

Dimensionnement d'ouvrages d'infiltration d'eau pluviale : comparaison de différents types d'essais et méthodes d'interprétation

Auteur : Varisano, Luca

Promoteur(s) : Brouyère, Serge

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18196>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT ARGEnCo

Dimensionnement d'ouvrages d'infiltration d'eau pluviale : comparaison de différents types d'essais et méthodes d'interprétation

Auteur :
LUCA VARISANO

Travail de fin d'études réalisé en vue de
l'obtention du grade de master "Ingénieur
Civil des Mines et Géologue, à finalité
spécialisée en Géologie de l'ingénieur et de
l'Environnement".

Promoteur académique :
SERGE BROUYERE,
ULIÈGE
Promoteur industriel :
BENJAMIN GERARD,
RAISÔ

Année académique 2022-2023

Table des matières

Annexes	1
A Équations établissant $K(\theta)$	1
B Modèle de Green et Ampt (1911)	1
C Équations de Philip (années 1950) : imbibition et infiltration en régime transitoire	3
D Infiltromètre à tension	5
E Bassin d'infiltration à Saint-Georges-sur-Meuse	7

Annexes

A Équations établissant $K(\theta)$

Plusieurs modèles mathématiques permettent de caractériser la conductivité hydraulique en zone vadose $K(\theta)$:

— van Genuchten-Mualem (le plus utilisé) :

$$K(\theta) = K_s \theta_e^B \left[1 - \left(1 - \theta_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2, \quad \text{où} \quad \theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m$$

et avec K_s la conductivité hydraulique à saturation, θ_e la saturation effective, θ_s la teneur en eau à saturation, θ_r la teneur en eau résiduelle, B un paramètre empirique souvent égal à 0,5, α un paramètre lié à la pression d'entrée d'air, $n \geq 1$ un coefficient adimensionnel lié à la distribution de la taille des pores et $m = 1 - \frac{1}{n}$ le coefficient adimensionnel de Mualem (Mualem, 1976 & van Genuchten, 1980).

— Brooks et Corey :

$$K(\theta) = K_s \theta_e^{\frac{2+3\beta}{\beta}}, \quad \text{où} \quad \theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^\beta$$

et avec K_s la conductivité hydraulique à saturation, θ_e la saturation effective, θ_s la teneur en eau à saturation, θ_r la teneur en eau résiduelle, ψ_a la charge matricielle au point d'entrée d'air et β un paramètre empirique (Brooks & Corey, 1964).

B Modèle de Green et Ampt (1911)

Lors du processus d'infiltration dans un sol depuis la surface, la distribution verticale de la teneur en eau θ en un point donné varie dans le temps car le front d'humectation progresse en profondeur (Fig. 1, à gauche). En faisant l'hypothèse que le profil initial de teneur en eau est uniforme et que l'écoulement est unidirectionnel vertical, 3 zones sont identifiables à chaque instant (Javaux *et al.*, 2021) :

- une zone saturée au-dessus du front d'humectation,
- une zone où la teneur en eau est variable au voisinage du front,
- une zone en-dessous du front et qui est encore à la teneur en eau initiale.

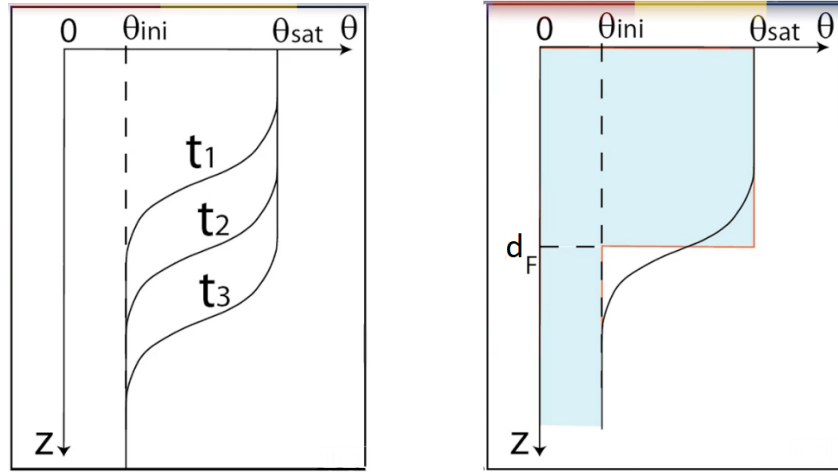


FIGURE 1 – Évolution réelle (à gauche) et simplifiée (à droite) de la teneur en eau avec la profondeur lors de l'infiltration (Javaux *et al.*, 2021).

Cette distribution continue peut être simplifiée en 2 zones : l'une saturée où $\theta = \theta_s$ et l'autre non saturée où $\theta = \theta_{init}$, abruptement séparées par la zone de transition d'épaisseur nulle (Fig. 1, à droite). Ce plan de séparation se situe à une profondeur d_f telle que le bilan de masse est respecté. Dans les zones saturée et non saturée respectivement, la loi de Darcy et de Buckingham-Darcy permettent de décrire les écoulements. Pour pouvoir utiliser la loi de Darcy au niveau du front d'infiltration où toutes les valeurs de charges matricielles intermédiaires coexistent dans cette zone d'épaisseur nulle, Green et Ampt approximent la valeur de la charge matricielle sur la ligne de front ψ_f par une moyenne pondérée par la valeur de la conductivité hydraulique (Javaux *et al.*, 2021) :

$$\psi_f = \frac{-1}{K_s} \int_{\psi_{init}}^0 K(\psi) d\psi.$$

Cette charge de front reste constante tout au long de l'infiltration car son expression est indépendante du temps.

Avec la forme exponentielle de la conductivité hydraulique proposée par Gardner (1958), la charge de front s'écrit alors $\psi_f = \frac{-1}{\alpha}$.

Comme le montre la Figure 1.17 du document principal, la décroissance exponentielle est plus rapide pour un sol grossier, avec par conséquent un paramètre empirique α plus grand et une succion de front plus faible. Les sols fins auront, inversement, des grandes valeurs de succion de front. On remarque que les sols à granulométrie fine compensent partiellement leur faible conductivité hydraulique par des effets capillaires forts (Javaux *et al.*, 2021).

La loi de Darcy peut maintenant être utilisée entre la surface et le front. L'infiltrabilité i (m/s), c'est-à-dire le flux maximal que le sol peut laisser entrer au temps t , est exprimée comme ceci, l'axe de la coordonnée spatiale z étant dirigé vers le haut et son origine se trouvant à la surface du sol :

$$i = -K_s \nabla H = -K_s \frac{(\psi_f + d_f) - (\psi_{surf} + d_{surf})}{d_f - d_{surf}} = -K_s \frac{\psi_f + d_f}{d_f},$$

avec $d_f(t)$ la profondeur du front d'infiltration (m) qui dépend du temps. Aux temps courts, d_f et i tendent, respectivement, vers 0 et vers l'infini et aux temps longs, vers l'infini et vers K_s .

Lors des tests d'infiltration, le sol est soumis à une condition limite de charge en surface qui satisfait l'infiltrabilité de sorte que le flux d'infiltration $q = i$. Il y a assez d'eau disponible en surface que pour atteindre le flux maximal i . On peut alors combiner les équations du flux i et de la lame infiltrée cumulée I pour obtenir la solution implicite suivante (Javaux *et al.*, 2021) :

$$\begin{cases} i = -K_s \frac{\psi_f + d_f}{d_f} \\ I = d_f \Delta\theta \end{cases} \Rightarrow K_s = \frac{\Delta\theta}{t} \left(d_f + \psi_f \ln \left(1 - \frac{d_f}{\psi_f} \right) \right).$$

C Équations de Philip (années 1950) : imbibition et infiltration en régime transitoire

L'imbibition est le phénomène d'invasion du sol par l'eau en configuration horizontale.

Une colonne de sol horizontale à teneur en eau initiale uniforme et non saturée et soumise à une pression d'eau à l'une de ces extrémités se sature selon une loi de diffusion :

$$I = S\sqrt{t}$$

avec I la lame imbibée cumulée (m) et S la sorptivité capillaire ($\text{m/s}^{\frac{1}{2}}$) qui caractérise la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité.

Comme le montre la Figure 2, au début le processus est rapide, à cause du gradient fort entre la position $x=0$ et la position du front d'imbibition, puis il ralentit quand le front s'éloigne et que le gradient diminue. Plus le front d'imbibition s'éloigne de la source d'eau, plus le flux d'infiltration diminue pour finalement tendre vers zéro (Javaux *et al.*, 2021).

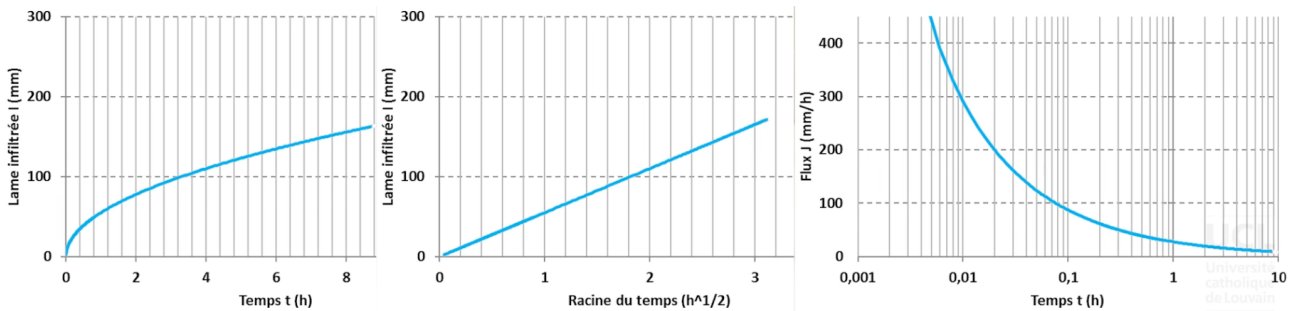


FIGURE 2 – Processus d'imbibition : la lame imbibée cumulée en fonction du temps (à gauche) et en fonction de la racine carrée du temps (au centre) et le flux d'imbibition (à droite ; Javaux *et al.*, 2021).

Comme le montre la Figure 3, la sorptivité dépend de la teneur en eau initiale : plus le terrain est sec, plus le front d'imbibition se déplace vite et plus la quantité d'eau imbibée est grande.

La sorptivité capillaire S dépend de la charge hydrostatique h appliquée, comme suit (White & Sully, 1987) :

$$S(h) = \sqrt{1 + 2b\alpha h} S_0, \quad \text{avec} \quad S_0 = \sqrt{\frac{\phi_m \Delta\theta}{b}}$$

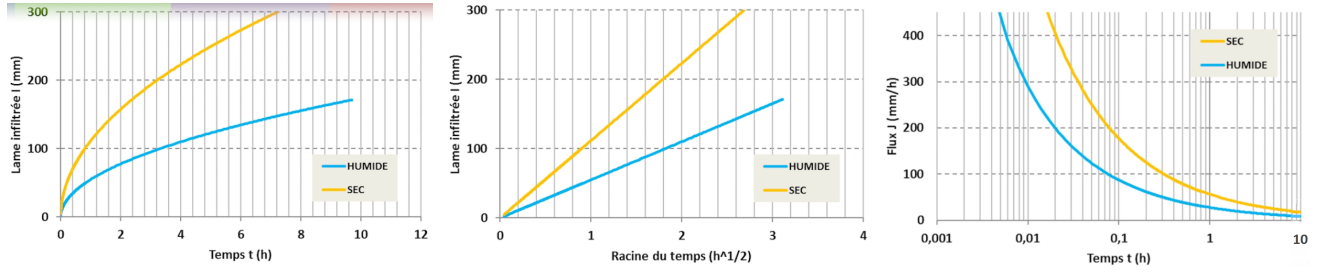


FIGURE 3 – Influence de la teneur en eau initiale sur le processus d'imbibition : la lame imbibée cumulée en fonction du temps (à gauche) et en fonction de la racine carrée du temps (au centre) et le flux d'infiltration (à droite ; Javaux *et al.*, 2021).

et où α est le paramètre empirique de Gardner (m^{-1}), b un paramètre adimensionnel généralement choisi égal à 0,55 (moins de 10% d'erreur commise), S_0 la sorptivité du sol pour une charge nulle ($\text{m/s}^{\frac{1}{2}}$), ϕ_m le potentiel d'écoulement ou potentiel de Kirchhoff (m^2/s) et $\Delta\theta$ la variation de teneur en eau (-).

L'infiltration est le phénomène d'invasion du sol par l'eau en configuration verticale, la gravité est alors à prendre en compte.

Pour le même problème mais avec une colonne verticale, la solution de Philip est une série divergente en $t^{\frac{1}{2}}$ dont les premiers termes sont :

$$I = St^{\frac{1}{2}} + (A_2 + K_{init})t + A_3t^{\frac{3}{2}} + A_4t^{\frac{5}{2}} + \dots$$

avec I la lame infiltrée cumulée (m) et K_{init} la conductivité hydraulique initiale (m/s) qui est généralement négligeable.

En pratique, seuls les deux premiers termes sont pertinents :

$$I = S\sqrt{t} + At, \quad \text{avec} \quad \frac{K_s}{3} \leq A \leq \frac{2K_s}{3}$$

et où A est une constante liée à la conductivité hydraulique du sol à saturation K_s . Haverkamp *et al.* (1994) ont développé une solution plus complète pour caractériser A :

$$A = \frac{\gamma S^2}{r\Delta\theta} + \frac{2-\beta}{3}K_s,$$

avec β un paramètre de forme compris entre 0,5 et $\frac{\pi}{4}$ (-), γ un paramètre compris entre 0,6 et 0,8 (-), $\Delta\theta$ la variation de teneur en eau (-) et r le rayon de la section d'écoulement (m).

Cette équation a cependant un comportement incohérent aux temps longs, au delà du temps gravitaire : lorsque l'effet de la gravité prend le dessus sur l'effet capillaire (Fig. 4). En effet, au temps infini, le flux d'infiltration tend vers le coefficient A alors qu'il devrait tendre vers la conductivité hydraulique à saturation K_s :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(q = \frac{dI}{dt} \right) = A.$$

Seul le régime transitoire peut être décrit grâce à cette équation. Elle ne permet pas de caractériser le flux après le temps gravitaire t_{grav} et au voisinage de la stabilisation :

$$t_{grav} \approx \left(\frac{S}{K_s} \right)^2$$

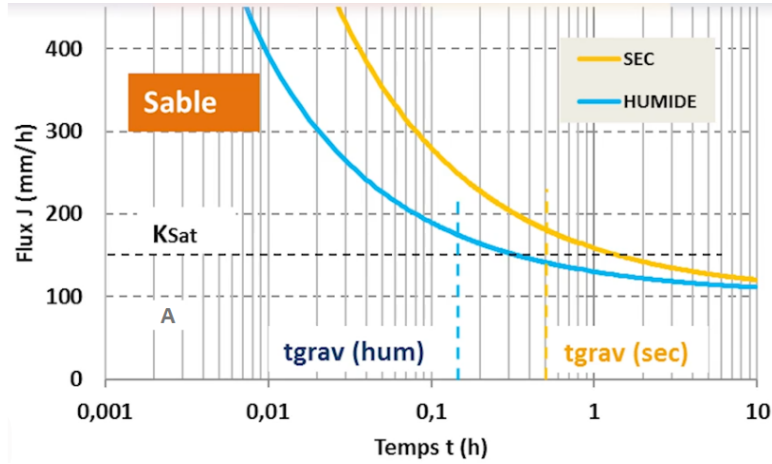


FIGURE 4 – Flux d'infiltration à travers un sable initialement humide ou sec (Javaux *et al.*, 2021).

D Infiltromètre à tension

L'infiltromètre à disque est une méthode de prise de mesure *in situ* (Fig. 5). Il est composé d'une membrane circulaire limitée en bas par une toile de nylon dont les pores sont de l'ordre de $20 \mu m$, d'un vase de Mariotte destiné à régler la tension et d'un réservoir d'alimentation. Son principe de fonctionnement consiste à mettre l'eau à une pression légèrement inférieure à la pression atmosphérique pour imposer une condition limite en tension sur la surface de contact. Son utilisation nécessite un sol homogène, une surface horizontale et une teneur en eau initiale uniforme et pas trop grande (Javaux *et al.*, 2021).

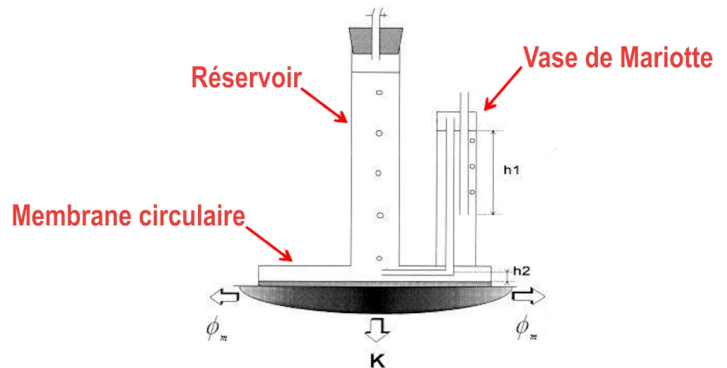


FIGURE 5 – Infiltromètre à disque en un seul bloc (Javaux *et al.*, 2021).

Travaillant en dépression, la mise en place de l'instrument est cruciale car il faut assurer un bon contact hydraulique entre le sol et l'embase du disque pour répartir la succion de manière homogène. Les différentes étapes sont (Javaux *et al.*, 2021) :

- la mise à nu du sol sans le déstructuré (ramassage des feuilles, découpe des herbes, ...),
- la création d'une couche de contact de 0,5 mm d'épaisseur avec du sable fin ayant une granulométrie comprise entre 100 et 200 μm . Il est important que cette surface de contact soit identique à la surface du disque.

Il faut ensuite remplir le réservoir de l'infiltromètre par aspiration avant de placer l'instrument sur la couche de sable.

Avant de toucher le sable, l'appareil maintient l'eau en tension car le réservoir est fermé par le haut et la membrane est assez fine pour être étanche à l'air. Une fois en contact avec un milieu poreux et non saturé, l'eau s'écoule à travers la membrane car un effort de succion est apporté par effet capillaire. Le flux mesuré, variation de la hauteur d'eau dans le réservoir par unité de temps, décroît de plus en plus au cours de l'essai car le front d'infiltration passe du sable de contact au sol lui-même et parce que l'effet capillaire décroît avec la profondeur du front (Javaux *et al.*, 2021).

La prise de mesure s'arrête une fois que les valeurs se stabilisent. On est en régime permanent et on peut les interpréter avec l'équation de Wooding. Un moyen de déterminer les 2 inconnues de cette équation : K_s et α , est l'application de différentes succions successives en un même point (méthode multi-potentiels). En général, 4 à 5 charges sont appliquées les unes après les autres, de manières croissantes pour éviter les problèmes d'hysteresis (courbes de rétention différentes pour l'imbibition et le drainage) : par exemple -15, -10, -6, -3, -1 cm. Pour une précision optimale de cette méthode, il faut que le sol soit verticalement homogène. Pour un sol présentant une forte stratification verticale, il faut privilégier la méthode multi-rayons (Javaux *et al.*, 2021).

La représentation des résultats sur un graphique semi-logarithmique $(\psi, \log(q))$ est linéaire et permet de déterminer α en calculant la pente de la droite ainsi que K_s en calculant l'ordonnée à l'origine. En effet, l'équation de Wooding peut se réécrire comme suit :

$$\log(q(\psi)) = 0,4343 \alpha \psi + \log \left[K_s \left(1 + \frac{4}{\pi R \alpha} \right) \right].$$

Au voisinage de la saturation, lorsque ψ s'approche de 0, il n'est pas rare de remarquer une rupture de pente de la droite $(\psi, \log(q))$ qui montre une augmentation de la valeur du coefficient α . Cette discontinuité dans la pente de la relation $K(\psi)$ renseigne sur la distribution de la taille des pores participant à l'écoulement (λ_m) et sur l'effet du travail du sol et des racines de la végétation.

E Bassin d'infiltration à Saint-Georges-sur-Meuse



FIGURE 6 – Vue sur le côté est du bassin et la bouche d'alimentation en eau ainsi que sur la voirie et le parking.



FIGURE 7 – Même vue que sur la Figure 6 mais depuis le fond du bassin, au niveau de la bouche d'alimentation.

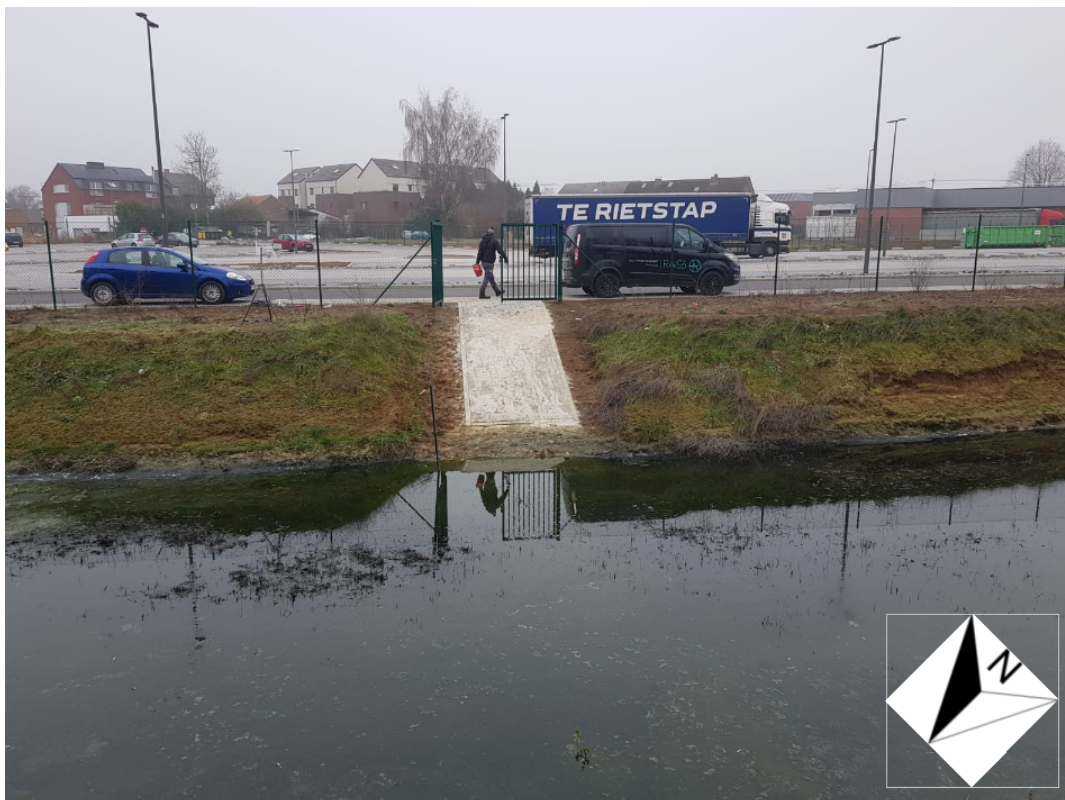


FIGURE 8 – Vue sur le centre du bassin, l'allée y menant ainsi que la voirie et le parking.



FIGURE 9 – Vue sur le côté ouest du bassin, la voirie et le parking.



FIGURE 10 – Vue sur l'allée, le côté est du bassin et la station météo.

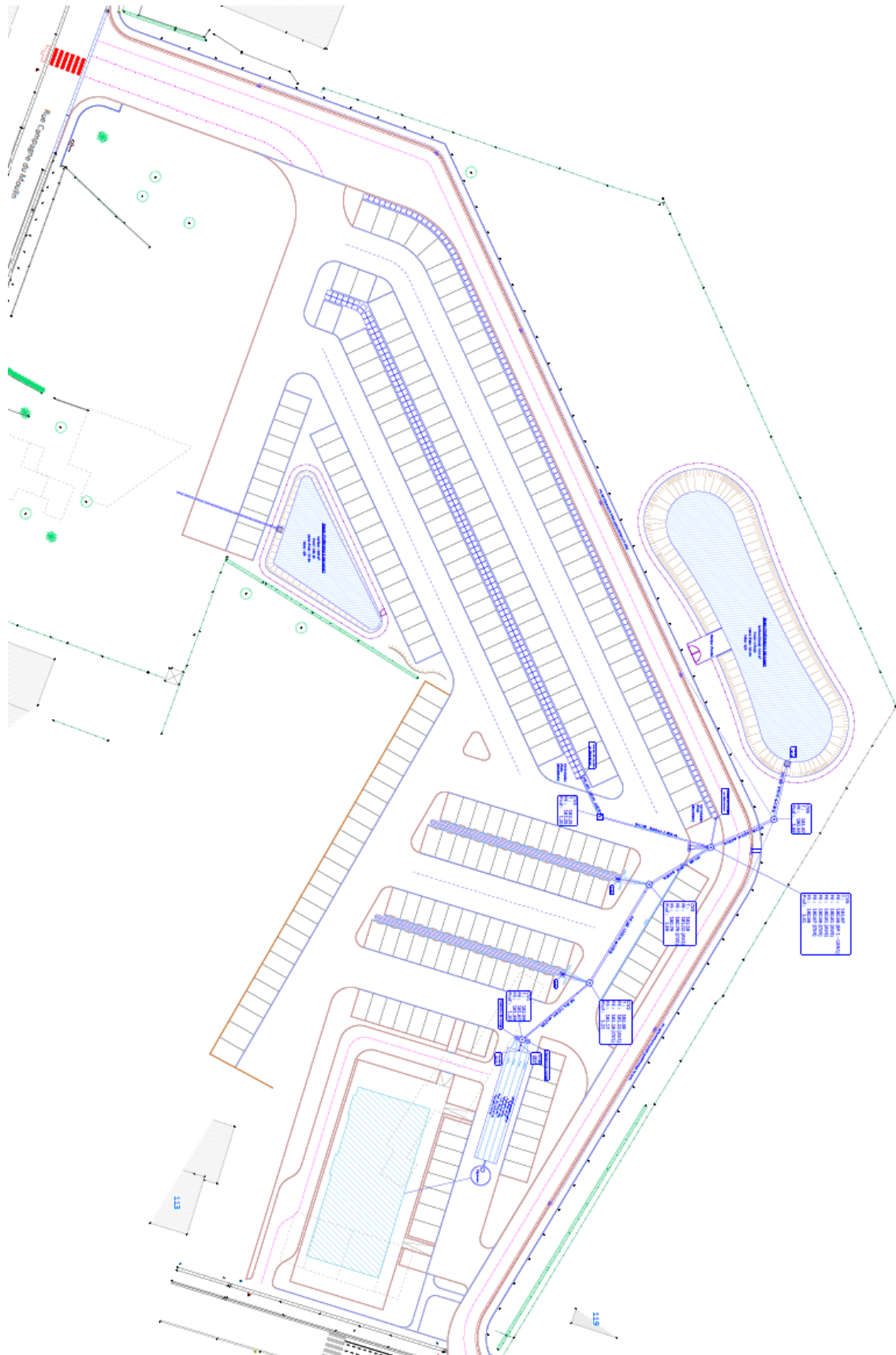


FIGURE 11 – Plan du projet de création d'un parking et d'une voirie à l'origine de l'étude de faisabilité de gestion de l'eau pluviale.