

Chapitre 2

Conception des endiguements

| | |
|--|----|
| 2.1 CARACTERISTIQUES DES DIGUES | 2 |
| 2.1.1 Etanchéité | 4 |
| 2.1.2 Traitement des parements | 6 |
| 2.2 PRISE EN COMPTE DE LA HOULE | 6 |
| 2.2.1 Vitesse du vent | 7 |
| 2.2.2 Hauteur de vague | 8 |
| 2.2.3 Calcul de la revanche | 8 |
| 2.3 FRANCHISSEMENT DES DIGUES | 9 |
| 2.3.1 Traversées des digues de plein pied | 9 |
| 2.3.2 Rampes d'accès | 10 |
| 2.3.3 Accès des étangs aux bateaux | 10 |
| 2.4 ESTIMATION DES QUANTITES DE REMBLAIS | 11 |
| 2.5 RESSOURCES POTENTIELLES EN MATERIAUX DE REMBLAIS | 11 |
| 2.5.1 Provenance des matériaux | 11 |
| 2.5.2 Volumes disponibles | 12 |
| 2.5.3 Bilan | 12 |

Chapitre 2

Conception des endiguements

2.1

Caractéristiques des digues

Pente de 3/1 à l'intérieur des casiers ; 2,5/1 à l'extérieur.

Largeur de crête : de 4 à 16 m selon le type de circulation envisagée sur la crête.

La cote d'arase des crêtes de digues varie selon les casiers de 54,12 mNGF en aval à 56,83 mNGF en amont.

Les digues délimitant les casiers de l'aire de ralentissement des crues sont bâties selon les caractéristiques suivantes :

☐ Talus : fruit de 3/1 du côté intérieur aux casiers et 2,5/1 du côté extérieur. Une pente plus faible du côté de la retenue d'eau permet de garantir une meilleure stabilité de la digue pendant une vidange rapide des casiers, largement assurée dans ces conditions. Dans les parties d'endiguement de plus faible hauteur, il pourra être envisagé de réduire les fruits à 2,5/1 et 2/1.

☐ Largeur de crête : (cf. plan 05B)
 4 m si aucune circulation n'est prévue sur la digue (en gris);
 4,50 m pour une voie cyclable et piétonne (en vert);
 8,50 m pour les camions de chantier (en jaune);
 16 m pour une route départementale (en orange).

☐ Cote d'arase :
 Elle correspond à la cote de remplissage des casiers augmentée d'une revanche contre la houle qui peut se former sur les retenues d'eau (voir paragraphe 2.2 *Prise en compte de la houle*). Les cotes d'arase des digues sont données par casiers dans le tableau suivant.

| | Casier 1 | Casier 2 | Casier 3 | Casier 4 | Casier 5 |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cote d'arase des digues (mNGF) | 56,83 | 56,74 | 56,71 | 56,20 | 54,70 |
| | Casier 6 | Casier 7 | Casier 8 | Casier 9 | |
| Cote d'arase des digues (mNGF) | 57,62 | 56,72 | 55,62 | 54,12 | |

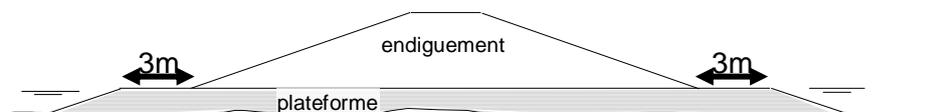
Lorsqu'une digue est commune à deux casiers, sa cote de crête est prise égale à la cote d'arase la plus élevée des deux casiers en question.

Un profil en long des casiers figurant les cotes de remplissage et les cotes de crêtes des digues est fourni page 3.

☐ Décapage : 50 cm de profondeur
 Il permet une meilleure assise de la digue sur le terrain naturel, grâce à l'enlèvement de la terre végétale et de ses composants organiques.

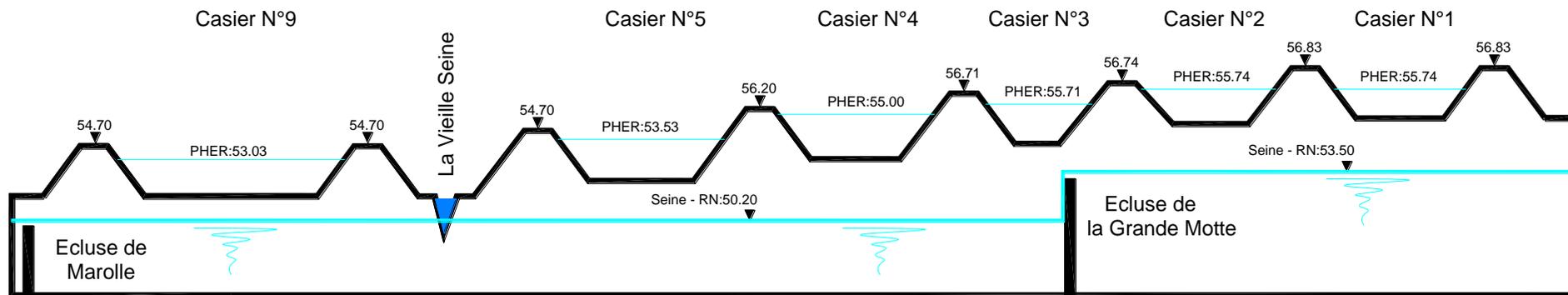
Les digues traversant des gravières reposent sur une plateforme en remblais.

☐ Traversées de gravières :
 Lorsque les digues traversent des gravières, une plateforme en remblai est préalablement mise en place. La largeur de risberme des plateformes est de 3 m de chaque côté, ce qui facilite : l'inspection des pieds de talus, le passage éventuel de circulation douce, la création de plateformes « humides » à potentiel écologique, un espace pour les pêcheurs...etc.

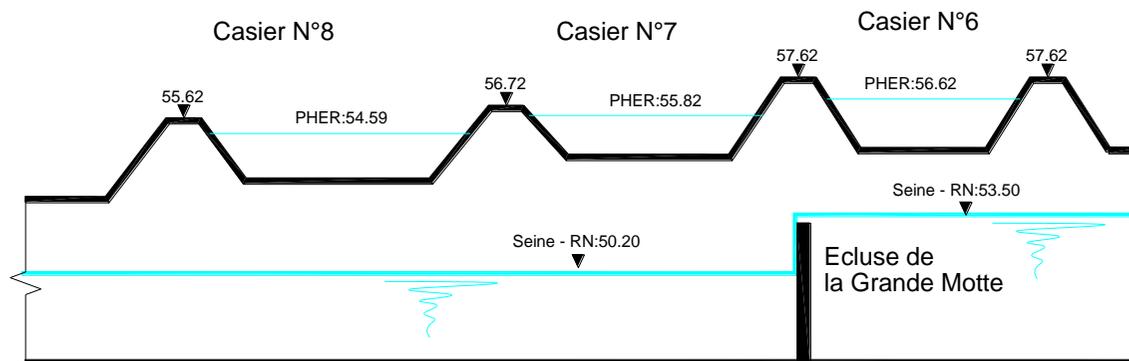


PROFIL EN LONG SCHEMATIQUE DES CASIERS

CASIERS EN RIVE DROITE



CASIERS EN RIVE GAUCHE



2.1.1 Etanchéité

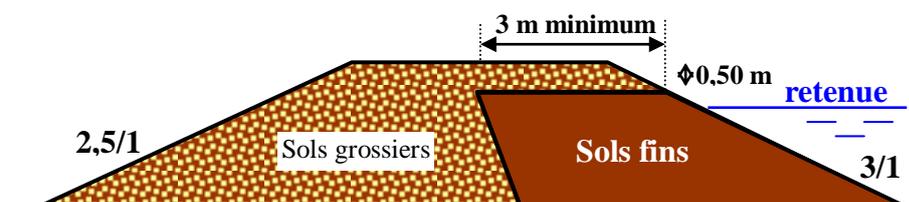
La fonctionnalité des digues repose essentiellement sur leur bonne étanchéité. Trois éléments de la conception des digues assurent une étanchéité maximale :

- un zonage des digues ;
- une clé d'étanchéité ;
- une paroi étanche pour les digues à la traversée des gravières.

Un zonage entre sols fins et sols grossiers est mis en place.

Un zonage des endiguements consistant en une répartition judicieuse des sols fins et grossiers au sein de la digue permet d'assurer l'étanchéité de la digue, tout en utilisant les ressources en matériaux perméables, qui sont plus importantes.

Les sols fins sont placés du côté de la retenue d'eau, ou du côté amont lorsqu'il s'agit d'une digue séparative de deux casiers. La partie haute (50 cm d'épaisseur) est exclusivement réalisée avec le matériau grossier afin d'améliorer l'utilisation de la crête de digue pour la circulation des engins, sans compromettre l'étanchéité (voir schéma suivant).



Présence d'une clé d'étanchéité sous les digues.

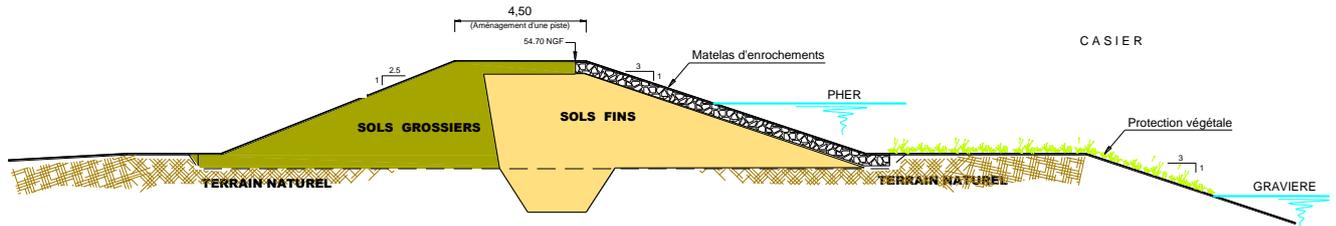
Par ailleurs, une clé d'étanchéité est prévue sous les digues, légèrement du côté amont (cf. figure 1 page suivante). Elle est constituée de sols fins (matériaux étanches), avec une base de 2 m, une hauteur de 1,5 m et des pentes de 1,5/1. Sa présence permet d'augmenter la longueur du cheminement hydraulique, ce qui d'une part renforce l'étanchéité et d'autre part diminue le gradient hydraulique à travers la fondation et par conséquent réduit le risque d'érosion régressive.

Une paroi étanche est implantée au cœur des digues situées sur d'anciennes gravières.

Pour les digues situées sur d'anciennes gravières, la plateforme d'assise est perméable. Par ailleurs, en bordure de Seine, le chemin hydraulique est raccourci. La clé d'étanchéité est donc remplacée par une paroi étanche en bentonite-ciment, implantée au centre du talus. La coupe type d'une telle digue est présentée page suivante.

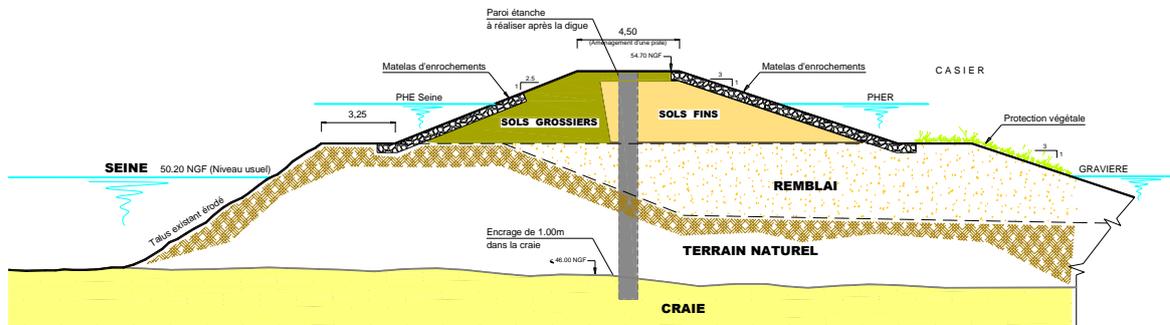
COUPE TYPE SUR DIGUE DU CASIER N°5

Echelle : 1/200 ème



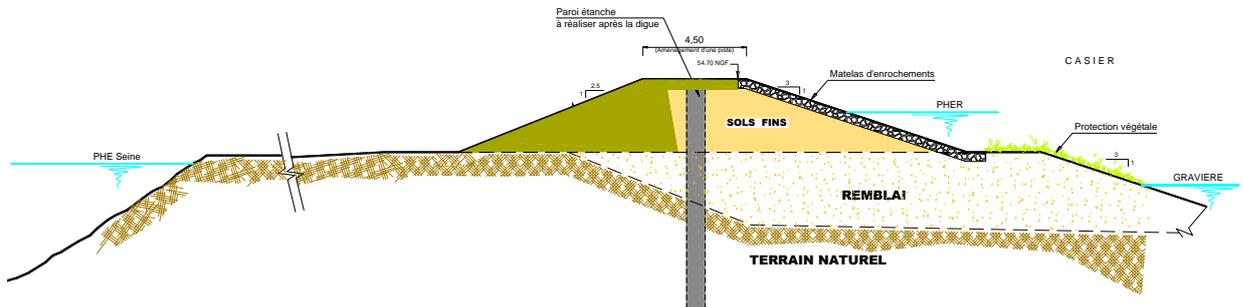
COUPE TYPE SUR DIGUE DU CASIER N°5 EN TRAVERSEE DE GRAVIERE ET RIVE DE SEINE AVEC PAROI ETANCHE

Echelle : 1/200 ème



COUPE TYPE SUR DIGUE DU CASIER N°5

HORS CRUE DE SEINE AVEC PAROI ETANCHE



Nota : Lorsqu'une paroi étanche est présente, il serait peut-être possible de se contenter d'une digue en seuls sols grossiers, sous réserve que ceux-ci tiennent suffisamment lorsqu'une tranchée est recreusée.

La coupe type des digues est présentée au 1/200ème en annexe 4.

2.1.2 Traitement des parements

Le parement intérieur des digues est doté :

- ❑ d'un matelas d'enrochement pour protéger les digues contre vagues ;
- ❑ d'une géogrille incorporée au grillage supérieur du matelas d'enrochement ;
- ❑ de terre végétale ensemencée.

Le parement extérieur des digues est constitué :

- ❑ d'un matelas d'enrochement jusqu'aux PHE de la Seine ;
- d'un grillage anti-fouisseur au dessus ;
- ❑ d'une géogrille incorporée au grillage anti-fouisseur et au grillage supérieur du matelas d'enrochement ;
- ❑ de terre végétale ensemencée.

2.2 Prise en compte de la houle

Sous l'action du vent, la houle peut se former sur les casiers remplis d'eau.

Il faut en tenir compte dans le dimensionnement des digues.

Dans le but de protéger l'amont des digues contre les vagues, un matelas d'enrochement est disposé sur toute la hauteur du parement intérieur des digues. Les digues séparatives de deux casiers seront traitées ainsi des deux cotés.

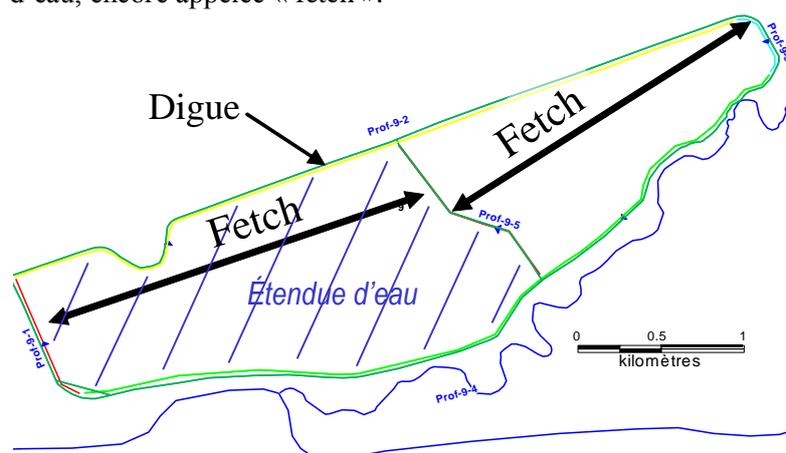
Les grillages double torsion utilisés sont en fils de fer galvanisés (ou en alliage spécial résistant à la corrosion) afin de leur assurer une bonne longévité. Etant donné la vitesse maximale des vagues qui sont amenées à déferler sur les parements (inférieure à 4 m/s, voir § 2.2.3 *Calcul de la revanche*), un matelas Reno de 23 cm d'épaisseur est suffisant.

Un matelas d'enrochements similaire sera déposé en partie basse des parements aval des digues (extérieurs aux casiers), et ce jusqu'à la cote des plus hautes eaux de la Seine. Cette disposition vise à protéger le pied des digues contre les crues de la Seine. A noter qu'aux endroits isolés des eaux de crue, un tel matelas d'enrochements n'est pas nécessaire.

La partie haute du parement aval des digues sera quant à elle recouverte d'une grille anti-fouisseurs, pour éviter les risques de terriers qui seraient aussi des amorces potentielles de renards hydrauliques. Sur les autres parties des parements (parement amont et pied du parement aval), les matelas Réno assurent cette fonction.

Dans un souci d'intégration à l'environnement, la totalité des parements des digues sont par ailleurs recouverts de terre végétale ensemencée. Pour améliorer la résistance de l'enherbement aux sollicitations hydrauliques, une géogrille est prévue sous la terre végétale. Cette géogrille est incorporée soit au grillage supérieur des gabions (sur le parement amont et la partie basse du parement aval), soit à la grille anti-fouisseurs (au pied du parement aval).

Sous l'action du vent, la houle peut se lever sur les casiers remplis d'eau. La hauteur maximale des vagues pouvant se former sur les plans d'eau dépend de la force du vent, de la hauteur d'eau stockée et de la longueur du plan d'eau, encore appelée « fetch ».



Afin d'éviter l'érosion des digues par les vagues lorsque les casiers sont pleins, il est nécessaire de tenir compte de la formation de la houle pour dimensionner la revanche des digues au dessus du niveau de stockage.

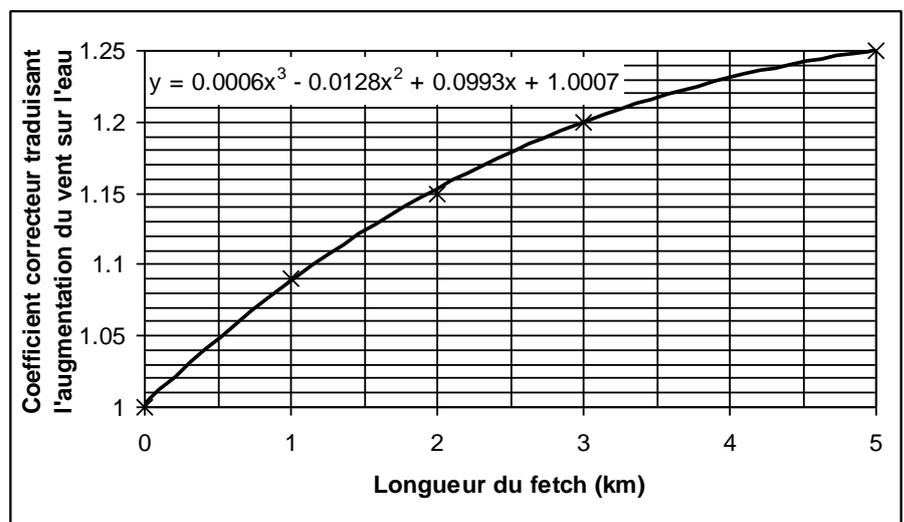
2.2.1 Vitesse du vent

Le calcul des vents repose sur les données Météo-France de la station la plus proche du site de la Bassée.

Les données fournies par Météo France à la station de Melun-Villaroche nécessitent un traitement avant d'être exploitables pour le calcul de la revanche des digues.

En effet, les données Météo consistent en la vitesse annuelle maximale journalière du vent, mesurée sur 10 min. Un coefficient correctif doit être apporté à cette vitesse afin de rapporter cette valeur au vent annuel maximal journalier mesuré sur 1 heure. D'après l'ACES Technical Reference, Corps of Engineers, le coefficient à appliquer est de 0,95.

La valeur obtenue reste l'équivalent d'une valeur mesurée en station, qui est inférieure à la vitesse que peut atteindre le vent sur un plan d'eau en l'absence de relief. Pour traduire cette différence, l'université du Saskatchewan (Canada) préconise de considérer un coefficient correcteur, qui dépend de la longueur du fetch comme indiqué sur la figure qui suit.



Dans notre cas, la vitesse maximale du vent horaire sur l'eau est donc différente selon les plans d'eau. A noter que l'orientation du vent (en général sud-ouest) par rapport au tronçon de digue influe sur la longueur du fetch à prendre en compte pour ce calcul.

Le CFGB (Comité Français des Grands Barrages) et l'USBR (U.S Bureau of Reclamation) recommandent de considérer un vent trentennal pour les études de conception des digues. Le tableau suivant récapitule les vitesses du vent horaire trentennal sur l'eau qui sont prises en compte pour le calcul de la hauteur des vagues formées.

La vitesse du vent horaire trentennal sur les plans d'eau de la Bassée s'élève de 110 km/h à 117 km/h.

| | Casier 1 | Casier 2 | Casier 3 | Casier 4 | Casier 5 |
|----------------------------|----------|----------|----------|--------------|----------------|
| Fetch (km) | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 3,0 | 2,7 |
| Vitesse max du vent (km/h) | 113 | 110 | 110 | 117 | 116 |
| | Casier 6 | Casier 7 | Casier 8 | Casier 9 est | Casier 9 ouest |
| Fetch (km) | 1,5 | 1,1 | 1,7 | 2,0 | 2,9 |
| Vitesse max du vent (km/h) | 110 | 107 | 111 | 113 | 117 |

2.2.2 Hauteur de vague

La formule de Bretschneider est utilisée pour calculer la hauteur des vagues qui se forment.

La hauteur des vagues susceptibles de se former sur les plans d'eau de la Bassée est comprise entre 65 et 90 cm pour un vent trentennal.

La hauteur des vagues qui se forment sur les étendues d'eau du fait d'un vent trentennal peut être estimée à partir de la formule de Bretschneider.

Cette formule stipule que la hauteur des vagues dépend de la profondeur du plan d'eau, de la vitesse du vent horaire et du fetch du plan d'eau. Les valeurs trouvées pour chacun des 10 casiers du projet de la Bassée figurent dans le tableau suivant :

| | Casier 1 | Casier 2 | Casier 3 | Casier 4 | Casier 5 |
|----------------------------|----------|----------|----------|--------------|----------------|
| Hauteur max des vagues (m) | 0,80 | 0,73 | 0,73 | 0,88 | 0,86 |
| | Casier 6 | Casier 7 | Casier 8 | Casier 9 est | Casier 9 ouest |
| Hauteur max des vagues (m) | 0,73 | 0,65 | 0,76 | 0,80 | 0,87 |

Pour ce calcul, les hauteurs d'eau considérées sont les hauteurs de remplissage des casiers par rapport au terrain naturel. Il n'est en effet pas nécessaire de prendre en compte la surprofondeur du fait de l'existence des gravières, puisque les vagues se cassent lors du passage d'une gravière à l'autre.

2.2.3 Calcul de la revanche

La revanche sécuritaire des digues est calculée à l'aide de la formule de Gaillard.

A partir de la connaissance de la vitesse (V) et de la hauteur (h) des vagues qui se forment, la formule de Gaillard permet de calculer la hauteur de revanche sécuritaire des digues :

$$R = 0,75 h + \frac{V^2}{2g}$$

La vitesse de propagation des vagues est elle-même déduite de l'amplitude des vagues : $V=1,5+2h$.

Finalement, les revanches sécuritaires à retenir pour que les digues résistent aux vagues formées par un vent trentennal sont présentées par casier dans le tableau suivant.

Une revanche comprise entre 90 cm et 1,20 m selon les digues assure l'insubmersibilité des endiguements face à une houle très forte.

| | Casier 1 | Casier 2 | Casier 3 | Casier 4 | Casier 5 |
|--------------|----------|----------|----------|--------------|----------------|
| Revanche (m) | 1,09 | 0,99 | 0,99 | 1,20 | 1,17 |
| | Casier 6 | Casier 7 | Casier 8 | Casier 9 est | Casier 9 ouest |
| Revanche (m) | 0,99 | 0,89 | 1,03 | 1,09 | 1,19 |

Les valeurs obtenues comprises entre 0,9 et 1,2 m, ont été optimisées par rapport à l'approche initiale qui retenait une revanche d'endiguement de 1m complétée par un parapet de 50cm (la solution du parapet est écartée à ce stade du fait des contraintes qu'elle engendre pour le passage d'animaux et le franchissement de la digue). En effet, le calcul a été effectué casier par casier sur la base des données locales de Météo France.

Cependant, ce dimensionnement est plus conservatif que dans le cas usuel de la conception d'une retenue d'eau permanente, car dans le cas du projet de la Bassée, la conjugaison de l'état « casiers remplis » avec un vent exceptionnel est très rare. De plus, le calcul est encore pessimiste, car pour chaque bassin, le fetch retenu est le plus long sans tenir compte de l'orientation du tronçon de digue par rapport au vent considéré.

Les vents en provenance du nord-est sont plus faibles que les vents maximums mesurés en provenance du sud-ouest et ne dépassent pas 70 km/h d'après les données existantes. Il reste donc une possibilité d'abaissement de la revanche d'environ 25 cm sur les digues les moins exposées et sur les digues intérieures. Cet affinement devra être confirmé au stade du projet.

Par ailleurs, la possibilité de déroger à la formule de Breitschneider par la prise en compte d'arbres existants ou de rideaux d'arbres à planter n'est pas scientifiquement démontrable sur la base de la littérature existante. De plus l'importance des étendues de gravières dans les casiers laisse présumer de l'impact négligeable de zones plantées sur une faible partie du fetch.

2.3 Franchissement des digues

Deux concepts de franchissement des digues ont été adoptés, selon les configurations :

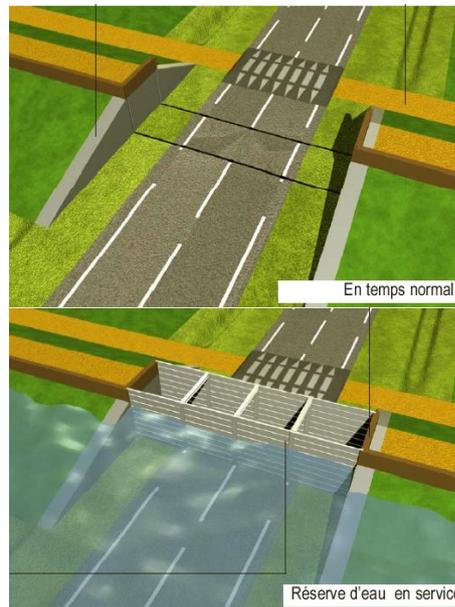
- franchissements par traversée de digue : ils sont condamnés lorsque les casiers sont en eau ;
- franchissements par rampes d'accès. Celles-ci permettent d'accéder à la crête de digue et sont toujours accessibles côté extérieur.

2.3.1 Traversées des digues de plein pied

Le casier n°4 est coupé à trois reprises par les RD77 et RD95. Afin d'éviter de surélever ces routes existantes, le franchissement des digues se fait de plein pied en ces trois endroits. Le principe du franchissement est le suivant :

Aux trois endroits où une route départementale coupe la digue du casier n° 4.

Un double batardeau assure l'étanchéité de la digue lors de la mise en eau du casier.



La digue, qui est sectionnée par la route, est maintenue de part et d'autre par un mur de soutènement en béton.

Lorsque le casier est en eau, un double batardage est installé, assurant l'étanchéité du casier. La circulation sur la route départementale est alors interrompue. Des rampes d'accès disposées côté extérieur à la zone de stockage permettent de garantir l'accès à la crête de digue, même lorsque les casiers sont remplis.

2.3.2 Rampes d'accès

En chaque intersection entre une route et une digue, une rampe d'accès permet le franchissement de la digue.

Tous les autres franchissements de digues sont assurés par des rampes d'accès (voir figure ci-dessous). Les rampes assurent la continuité des voies de communication que les digues intersectent, ainsi que l'accès aux crêtes de digues.



La localisation des rampes d'accès figure sur le plan 05B page suivante. Pentées à 5%, elles font environ une soixantaine de mètres de long.

2.3.3 Accès des étangs aux bateaux

L'accès des bateaux aux deux gravières du casier 4 directement ouvertes sur la Seine pourrait être assuré par des batardeaux manuels.

Les travaux associés s'élèveraient à 4 millions d'euros.

Le casier 5 comporte deux gravières directement ouvertes sur la Seine.

Dans le cas où l'accès à ces gravières par les bateaux devrait être maintenu, il faudrait doubler la vanne de vidange initialement prévue d'un passage batarde de 20 m de large (sections de passage maximales actuelles). La hauteur de batardeau nécessaire s'élève à 8,70 m.

Chacun de ces deux batardeaux serait bâti sur le même principe que les batardeaux de franchissement de routes : murs de soutènement en béton, double batardeage, rampes supplémentaires prévues pour la continuité de la piste de crête. Vu leurs dimensions, ils seraient de plus dotés d'une pile intermédiaire.

Le montant de la plus-value associée aux travaux de ces deux passages batardeés est évalué à 2 millions d'euros par ouvrage (postes généraux et divers non métrés / imprévus compris), soit 4 millions d'euros au total. Ce montant n'est pas comptabilisé dans le bilan des coûts qui figure chapitre 4.

2.4 Estimation des quantités de remblais

Les remblais sont nécessaires à l'élaboration :

- des endiguements
- des plateformes reconstituant le terrain naturel à la traversée des gravières
- des ouvrages connexes (rampes d'accès, franchissements de routes, zones de croisement, belvédères, etc.)

Pour une hauteur d'eau stockée de 2,50 m, les volumes nécessaires aux endiguements, aux remblais des plateformes et aux rampes d'accès sont regroupés par casiers et par bordures de casiers dans le tableau suivant.

3,3 millions de m³ de matériaux d'apport sont nécessaires à la confection des digues (endiguements + plateformes+rampes d'accès).

| | V digues (m ³) | V remblais des gravières (m ³) | V rampes d'accès (m ³) | Volume total (m ³) | | |
|---------------|----------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|------------|----------|
| | | | | par bordure | par casier | |
| bordure 1 | 126 000 | - | 16 000 | 142 000 | 223 000 | casier 1 |
| frontière 1-2 | 71 000 | - | 10 000 | 81 000 | | |
| bordure 2 | 194 000 | 85 000 | 12 000 | 291 000 | 479 000 | casier 2 |
| frontière 2-3 | 95 000 | - | 12 000 | 107 000 | | |
| bordure 3 | 134 000 | 6 000 | 3 000 | 143 000 | 364 000 | casier 3 |
| frontière 3-4 | 109 000 | - | 5 000 | 114 000 | | |
| bordure 4 | 449 000 | 58 000 | 32 000 | 539 000 | 825 000 | casier 4 |
| frontière 4-5 | 120 000 | 42 000 | 10 000 | 172 000 | | |
| bordure 5 | 369 000 | 169 000 | 24 000 | 562 000 | 734 000 | casier 5 |
| bordure 6 | 266 000 | - | 11 000 | 277 000 | 359 000 | |
| frontière 6-7 | 71 000 | - | 11 000 | 82 000 | | casier 6 |
| bordure 7 | 167 000 | 6 000 | 3 000 | 176 000 | 325 000 | |
| frontière 7-8 | 57 000 | - | 10 000 | 67 000 | | casier 7 |
| bordure 8 | 237 000 | 8 000 | 14 000 | 259 000 | 326 000 | |
| bordure 9 | 662 000 | 51 000 | 30 000 | 743 000 | 855 000 | casier 8 |
| Intérieur 9 | 98 000 | - | 14 000 | 112 000 | | |
| TOTAL | 3 225 000 | 425 000 | 217 000 | 3 867 000 | | |

Nota : on a ici dissocié les digues dites « frontières », communes à deux casiers contigus, des digues dites « bordures », n'appartenant qu'à un seul casier. Le volume de matériau d'une « frontière » est compté dans les deux casiers qu'elle sépare.

2.5 Ressources potentielles en matériaux de remblais

Les potentialités de ressources en remblai ont été étudiées (rapport Terrasol 17298/06 indice 0 du 7 juillet 2003).

2.5.1 Provenance des matériaux

Les matériaux de remblais seront recherchés en dehors de la plaine alluviale de la Bassée pour ne pas épuiser les gisements de la Bassée.

Afin de ne pas puiser dans les gisements de la Bassée, les matériaux de remblais seront recherchés en dehors de la plaine alluviale de la Bassée.

Dix sites en dehors de la vallée ont été étudiés :

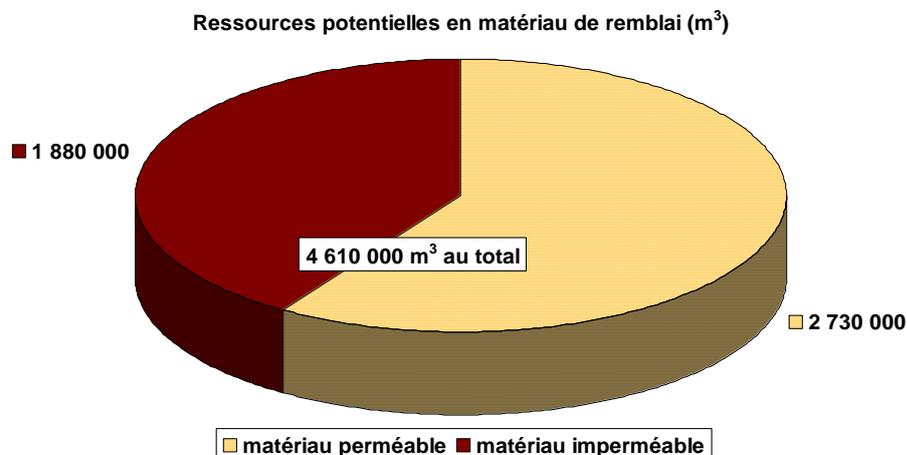
- 9 sites sont des carrières en exploitation ;
- 1 site est un terrain cultivé.

Ces sites sont à une distance de 7 à 139 km de la Bassée.

2.5.2 Volumes disponibles

Les quantités de matériaux disponibles dépassent 4,5 millions de mètres cubes, et sont en majorité constitués de matériaux perméables.

La part limitée des matériaux argileux imperméables (40% du total) incitera à prévoir des digues zonées permettant de mettre à profit l'utilisation de matériaux perméables en recharge aval de l'endiguement. Les matériaux argileux sont mis en place dans la recharge amont pour constituer l'étanchéité de l'endiguement.



2.5.3 Bilan

Jusqu'à la hauteur stockée de 2,5m, les ressources en remblais sont suffisantes.

Le bilan des ressources est favorable car il y a une marge de sécurité sur les quantités de ressources potentielles de 15% (correspondant au ratio $4\,610\,000\text{ m}^3 / 4\,020\,000\text{ m}^3$).

On constate cependant que viser à augmenter encore la capacité de stockage pourrait conduire à une incompatibilité avec la ressource disponible en matériaux.