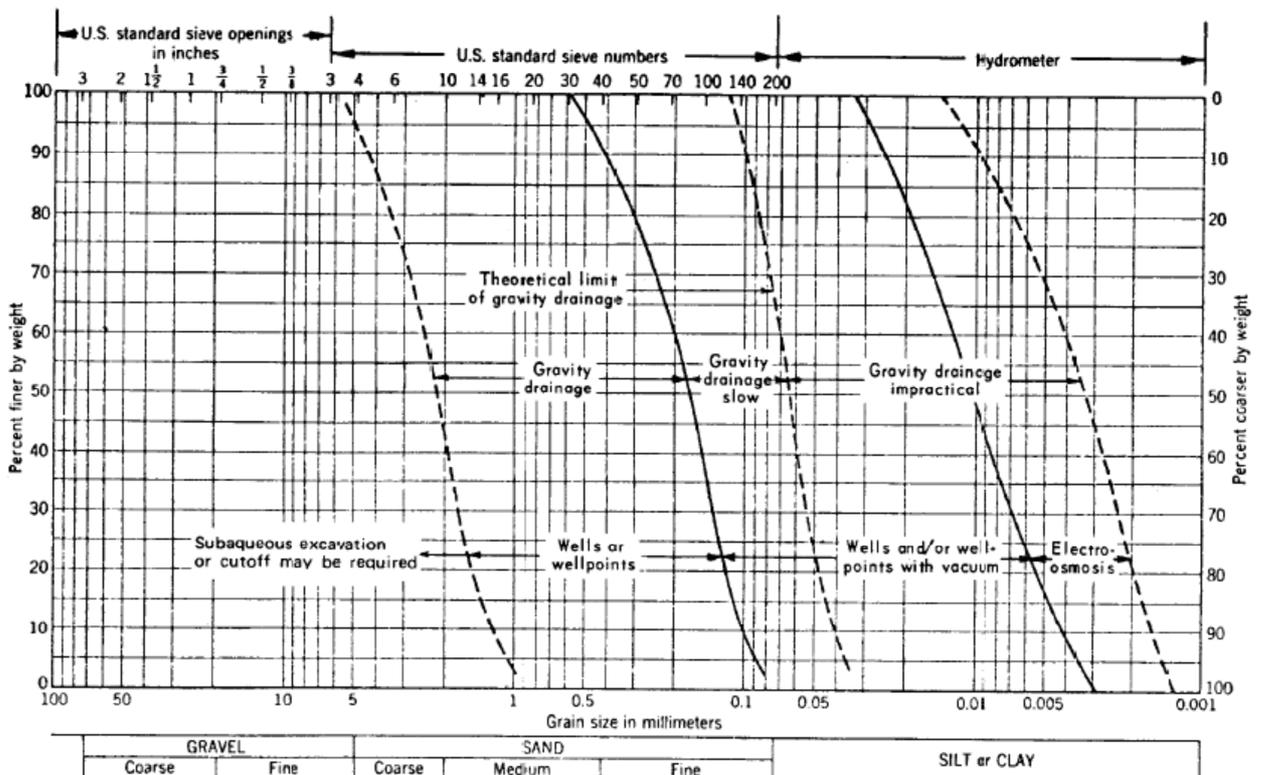


FIGURE 11. CONDITIONS D'APPLICATION DE DIVERSES METHODES D'EPUISEMENT (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004)

3. GESTION DES IMPACTS POTENTIELS

3.1. DESCRIPTION DES IMPACTS

Le sol est soumis à contraintes. La contrainte totale subie peut être décomposée en deux composantes essentielles :

- la première composante est supportée par l'eau interstitielle circulant à l'intérieur de l'espace poreux : c'est la pression interstitielle (u);
- la seconde est supportée par le squelette granulaire (les grains solides) : c'est la contrainte effective (σ').

La contrainte totale est exprimée selon la théorie de Terzaghi :

$$\sigma = \sigma' + u \text{ (Loi de Terzaghi)}$$

Le dénoyage d'un sol suite à un abaissement du niveau de nappe a pour effet de réduire la pression interstitielle et augmente la contrainte totale dans le sol.

Le dénoyage par pompage de surface ou souterraine peut donc entraîner des changements de force qui peuvent conduire à des transports/mobilisation de particules de sol, au soulèvement ou d'autres impacts négatifs tels que le tassement.

3.1.1. EROSION

Le gradient hydraulique est défini comme une perte de charge rapportée à une distance sur l'axe de l'écoulement principal. Lorsque le gradient hydraulique dépasse un gradient critique, un transport de sédiments constituant l'aquifère peut se produire.

Le transport commence avec la mobilisation des particules les plus fines et peut évoluer jusqu'à une rupture complète du squelette granulaire. L'importance de l'érosion est également décuplée si le design de l'épuisement n'est pas optimal (fentage des crépines, massif filtrant).

L'érosion de la fraction fine des sols granulaires est une cause possible du tassement. Les estimations de la quantité de matière érodée à proximité du puits de pompage peuvent être faites avec l'utilisation de modèles numériques à partir desquels l'importance des tassements est déduite (Cividini et al, 2009).

L'érosion peut être particulièrement dommageable dans les terrains ayant un sous-sol abritant des cavités résultant par exemple des activités du passé (anciennes fondations, impétrants, ...). Ce cas de figure est courant en région de Bruxelles-Capitale.

L'augmentation des contraintes effectives sur le squelette granulaire générée par le dénoyage peut entraîner une augmentation de la sollicitation du sol au niveau et autour des cavités, ce qui peut conduire à l'effondrement ou à la création de dolines résurgentes en surface.

3.1.2. TASSEMENT DIFFERENTIEL

Le cône de dépression créé par les opérations d'épuisement a pour effet collatéral de générer des changements non uniformes dans la contrainte effective agissant sur le sol autour du projet. L'effet est d'autant plus important que l'on se rapproche du centre d'action.

Les infrastructures situées dans le rayon d'influence du démergement peuvent subir des effets de tassements différentiels si des mesures appropriées ne sont pas prises.

Avant toute action de démergement, une analyse des tassements potentiels doit être entreprise afin d'éviter des dégâts aux structures avoisinantes.

Pour qu'il y ait tassement significatif, il faut que tous les éléments suivants soient réunis :

- la couche compressible doit être relativement épaisse ;
- la compressibilité de la couche doit être élevée : la tourbe, les argiles molles peuvent tasser, le sable ne tasse pratiquement pas ;
- le rabattement doit être de longue durée : généralement plusieurs jours ;
- le terrain doit être hétérogène (tassements différentiels) ;
- que les couches compressibles n'aient pas été soumises à préconsolidation (rabattement antérieur par exemple).

3.1.3. ALTÉRATION DE LA CONTRAINTE EFFECTIVE

Dans les cas d'un mouvement ascendant de l'eau, la contrainte effective verticale du sol chute. Le flux ascendant de l'eau tend alors par friction à mobiliser les grains de sol.

Lorsque le gradient vertical approche un gradient critique, la contrainte effective dans le sol est réduite à zéro et le sol perd toute sa cohésion.

En effet, le sol est soumis aux forces suivantes, par unité de volume :

- son poids déjaugé γ' dirigé verticalement vers le bas,
- la force d'écoulement $i \cdot \gamma_w$ dirigée verticalement vers le haut.

Il existe un gradient i_c appelé gradient critique, défini par la relation $\gamma' = i_c \cdot \gamma_w$

tel que les grains solides ne sont plus soumis à aucune force. Le sol est bouillant. Si le gradient augmente encore légèrement, le sol se soulève. Dans les sables et les graviers, le gradient critique est voisin de 1.

3.1.3.1. Claquage

La situation de chantier mettant couramment en jeu ce phénomène se rencontre lorsque l'on creuse une fouille sous laquelle existe une nappe captive ou semi-captive. Alors que la valeur de la pression interstitielle se maintient dans l'aquifère, l'épaisseur de couverture z se réduit. Une poche d'eau (loupe) se crée à l'interface et se gonfle de l'eau qui y arrive. Ceci se traduit par un soulèvement progressif de la surface du sol, allant jusqu'à rompre la couche peu perméable.

3.1.3.2. Phénomène de Renard

Le phénomène du « Renard » consiste en une rupture du sol en base de palplanches pouvant conduire à un affouillement brutal et spectaculaire. En effet, le poids des terrains situés à l'extérieur de la fouille tend à refouler le sol sous-jacent vers la fouille. La différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval provoque une circulation d'eau contournant la palplanche par le dessous.

3.2. MESURES DESTINÉES À ATTÉNUER LES IMPACTS

3.2.1. EROSION

Afin de contrecarrer les effets érosifs, une option consiste à suivre précisément la vitesse du rabattement de la nappe afin de l'ajuster à une vitesse de dénoyage suffisamment lente pour éviter l'érosion. L'intensité de l'érosion peut être approchée sur terrain par la mesure de la turbidité des eaux pompées. Pour un parfait suivi, l'expert peut exiger au CSC la prise de mesure automatique.

Un dépassement de 50 NTU (nephelometric turbidity unit) signifiera un effet érosif inacceptable et des mesures devront être prises afin de limiter la vitesse du rabattement. La mesure des matières en suspension peut également servir de critère d'alerte et permettra d'estimer le poids de sol érodé par volume d'eau pompée.

3.2.2. TASSEMENT DIFFÉRENTIEL

Pour limiter l'extension de la zone où l'influence du rabattement se fait sentir, on peut envisager de réinjecter une partie de l'eau pompée dans le sol (**Figure 12**). La réalimentation sera d'autant plus efficace que les puits de réalimentation seront situés à proximité des ouvrages susceptibles de tasser.

Le débit d'injection des puits de réalimentation est toujours nettement plus faible que le débit obtenu par pompage. Il y a à cela plusieurs raisons :

- la surpression appliquée à l'eau de réalimentation est limitée par la tenue du bouchon d'argile situé au-dessus de la zone crépinée ;
- lorsqu'un puits de pompage est mis en service, une partie des fines du terrain autour du puits est entraînée par l'eau. Ce phénomène, appelé le "développement" du puits, tend à augmenter la perméabilité du sol autour du puits. Dans le cas de la réalimentation, c'est le phénomène inverse qui se passe. Les fines sont entraînées par l'eau vers et dans le sol dont elles diminuent la perméabilité ;
- pour des raisons économiques, on réinjecte souvent les eaux pompées par le dispositif de rabattement. Ces eaux sont le plus souvent chargées de matières organiques et de sels ferrugineux. Mélangés à l'air par les pompes, ces éléments permettent le développement accéléré d'un lit bactérien peu perméable sur la crépine ou la formation d'oxyde de fer. Lorsque l'eau de pompage doit servir à la réalimentation, on veillera donc à limiter les contacts de l'eau avec l'air.

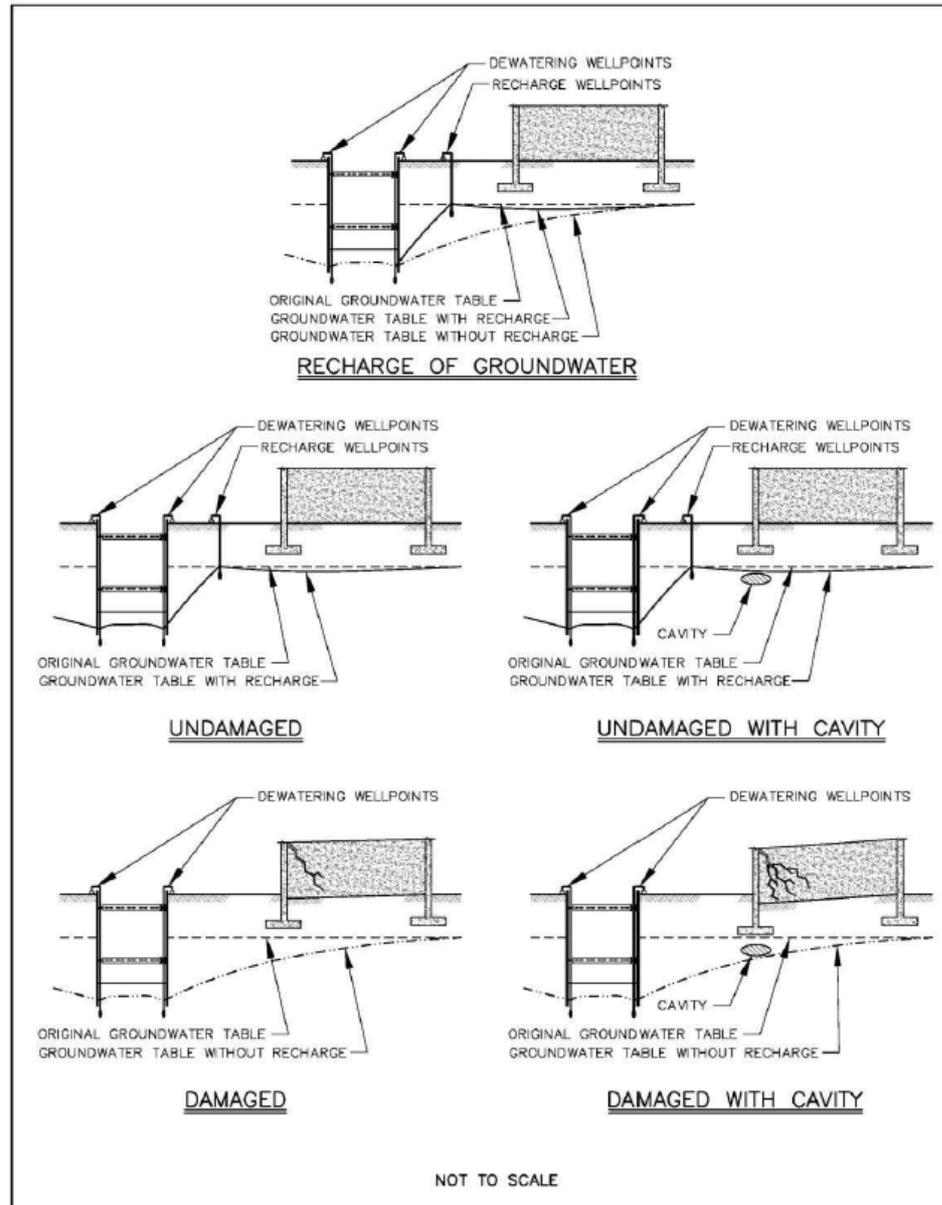


FIGURE 12. RECHARGE AFIN DE PREVENIR DES EFFETS DE TASSEMENT DIFFERENTIEL ET COLLAPSE (WATERING GUIDELINES, 2014)

3.2.3. ALTÉRATION DE LA CONTRAINTE EFFECTIVE

3.2.3.1. Claquage

L'ingénieur veillera à prendre régulièrement la mesure du niveau du fond de fouille afin d'alerter ses équipes à toute velléité de soulèvement. En cas de soulèvement, qui dans un tout premier stade reste réversible si l'épaisseur et la plasticité de la couche imperméable le permettent, il sera envisageable d'améliorer la sécurité par rabattement de la nappe captive (abaissement localement de la charge hydraulique). Ce dernier doit être cependant mesuré pour ne pas provoquer de tassement excessif. Si le soulèvement n'est pas précocement identifié, la fouille peut être perdue (rupture de la couche étanche, enrayage de la fouille, sans compter les dangers matériels et humains que cette surprise peut engendrer).

3.2.3.2. Coffrage des fouilles

L'installation de mesures de confinement peut être nécessaire dans les projets où la recharge en eau souterraine est attendue trop élevée pour travailler en sécurité et de manière efficace. Les mesures de confinement agissent comme des barrières physiques limitant fortement les flux d'eau latéraux (**Figure 13**).

Le confinement est assuré par des parois en acier ou palplanches, par des coulis de mur béton/bentonite (forage, tranchée et injection).

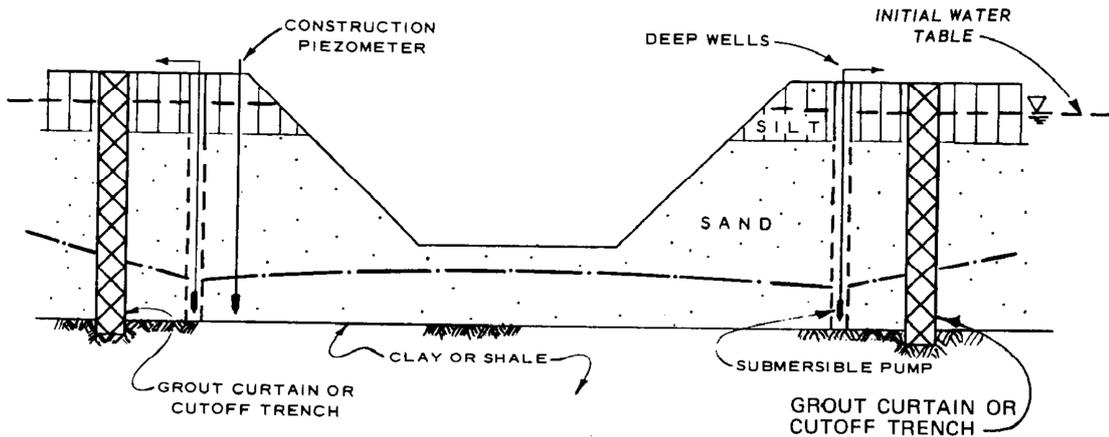


FIGURE 13. COFFRAGE/CONFINEMENT DE FOUILLE (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004)

Une attention particulière doit être accordée à ce type de conception. Un mauvais dimensionnement peut mener à des situations catastrophiques difficiles à remédier.

Pour les fouilles non coffrées jusqu'au substratum imperméable, il convient d'étudier la stabilité du fond. En effet, le poids des terrains situés à l'extérieur de la fouille tend à refouler le sol sous-jacent vers la fouille. Il y a effet Renard.

4. INFORMATIONS A COLLECTER POUR LE DIMENSIONNEMENT

L'expert peut collecter les informations du milieu à partir de sources documentaires et d'essais sur terrain. Selon l'importance du projet, l'une et/ou l'autre sera privilégiée voire nécessaire.

4.1. SOURCES DOCUMENTAIRES

La carte géologique de Belgique au 1/40.000^{ème} fournit une première image de la géologie de Bruxelles. L'échelle au 1/40.000 et le fond de carte rend peu aisée la localisation précise du site d'essai.

Le sous-sol de la région de Bruxelles-Capital est documenté depuis plusieurs décennies par une kyrielle de sondages géotechniques utiles pour l'exécution de gros chantiers de génie civil. L'ensemble de ces informations ont été compilées notamment par l'ULB dans une série de « Cartes géotechniques » disponibles à la consultation.

Les documents se déclinent par secteur et compilent les informations géologiques (formations sous forme de courbes d'égale épaisseur (isopaques), hydrogéologie, géomorphologie, phénomènes et géodynamiques), anthropiques (remblais, fortifications, carrières souterraines, ...) et géotechniques (propriétés physiques et mécaniques des différentes formations). Les cartes s'accompagnent d'une notice explicative faisant la synthèse par substrat géologique de statistiques simples obtenues de certains paramètres physiques et géomécaniques.

La région flamande met à disposition sur internet une base de données cartographiques recoupant entre autres toute la région de Bruxelles-Capitale (<https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/index.html>). Le site fournit des informations sur la topographie, la couverture géologique tertiaire ainsi qu'une série de documentation relative aux essais de sols (CPT), aux forages et captages.

4.2. ESSAIS SUR TERRAIN

4.2.1. FORAGE DE RECONNAISSANCE

La lithostratigraphie doit être précisément documentée au moyen de carottage. La profondeur de carottage est intimement liée à la profondeur de l'excavation prévue au projet. On recommande de poursuivre les forages de 1,5 à 2,5 fois la profondeur de l'excavation projet.

Les forages doivent permettre de décrire macroscopiquement les matériaux recoupés, d'identifier la présence de couche sensible (tourbe), de prélever des échantillons de sol en vue d'une caractérisation physique et/ou chimique.

Les trous de forages peuvent être équipés de puits ou piézomètres de diamètre utile à la réalisation ultérieure de tests hydrauliques.

Au terme des travaux de sondage, un premier modèle conceptuel partiel peut être construit.

4.2.2. MESURE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

4.2.2.1. Description préliminaire

Le modèle conceptuel établi sur base des profils de forages est complété par une analyse hydrologique locale. L'objectif vise à recenser les axes potentiellement drainants, les zones de recharge et décharge de la nappe et les dispositifs anthropiques d'acheminement des eaux et décharge.

4.2.2.2. Mesure du niveau statique de la nappe

Après mise à l'équilibre du piézomètre, le niveau piézométrique statique de la ou des nappes interceptées est mesuré à l'aide d'une sonde. Cette mesure fournit à un moment donné l'état d'équilibre statique de la nappe.

Pour plus d'information, l'évolution temporelle du niveau de nappe peut être appréhendée sur court à moyen terme à l'aide de sondes de mesures de pression (DIVER). Cette information peut être utile pour la détermination de l'amplitude de charge et décharge de la nappe.

4.2.2.3. Mesure de la conductivité hydraulique

Le design d'un réseau d'épuisement repose sur la détermination de la conductivité hydraulique de l'aquifère qui sera sollicité lors du travail d'épuisement.

Outre les données documentaires, il convient de mesurer à l'échelle locale le paramètre de perméabilité. Selon la perméabilité attendue de l'aquifère et l'espace de terrain qui sera sollicité, un slug test, un essai au puit ou test de pompage sera programmé.

L'information recueillie lors d'un essai de pompage est utilisée pour calculer les paramètres hydrodynamiques suivants : conductivité hydraulique, rayon d'action, capacité de stockage et porosité.

Sans entrer dans les détails de calcul d'hydraulique, le lecteur trouvera dans le tableau qui suit un rappel des principaux concepts mathématiques permettant de relier le débit de pompage au rabattement.

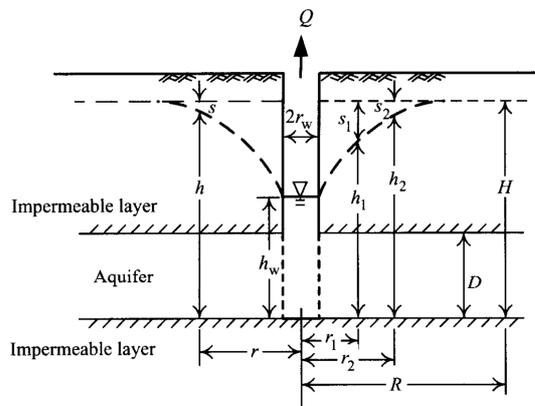
Le tableau ci-dessous décline la formule de calcul du débit pour les aquifères confinés et libres, pour un puits complet et incomplet.

TABEL 1. FORMULES DE CALCUL POUR DEBIT DE POMPAGE

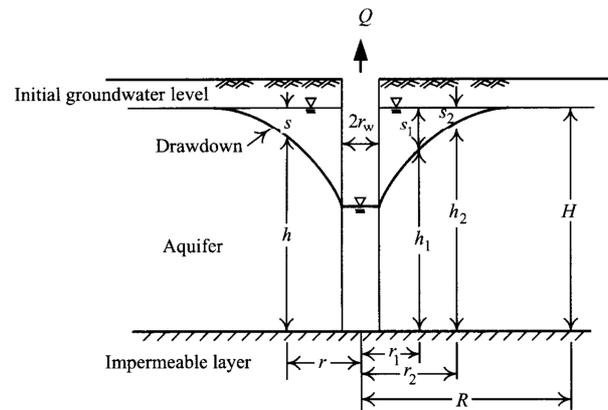
	Confined aquifer		Free aquifer	
	Full penetration well	Partial penetration well	Full penetration well	Partial penetration well
Nonequilibrium equation	Theis's equation: $s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ -0.5772 - \ln u - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n \times n!} \right\}$ Jacob's modified equation: $s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u)$ (Symbols are as shown in Figure 9.15)	—	If the drawdown induced by dewatering is far smaller than the thickness of the aquifer, Theis's and Jacob's equations can be used instead.	—
Equilibrium equation	Thiem's equation: $Q = \frac{2\pi kD(s_1 - s_2)}{\ln(r_2/r_1)}$ (Symbols are as shown in Figure 9.15)	Kozeny: $Q = \frac{2\pi T(H - h_w)}{\ln(R/r_w)} \mu$ $\mu = \frac{D_1}{D} \left(1 + 7\sqrt{\frac{r_w}{2D_1}} \cos \frac{\pi D_1}{2D} \right)$ (Symbols are as shown in Figure 9.19)	Dupuit-Thiem's equation: $Q = \frac{\pi k(h_2^2 - h_1^2)}{\ln(r_2/r_1)}$ (Symbols are as shown in Figure 9.20)	Hausman's suggestion: $Q = \frac{\pi k [H^2 - h_w^2] \alpha}{\ln(R/r_w)}$ $\alpha = \sqrt{\frac{H - D_1}{H}} \sqrt{\frac{H + D_1}{H}}$ (Symbols are as shown in Figure 9.21)

Les schémas de principe sont illustrés aux **Figures 14 et 15**.

Selon la nature des paramètres à déduire, le type de nappe et la construction du puits, le design du test de pompage sera choisi par l'expérimentateur.



Nappe confinée, puits complet



Nappe libre, puits incomplet

FIGURES 14 ET 15. SCHEMA CONCEPTUEL (HYDRAULIQUE DES SOLS, 1969)

4.2.3. MESURE DES PARAMETRES MECANIQUES

D'un point de vue physique, le terrain doit être documenté au minimum pour sa porosité, son indice de compression et sa granulométrie.

D'un point de vue lithologique et mécanique, les terrains peuvent être, entre autres, caractérisés par les données des CPTs (captages). Dans le cas de sites industriels, la consultation des archives internes mènent souvent à découvrir l'existence de tels essais réalisés antérieurement lors de la construction de nouvelles installations. L'essai fournit les valeurs de résistance à la pointe et la mesure du frottement latérale.

L'essai oedométrique est réalisé afin de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement d'un massif de sol. L'essai est réalisé en laboratoire sur un échantillon de sol non remanié d'un diamètre de 60 à 70 mm.

A défaut, l'expert peut estimer de manière indirecte l'indice de compression, C_c , à partir de la relation empirique suivante (Terzaghi et Peck, 1976) :

$C_c = 0,009 (WL-10)$, (WL : limite de liquidité) valable dans le cas des argiles normalement consolidées (WL-10 exprimée en %).

4.2.4. GEOPHYSIQUE

A l'échelle de site, la structure du sous-sol peut efficacement être cartographiée en trois dimensions au moyen d'essais géophysiques. La tomographie électrique et la réfraction sismique peuvent être envisagées pour un coût raisonnable comparativement à la somme des informations acquises.

La **Figure 16** présente une coupe géologique construite à partir du croisement entre la description des forages et les résultats d'un essai géophysique.

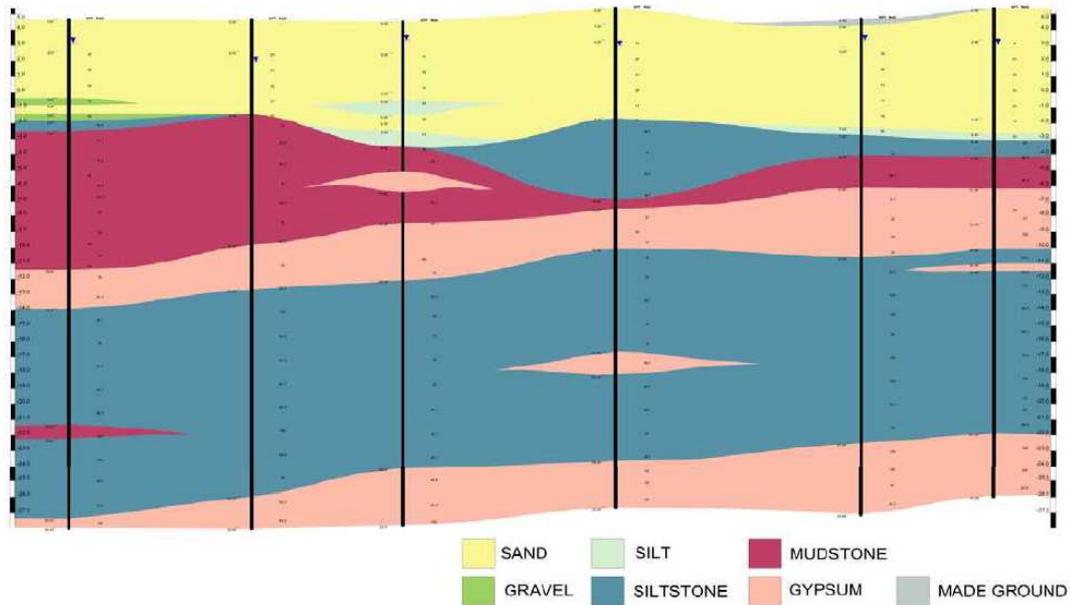


FIGURE 16. COUPE LITHOLOGIQUE CONSTRUITE A PARTIR D'ESSAIS DE SOL (WATERING GUIDELINES, 2014)

4.2.5. DETERMINATION DU GRADIENT HYDRAULIQUE INITIAL

La détermination du gradient n'est pas une donnée essentielle à la construction du design. Elle permet néanmoins de consolider le modèle conceptuel afin de s'assurer de la maîtrise de l'ensemble des éléments du milieu.

4.3. ANALYSE DU VOISINAGE

4.3.1. CAPTAGE

Le rayon d'action d'un épuisement est fonction de la géométrie de la fouille, du rabattement et de la conductivité de l'aquifère. Dans une formation perméable, plus la fouille est relativement grande et plus le rabattement est élevé, plus l'effet de l'épuisement se fera ressentir sur des ouvrages localisés dans un rayon proche (de 50 à 200 m).

La productivité de certains captages aux alentours peut donc être altérée de manière significative. Il convient dès lors de recenser précisément les ouvrages captant ainsi que leur utilisation.

4.3.2. SITE POTENTIELLEMENT POLLUE

Comme mentionné ci-avant, l'effet d'un épuisement peut se manifester par une mobilisation des eaux sur un large rayon d'action. La présence d'établissement polluant doit donc retenir l'attention du designer afin de ne pas capter et mobiliser un autre panache de pollution.

4.3.3. INFRASTRUCTURES

L'influence d'un groupe de puits ou d'une ligne de pointes filtrantes se fait généralement sentir dans une zone s'étendant bien au-delà du chantier proprement dit. Dans cette zone, le sol mis hors eau, du fait de l'abaissement de la nappe, n'est plus soumis à la pression d'Archimède. Il en résulte une augmentation des contraintes effectives transmises au sol sous-jacent.

Si ce dernier est compressible, l'augmentation se traduit par des tassements susceptibles d'endommager les constructions implantées dans la zone d'action du pompage. On montre facilement qu'un rabattement de nappe est surtout préjudiciable aux constructions légères de grande superficie, fondées sur semelles et s'appuyant sur un sol normalement consolidé ou légèrement surconsolidé. C'est pourquoi, l'exécution d'un rabattement de nappe, en *site urbain*, risque d'entraîner des dommages sérieux et doit faire l'objet d'une étude préalable. Il est nécessaire de déterminer :

- les caractéristiques de la nappe : surface piézométrique, alimentation perméabilité du sol ;
- les caractéristiques de compressibilité des différentes couches ;
- les caractéristiques des fondations des constructions : mode et niveau de fondation, taux de travail (à défaut nombre d'étages), distance au groupe de puits ou à la ligne de pointes filtrantes.

4.4. RECOMMANDATIONS

Selon le degré de risque géologique, de la proximité d'infrastructures, de la profondeur d'excavation et de la méthode de démergement, des recommandations peuvent être formulées quant aux données nécessaires et leur qualité :

- bilan hydraulique (résolution manuel ou modèle numérique) ;
- analyse des tassements (résolution manuel ou modèle numérique) ;
- nombre de forages de reconnaissance (les forages se prolongent à 1,5 et 2 fois la profondeur d'excavation) ;
- test en laboratoire (granulométrie, essai oedométrique) ;
- mesure de conductivité hydraulique (slug test ou test de pompage).

L'**Annexe 3** propose un tableau de recommandations appliqué par la municipalité d'Abu Dhabi et adapté par SITEREM. Bien que la région de Bruxelles-Capitale ne soit pas cartographiée en zone de sensibilité, il semble opportun, de par la géologie, de partir du principe que l'ensemble de la région bruxelloise se situe en zone sensible à hautement sensible.

5. MODELISATION

5.1. DEBIT DE POMPAGE

Le débit d'eau d'exhaure est calculé à partir du rabattement (donnée du projet), de la mesure de conductivité (mesure de terrain), du rayon équivalent de la fouille

$\frac{\sqrt{ab}}{\pi}$ ou ab sont respectivement la longueur et la largeur de l'excavation

et du rayon d'influence (calculé à partir de Sichardt) Kyrieleis, W., Sichardt, W. – Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten, Springer, Berlin, 1930

Le débit par canne de pompage est déterminé par le rapport entre le débit total et le nombre de cannes.

5.2. ESPACEMENT ENTRE CANNES

Le nomogramme suivant présente un outil pour la détermination de l'espacement entre cannes aspirantes dans des sables et graviers.

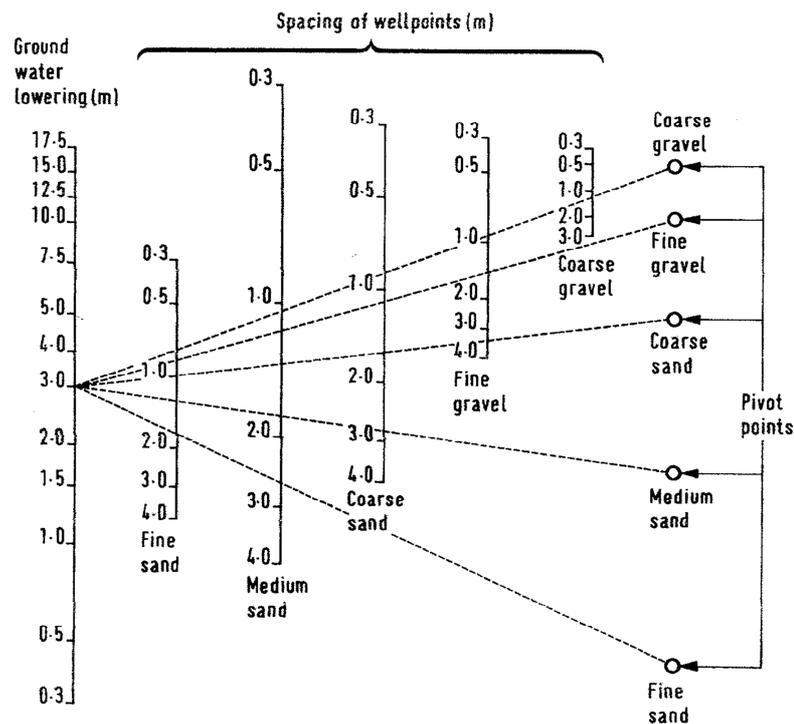


FIGURE 17. NOMOGRAMME (DEEP EXCAVATION, 2006)

5.3. ESTIMATION PREALABLE DES TASSEMENTS

Le calcul des tassements est obtenu à partir de l'équation de Terzaghi (sol non surconsolidé) :

$$\Delta S = Cc \times (hd - hwl) \times \log \left(\frac{\sigma' f xm}{\sigma' 0 xm} \right) / (1 + e)$$

Où

- Cc : indice de compression
- hd : profondeur de l'eau après rabattement
- hwl : niveau statique de la nappe avant rabattement
- σ'_{fxm} : contrainte effective après rabattement à x m de profondeur
- σ'_{0xm} : contrainte effective initiale à xm de profondeur
- e : indice des vides

L'estimation des tassements nécessite les données suivantes :

- le poids du sol saturé (γ_s KN/m³),
- le poids du sol sec (γ_d KN/m³),
- l'indice des vides (e),
- l'indice de compression (Cc),
- le rabattement,
- la puissance de l'aquifère.

A partir de l'équation de la surface de rabattement, il est possible d'établir les courbes d'isotassement en périphérie de la fouille. La superposition des courbes avec un plan d'implantation permet d'appréhender les risques pour le voisinage et de définir les mesures de réduction d'impact.

6. SUPERVISION ET CONTROLE

Selon le degré de risque géologique, de la proximité d'infrastructures, de la profondeur d'excavation et de la méthode de démergement, des recommandations peuvent être formulées quant aux paramètres à suivre durant les travaux d'épuisement :

- suivi des niveaux piézométriques (installation de 4 piézomètres périphériques) ;
- mesure de la turbidité, salinité et conductivité électrique de l'eau d'exhaure ;
- mesure des déformations en fond de fouille.

6.1. MONITORING PIEZOMETRIQUE

Le monitoring piézométrique doit débuter dès le début des travaux de pompage. La fréquence de monitoring est journalière voire automatique à l'aide de capteurs de pression. L'objectif est de contrôler la vitesse de rabattement et le tracé de la courbe de rabattement en fonction du temps jusqu'à l'équilibre.

6.2. SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU

La qualité de l'eau d'exhaure doit débuter dès le début des travaux de pompage. La fréquence de monitoring est journalière voire automatique à l'aide d'une sonde multi-paramètres avec stockage des données. L'objectif est de mesurer l'intensité de l'érosion et de la dissolution de sels constituant le squelette solide du sol.

Un dépassement de 50 NTU ou de la MES de 50 mg/l doit alerter l'entrepreneur d'une activité érosive inacceptable. Les mesures seront prises, par exemple, en diminuant la vitesse de rabattement.

6.3. RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE

Lorsque le rabattement maximal est atteint, il peut être nécessaire de contrôler de manière régulière l'évolution altimétrique du fond de fouille. Un appareillage automatisé est recommandé (niveau laser fixe ou borne GPS).

Toute tendance au soulèvement devra directement être prise en charge par des mesures adéquates (pompage, charge de fouille, ...).

7. CHECK-LIST A L'ATTENTION DES ENTREPRENEURS ET EXPERTS

Les « check-list » à destination des entrepreneurs et experts sont présentées dans les tableaux 1 et 2. Cette liste vise à aider les intervenants dans la rédaction des descriptifs des travaux, les estimations de coût et l'élaboration des cahiers de charge à destination des entrepreneurs.

Tableau 4. Check-list à l'intention des entrepreneurs

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux ...)	
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques du cahier des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif de collecte, prétraitement et finition (dimension, caractéristiques, localisation ...) Définition des quantités physiques: débits, pressions, dépressions, types de pompe.
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur.
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : rejets gazeux, rejet d'eau
Points de rejets	Points de rejet des eaux et des gaz traités issus du traitement identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan de santé et sécurité, et prévention de l'entrepreneur	
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte compte tenu de la présence de composés volatiles
	Risque d'éboulement ou claquage
	Risque pour le personnel du fait de risques de fuites et de débordements
	Risques d'accidents en général : chutes, incendie, électrocution
	Risques liés à l'intrusion sur le site de personnes non autorisées : vols, vandalisme et risque pour la santé
	Risques climatiques : gel des installations
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives (matériel électrique anti-déflagrant, équipement de protection individuel), y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnée des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes,
	Encombrement des voiries
	Stabilité des édifices avoisinants
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives. Par exemple, mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entré d'air dans les canalisations), mesure des tassements...
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning des interventions	
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle : fréquence bimensuelle minimum
	Planning des visites d'entretien
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation : défauts d'étanchéité
	Risque de colmatage des conduites et des filtres : chute des débits, des pressions et dépressions
	Epuisement prématuré des matériaux utilisés pour le traitement des gaz et de l'eau (charbon actif)
Mise en place de systèmes d'alarme, de mise en sauvegarde, et de mise à l'arrêt	
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des problèmes susceptibles de se produire : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Rapports de surveillance de l'expert	Prise en compte des rapports de suivi de l'expert et mise en place concertée des mesures correctives ou d'optimisation.

Tableau 5. Check-list à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux, ..)	
Polluants présents et/ou à traiter dans l'eau à pomper	Nature des polluants présents à traiter, teneurs et variations possibles des teneurs, présence d'une phase libre surnageante, évolution attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques de l'installation de traitement	Descriptif du dispositif de traitement (localisation, dimension, capacités ...) Définition des quantités physiques : débits, pressions, dépressions, T° ... Définition du mode d'opération : méthodologie de rabattement - Les prescriptions techniques sont-elles adaptées à la qualité et aux débits des eaux à traiter
	Mode de fonctionnement du dispositif : continu vs intermittent. Risques de colmatage. Actions correctives et d'optimisation possibles.
	Vérification a priori de la performance du dispositif : sur base des données disponibles, des tests de laboratoires,
Points de rejets	Points de rejet de l'eau et des gaz traités issus du traitement identifiés et compatibles avec les caractéristiques du site. Autorisations demandées et obtenues
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur. Les procédures prévues sont-elles en conformité avec les codes de bonne pratique et les autres recommandations de Bruxelles Environnement
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : transport des déchets dangereux (condensats), rejets gazeux,
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risque d'explosion dans les canalisations de collecte et la station de traitement du fait de la présence de composés volatiles
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de produits dangereux et/ou polluants
	Risques climatiques : gel des conduites et des installations
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnée des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux
Identification des nuisances possibles	Odeur et vapeurs dangereuses pour le voisinage en cas de fuites et pertes à partir des installations
	Bruit des équipements : pompes, groupes électrogènes,
	Encombrement des voiries
	Stabilité des infrastructures avoisinantes
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives
	Mise en place d'explosimètres, de systèmes d'alarme et de mise à l'arrêt et de sauvegarde (entré d'air dans les canalisations)
Planning et contenu des opérations de suivi et de validation	
Dispositif de suivi	Descriptif du dispositif de suivi : Débitmètres, manomètre au niveau des installations, identification des points de contrôle du rabattement
Paramètres du suivi	Mesures des débits d'eau, teneurs dans l'eau à traiter (variations et évolution), présence d'une phase libre, paramètres de turbidité. Mesure des déformations. Teneurs dans les eaux de rejets et les effluents gazeux.
Paramètres d'optimisation	Adaptation du dispositif à l'évolution du rabattement.
Rapportage	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la rédaction du rapport d'état des lieux

8. SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Geotechnical, geophysical and hydrogeological investigation project. Dewatering guidelines. Juillet 2014.
- Dewatering and groundwater control, 2004. US Army Corps Engineers
- Chang-Yu OU. Deep excavation, 2006.
- Procédé d'exécution et techniques de chantier. ECAM 2^{ème} Licence
- J. Patrick Powers, Arthur B. Corwin, Paul C. Schmall, Walter E. Kaeck. Construction Dewatering and Groundwater Control: New Methods and Applications, 3rd Edition. May 2007



9. ANNEXES

9.1. GEOLOGIE DE BRUXELLES

Résumé de la géologie en région Bruxelles-Capitale (Introduction générale à la géologie de Bruxelles, Christian SCHROEDER & Pierre GERARD, ULB, Journée d'étude SBGIMR – 22/02/2013) : couches subhorizontales (légère pente de quelques degrés vers le nord-est) avec couverture de dépôts quaternaires limoneux ou alluviaux.

De haut en bas (en utilisant les dénominations chronostratigraphiques) :

- remblais, présents presque partout, d'épaisseurs variables (0 à 12-14 m) ;
- dépôts quaternaires :
 - o alluvions de la vallée de la Senne (alm) argilo-sableuses, localement tourbeuses ;
 - o limons et cailloutis du Hesbayen et Campinien (q3 et q2) \approx 10 m d'épaisseur dans la plaine alluviale de la Senne (5 m sur les versants) ;
- formations de l'Eocène supérieur (Tertiaire) :
 - o Asschien et Wemmélien (As et We) (Maldegem), sables 0 à 6 m d'épaisseur ;
 - o Lédien (Le) (Lede), sables, parfois indurés en grès 0 à 18 m d'épaisseur ;
- formations de l'Eocène moyen (Tertiaire) :
 - o Laekenien (Lk) (Lede), sables et grès calcaires ;
 - o Bruxellien(B) (Lutétien) (Brussel), sables, parfois indurés en grès 0 à 44 m d'épaisseur, bonne tenue géotechnique, présence locale de concrétions silico-calcaires (disséminées en bancs presque continus) et parfois exploitées en carrières souterraines au-dessus du niveau de la nappe phréatique), possibilité de dissolution du ciment carbonaté ("boulance») ;
- formations de l'Eocène inférieur (Tertiaire) :
 - o Yprésien(Y) :
 - au sommet (Yd) (Tielt), sables très fins, verdâtres (glaucanie), argileux, avec lentilles d'argile ;
 - à la base (Yc) (Kortrijk), argiles parfois sableuses, parfois plastiques de 50 à 70 m d'épaisseur dans leur entièreté à l'Est.
 - o Landénien(L) (Thanétien) (Tienen (L2) et Hannut (L1)), sables et argiles de 40 à 60 m d'épaisseur ;
- formations du Crétacé (Secondaire), Craies du Campanien (Cp3), sommet situé à la cote - 65 à - 80 m ;
- formations du Cambrien (Primaire) Devillien, phylladeux à quartzo – phylladeux, sommet situé vers la cote – 90.

9.2. RAPPORT DE PROJET DE DEMERGEMENT

- Objectif (adresse, circonstance, maître d'ouvrage, ...)
- Description géologique et hydrogéologique du site
- Description géotechnique
- Description du voisinage
- Sélection de la méthode d'épuisement
- Synthèse des paramètres utilisés pour le calcul de la capacité de pompage et des tassements

Paramètres	Valeur	Justifications
Longueur de l'excavation		Selon projet
Largeur de l'excavation		Selon projet
Niveau piézométrique de la nappe (statique)		Mesure de terrain
Profondeur de l'excavation		Selon projet
Profondeur de rabattement		0,5 m sous le niveau bas de l'excavation
Rabattement requis		Niveau piézométrique retranché de la profondeur de rabattement
Perméabilité		Documentation ou mesure
Poids des matériaux saturé		Documentation ou mesure
Poids des matériaux déjaugés		Documentation ou mesure
Indice des vides		Documentation ou mesure
Indice de compression		Documentation ou mesure

- Développement de la solution analytique
- Description du design
- Evaluation des impacts potentiels
- Moyens mis en œuvre pour limiter les impacts
- Suivi et contrôle requis

9.3. ARBRE DECISIONNEL

Classe de sensibilité du site (géologie)	A	Très sensible
	B	Moyennement sensible
	C	Peu sensible
Proximité d'infrastructure	1	Sensible
	2	Potentiel
	3	Aucune infrastructure
Profondeur d'excavation	Peu profond	0-3 m
	Moyen	3 m-10 m
	Profond	>10 m
Moyens mis en oeuvre	i	Puisard
	ii	Confinement/coffrage
	iii	Puits et cannes aspirantes



Classe de sensibilité		Proximité d'infrastructures	Moyens d'épuisement	Profondeur d'excavation	Etude hydraulique	Etude des tassements	Forage de reconnaissance	Test en labo	Mesure de terrain	Piézométrie, turbidité, salinité, CE	Contrôle déformation	
C	1,2		i	Peu profond	A	A	X	Recommandé	-			
			i, ii, iii	Moyen	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
				Profond	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
	3		i	Peu profond	A	A	X	Recommandé	-			
			i, ii, iii	Moyen	A	A	X	Recommandé	Slug Test			
				Profond	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
B	1,2		i	Peu profond	A	A	X	Recommandé	Slug Test			
			i, ii, iii	Moyen	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
				Profond	B	B	X	Recommandé	Pumping Test	*	*	
	3		i	Peu profond	A	A	X	Recommandé	-			
			i, ii, iii	Moyen	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
				Profond	A	B	X	Recommandé	Slug Test	*	*	
A	1,2		i	Peu profond	B	A	X	Recommandé	Slug Test			
			ii, iii		B	A	X	Recommandé	Slug Test			
			i, ii, iii	Moyen	B	B	X	Recommandé	Pumping Test	*	*	
				Profond	B	B	X	Recommandé	Pumping Test	*	*	
	3			i	Peu profond	A	A	X	Recommandé	Slug Test		
				ii, iii		A	A	X	Recommandé	Slug Test		
				i	Moyen	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*	*
						ii, iii	A	A	X	Recommandé	Slug Test	*
		i	Profond		B	B	B	X	Recommandé	Pumping Test	*	*
					ii, iii	B	B	X	Recommandé	Pumping Test	*	*

A Modèle de résolution simple

B Réalisation d'une modélisation numérique

X Pour une superficie d'excavation de moins de 1000m³, il est recommandé de réaliser 3 forages de reconnaissance dont deux jusqu'à 1,5 fois la profondeur de la fouille et 1 jusqu'à 2 fois la profondeur de la fouille.

Test en labo : un échantillon par couche géologique au minimum est recommandé (essai oedométrique, porosité, granulométrie)

* Mesures recommandées

Piézométrie: installation d'un réseau de surveillance de 4 piézomètres aux quatre coins cardinaux de la fouille.