Construction d'un réseau d'écoulement par méthode graphique

On distinguera les écoulements confinés pour lesquels la ligne phréatique (surface supérieure de l'eau dans le sol) est connue (par exemple écoulement sous des palplanches), et les écoulements non confinés dans lesquels la ligne phréatique est inconnue au départ et doit être déterminée par une construction ou un calcul (cas d'un écoulement à travers un barrage en terre).

Les règles à appliquer sont les suivantes (fig. 1) :

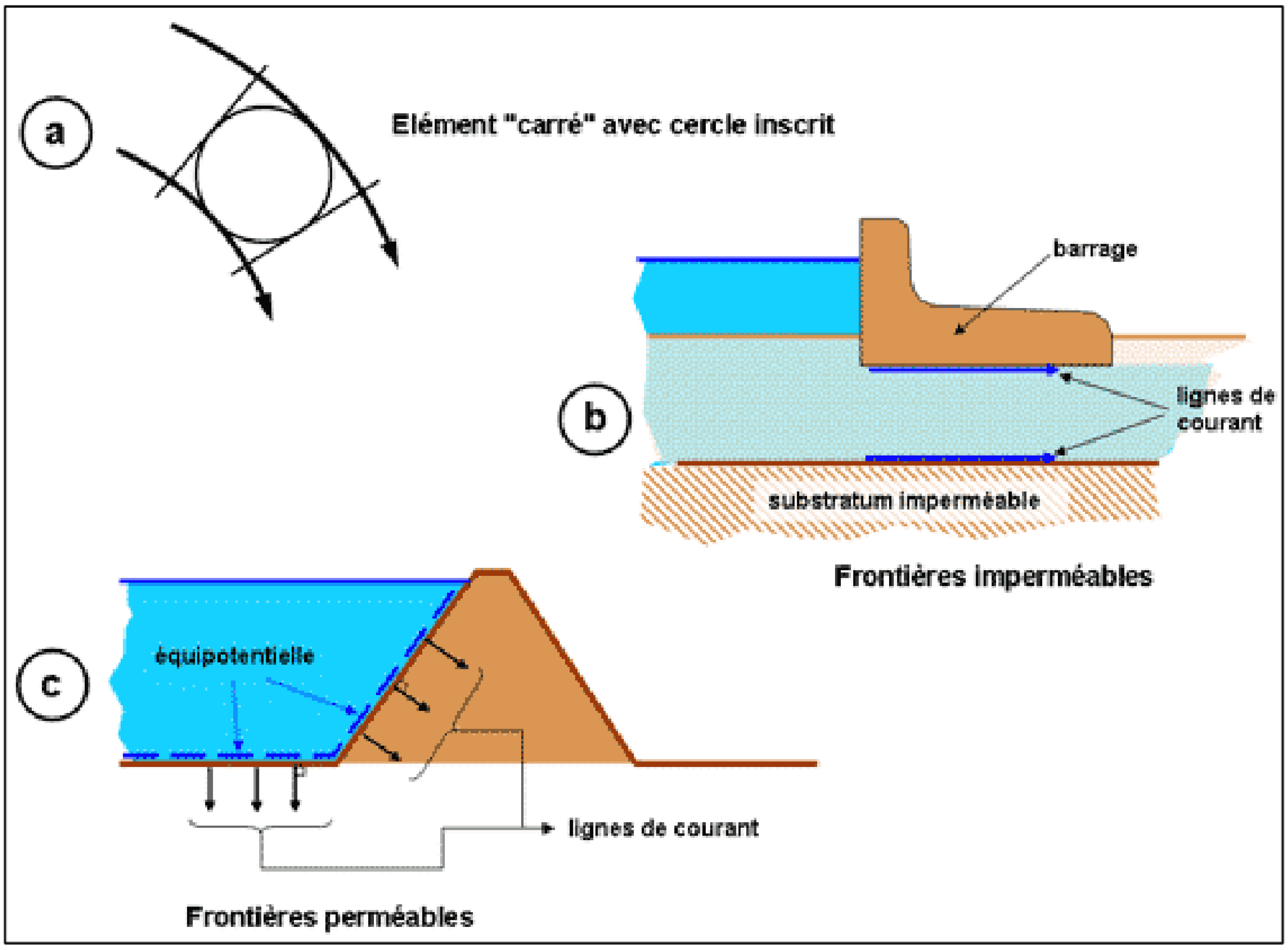


Figure 1 : Quelques règles pour la construction d'un réseau d'écoulement.

- équipotentielles et lignes de courant sont perpendiculaires ;
- forme des éléments de base : il convient de faire en sorte que ces éléments soient les plus proches d'un carré, avec si possible un cercle inscrit (fig. 1.a) ;
- définition des limites imperméables : ce sont des lignes de courant (fig. 1.b), exemple d'une couche d'argile ou de la base d'un barrage en béton ;
- définition des limites perméables : quand un sol perméable est en contact avec le niveau extérieur de l'eau, cette limite constitue une ligne équipotentielle : par exemple, infiltration dans le sol à l'amont d'un barrage ou à travers un barrage en terre (fig. 1.c). Il faut noter que cette ligne (surface) phréatique n'est pas connue a priori : elle peut être construite comme on le verra dans les barrages en terre par exemple ;
- contact entre deux sols de perméabilité différente : les changements de direction des lignes de courants;
- dans le cas d'un sol de perméabilité anisotrope, on construira les réseaux d'écoulement avec une transformation d'échelle : on garde l'échelle verticale et on multiplie l'échelle horizontale par : $\sqrt{k_v/k_h}$

La figure 2 donne un exemple de construction de réseau d'écoulement dans le cas d'une coupure étanche partielle avec un sol à perméabilité homogène et isotrope. L'écoulement est restreint à une couche de sable.

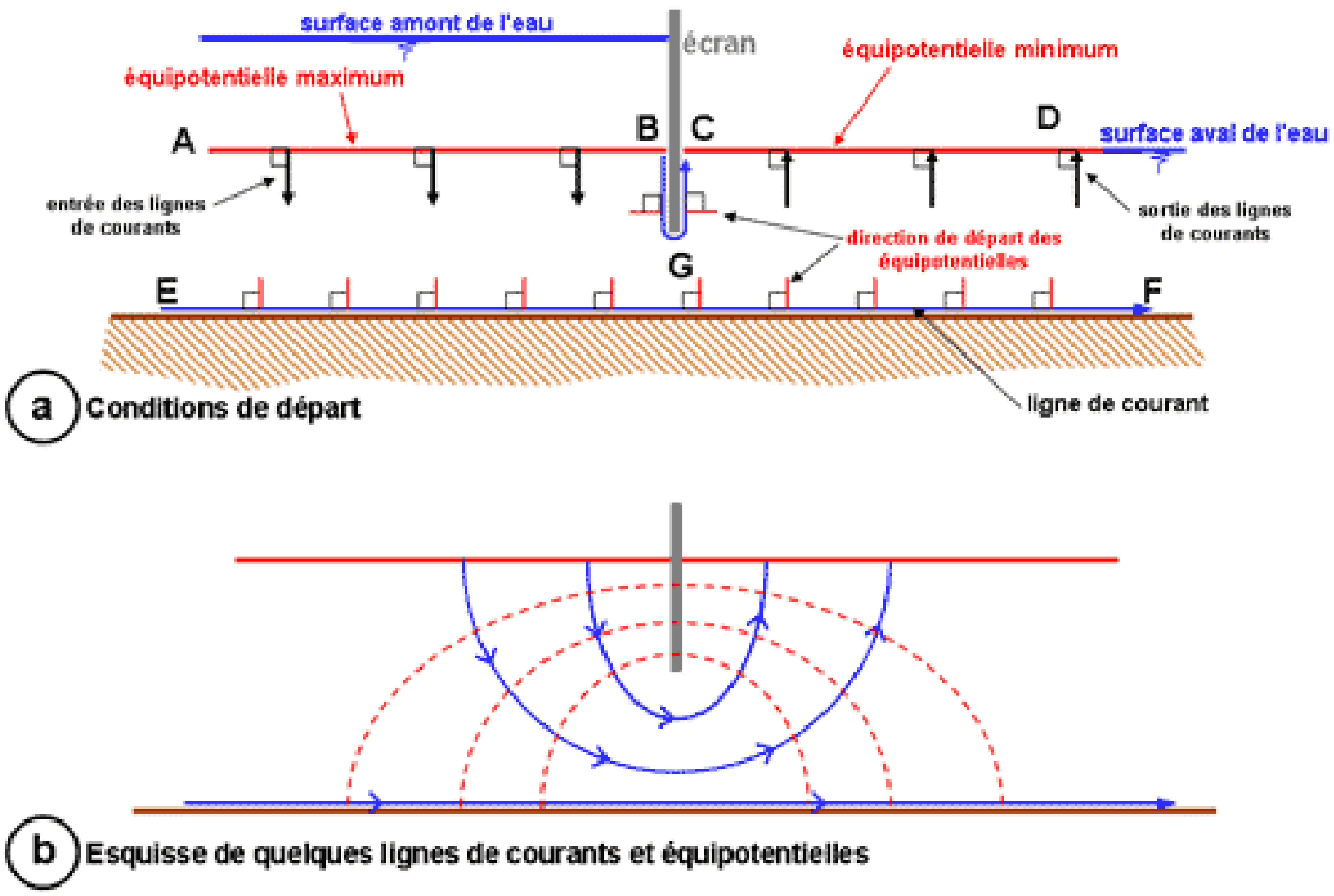


Figure 2 : Exemple de construction graphique d'un réseau d'écoulement

Les conditions imposées sont les suivantes (fig. 2.a) :

- Ligne AB : équipotentielle maximum ;
- Ligne CD : équipotentielle minimum ;
- Ligne EF : base imperméable : ligne de courant la plus longue ;
- Ligne BGC : coupure verticale : ligne de courant la plus courte.

Suivant ces indications de départ, on peut noter que les lignes de courant sont à l'entrée perpendiculaires à AB et à la sortie perpendiculaires à CD. Quant aux équipotentielles, elles sont perpendiculaires à EF et à BGC.

A partir de ces constatations initiales, on peut esquisser le réseau et en respectant les règles de construction définies ci-dessus, le terminer.

Une fois le réseau construit, on peut l'utiliser (avec un réseau bidimensionnel on considère des éléments de largeur unité). Si l'on note $\mathbf{n_f}$ le nombre total de « tubes » d'écoulement et $\mathbf{n_d}$ le nombre d'équipotentielles franchies, on peut calculer le débit total à travers le dispositif :

$$Q = kh \frac{nf}{nd}$$

Réseau d'écoulement et stabilité aval d'un rideau de palplanches

On peut noter sur la figure 2 que, à gauche de l'écran étanche (amont), on a un écoulement vertical descendant, donc les forces d'écoulement vont accroître la contrainte effective proportionnellement à i, alors qu'à droite, l'écoulement sera vertical ascendant donc la contrainte effective diminue.

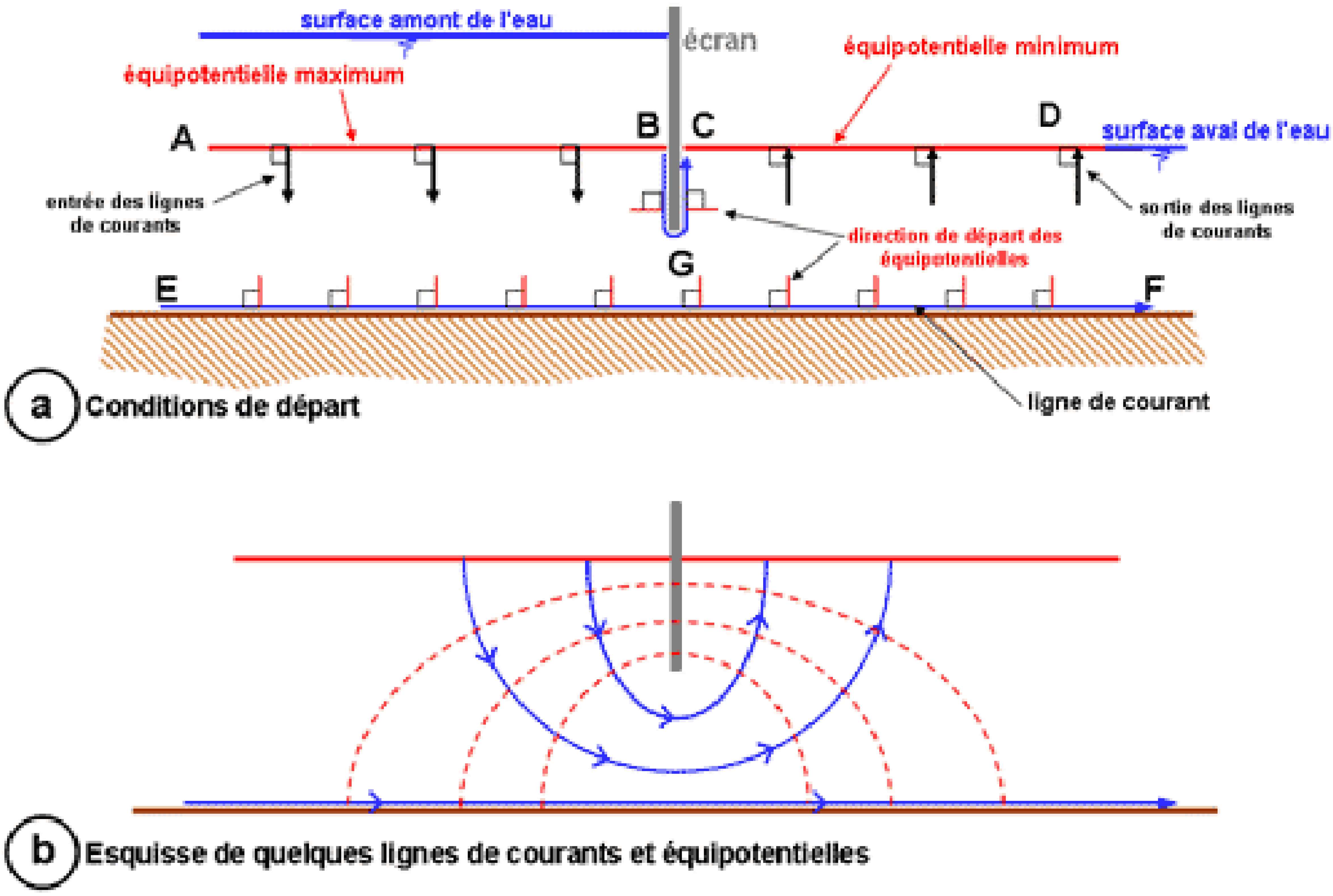


Figure 2 : Exemple de construction graphique d'un réseau d'écoulement

Cela conduit à considérer dans le cas des rideaux de palplanches le problème de la stabilité-aval des terrains du à l'écoulement. Sur la figure 3, on a représenté la partie de réseau d'écoulement correspondante. On appelle d l'encastrement de la palplanche aval, et on considère le prisme ABCD de sol de hauteur d et de largeur **d/2** susceptible d'arriver à la « rupture » sous l'effet du soulèvement hydraulique.

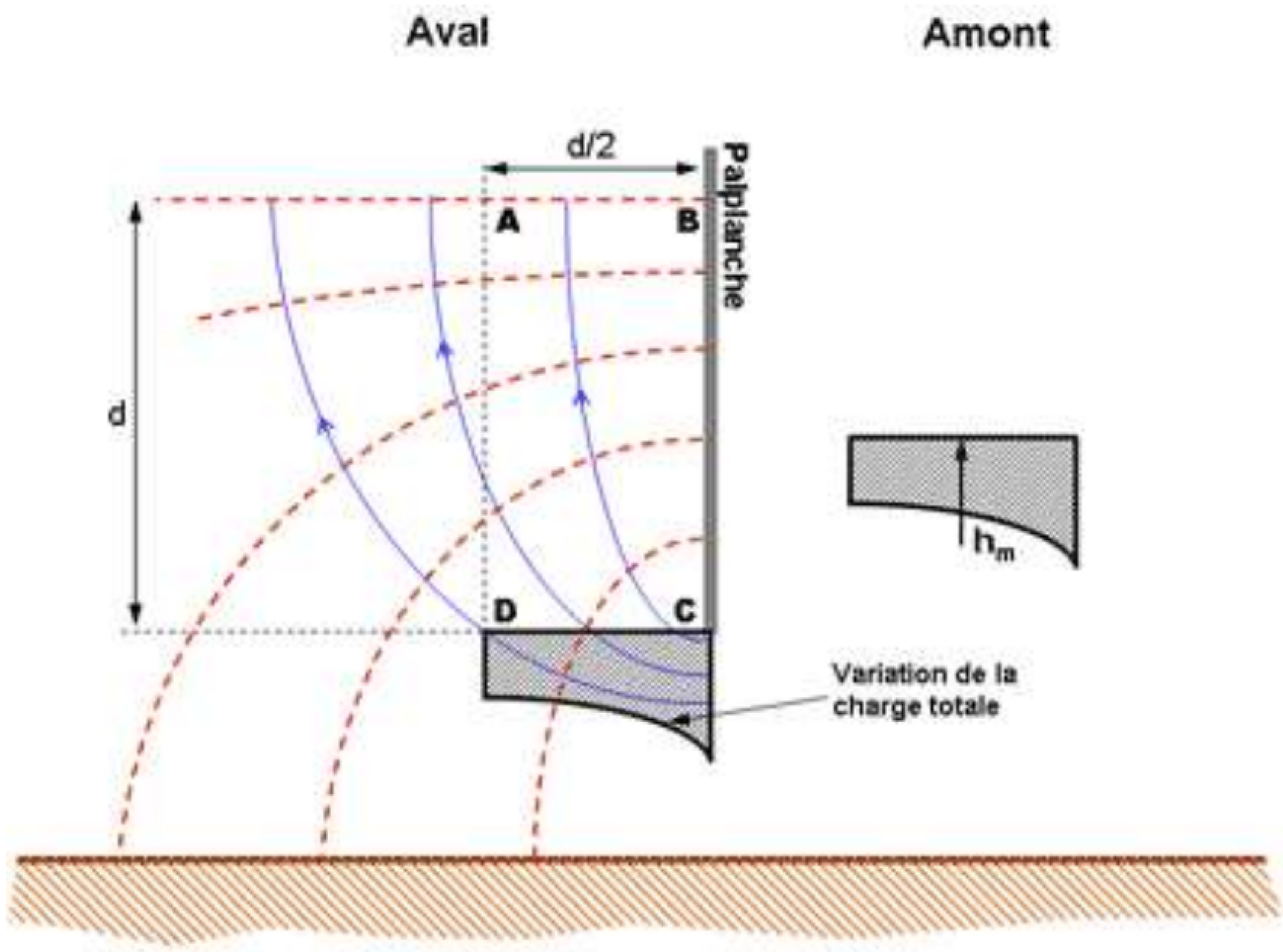


Figure 3 : Soulèvement adjacent à un rideau de palplanches (ABCD est le volume de sol dont

$$W = \gamma' \frac{d^2}{2}$$

on étudie l'équilibre)

Le poids effectif de ce prisme W est :

les forces d'écoulement sont : $$J = \gamma_w \, iV$$

En appelant $\mathbf{h_m}$ la charge totale moyenne à la base du prisme (déterminée à partir du réseau d'écoulement), et en considérant que la charge au sommet du prisme est nulle, la perte de charge est donc $\mathbf{h_m}$ et le gradient hydraulique moyen $\mathbf{i_m = h_m/d}$.

Donc : $$J = \gamma_w \, iV = \gamma_w \frac{h_m}{d} \times \frac{d^2}{2} = 1/2 \, \gamma_w \, h_m d$$

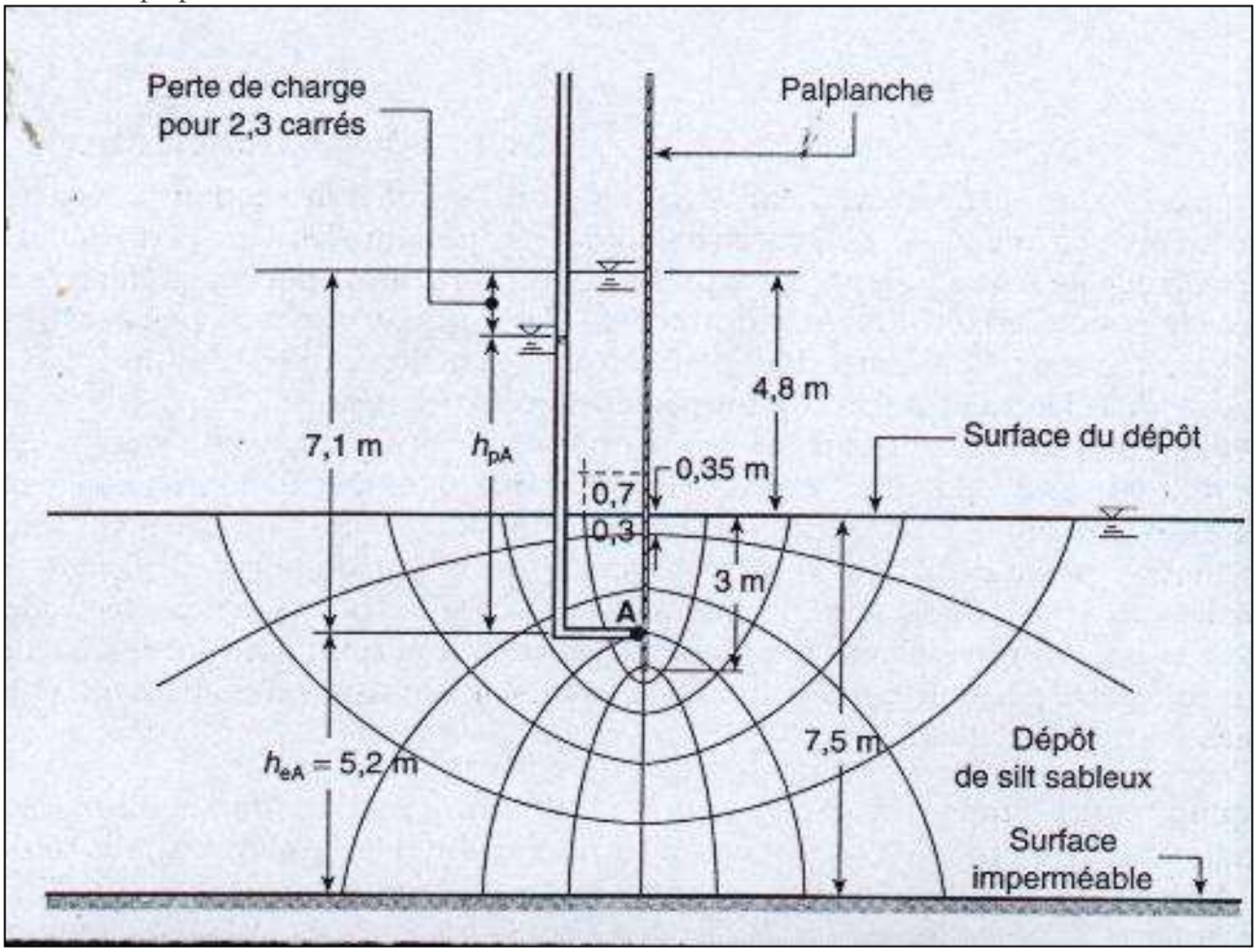
On calcule le rapport. $$W/J = \frac{\gamma' d}{\gamma_w \, h_m}$$

Le coefficient de sécurité vis à vis du soulèvement hydraulique F est égal au rapport $\mathbf{i_c/i_m}$.

Il faut noter que le gradient hydraulique moyen $\mathbf{i_m}$ est supérieur au gradient hydraulique de sortie. Ce qui signifie que le facteur de sécurité vis à vis du soulèvement global est inférieur au facteur de sécurité de boulance local à la sortie.

Exemple de réseau d'écoulement

La figure suivante représente un réseau d'écoulement bidimensionnel dessiné à l'échelle. Déterminons le débit d'infiltration sous les palplanches, le facteur de sécurité relatif à l'état de boulance et la charge hydraulique totale au point A, à partir des données suivantes :
$k = 3.10^{-5}$ cm/s ; $\Delta h = 4{,}8$ m ; porosité e = 0,82 ; gravité spécifique $G_s = 2{,}70$; P = largeur du mur de palplanches = 30 m



Solution :

1) On calcule le débit d'infiltration à l'aide de l'équation suivante : $Q = k . \Delta h \dfrac{N_t}{N_p}$

avec : $N_t = 5$; $N_p = 8 + 0{,}3 \times 2 = 8{,}6$
$Q = 3.10^{-7} . 4{,}8 . 5 / 8.6 = 8{,}37.10^{-7}$ m^3/s par mètre de largeur
Connaissant la largeur du mur de palplanches, on obtient :
$Q = 8{,}37 \times 10^{-7}$ m^3 /s x 30 m = $2{,}51 \times 10^{-5}$ m^3 /s

2) Pour déterminer le facteur de sécurité (F_S), on doit d'abord calculer le gradient hydraulique critique (i_c) et le gradient hydraulique observé (i) :

$$\boxed{i_C = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G - 1}{1 + e}}$$

Rappel : $G = \dfrac{\gamma_S}{\gamma_w}$

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{2{,}70 - 1}{1 + 0{,}82} = 0{,}93$$

$$i = \frac{\Delta h'}{\lambda}$$

où : $\Delta h' = \frac{\Delta h}{N_p}$ perte de charge associée à la fraction du carré où les risques de boulance sont les plus élevés = 4,8 . 0,3 carrés / 8.6 carrés = 0,17 m

λ = longueur la plus courte associée à la perte de charge et mesurée à la règle le long des palplanches λ = 0.35 m

donc : i = 0.17/0.35 = 0.48 → $F_s = i_c/i$ = 0.93 / 0.48 = 1.94

On peut conclure que le sol n'est pas dans un état de boulance, puisque le facteur de sécurité est supérieur à 1.

Cependant, comme ce facteur est inférieur à 3, la valeur recommandée, il faudra enfoncer les palplanches plus profondément afin d'augmenter la sécurité dans la zone asséchée et autour des palplanches.

3) On calcule la charge hydraulique totale (h) au point A : en additionnant la charge d'élévation (h_{eA}) et la charge de pression (h_{pA})

h_{eA} = 5,2 m

h_{pA} = 7,1 m - (4,8 m / 8.6 carrés) . 2,3 carrés = 5,8 m

h = 5,2 m + 5,8 m = 11m