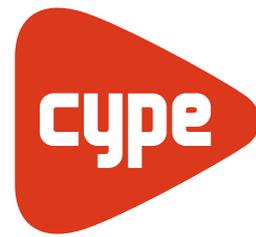


# Écrans de soutènement

Manuel de l'utilisateur



**Software** pour  
**l'Architecture** et  
**l'Ingénierie** de  
la **Construction**

**CYPE Ingenieros, S.A.**  
Avda. Eusebio Sempere, 5  
03003 Alicante  
Tel. (+34) 965 92 25 50  
Fax (+34) 965 12 49 50  
cype@cype.com

[www.cype.fr](http://www.cype.fr)

**IMPORTANT : CE TEXTE REQUIERT VOTRE ATTENTION**

L'information contenue dans ce document est la propriété de CYPE Ingenieros, S.A. La reproduction partielle ou totale ainsi que la diffusion sous quelque forme que ce soit est interdite sans l'autorisation expresse et préalable de CYPE Ingenieros, S.A. L'infraction des droits de propriété intellectuelle est un délit (Art. L.122-4 du Code de la Propriété Intellectuelle).

Ce document et l'information qu'il contient sont partie intégrante et indissociable de la documentation qui accompagne la Licence d'Utilisation des programmes informatiques de CYPE Ingenieros, S.A. Par conséquent, elle est soumise aux mêmes devoirs et conditions. Vous devrez lire, comprendre et accepter le Contrat de Licence d'Utilisation du software associé à cette documentation avant toute utilisation d'un des composants du produit. Si vous N'ACCEPTÉZ PAS les termes du Contrat de Licence d'utilisation, rendez immédiatement le software et tous les éléments qui l'accompagnent au lieu d'achat afin d'en obtenir le remboursement intégral.

Ce manuel correspond à la version du software dénommée ECRANS DE SOUTÈNEMENT par CYPE Ingenieros, S.A. L'information contenue dans ce document décrit substantiellement les caractéristiques et méthodes d'utilisation du ou des programmes qu'elle accompagne.

L'information contenue dans ce document peut avoir été modifiée postérieurement à l'édition mécanique de ce livre sans avis préalable. Le software associé à ce document peut être soumis à des modifications sans avis préalable.

CYPE Ingenieros, S.A. dispose d'autres services parmi lesquels vous trouverez les Mises à Jour, grâce auxquelles vous pourrez acquérir les dernières versions du software et la documentation qui les accompagne. Si vous avez des doutes sur les présentes conditions, par rapport au Contrat de Licence d'Utilisation du software, ou si vous souhaitez simplement rentrer en contact avec CYPE Ingenieros, S.A., adressez-vous à votre Distributeur Local Autorisé ou au Service Après-Vente de CYPE Ingenieros, S.A. à l'adresse suivante :

Avda. Eusebio Sempere, 5 · 03003 Alicante (Espagne) · Tel: +34 965 92 25 50 · Fax: +34 965 12 49 50 · [www.cype.com](http://www.cype.com)

© CYPE Ingenieros, S.A.

2ème Edition (février, 2007)

Edité et Imprimé à Alicante (Espagne)

Windows ® est une marque enregistrée de Microsoft Corporation ®.

## Table des matières

Introduction .....	5	1.2.2. Récapitulatifs et plans .....	16
<b>1. Présentation du programme .....</b>	<b>7</b>	1.2.3. Graphiques .....	18
1.1. Entrée des données .....	7	1.2.4. Dimensionnement et vérification des écrans ..	21
1.1.1. Assistant 1. Paroi moulée pour bâtiment .....	7	1.2.5. Armature .....	22
1.1.1.1. Données générales .....	8	1.3. Méthode de travail .....	23
1.1.1.2. Terrain .....	8	1.4. Aides .....	23
1.1.1.3. Etapes intermédiaires d'excavation .....	8	1.4.1. Icône avec le point d'interrogation .....	23
1.1.1.4. Planchers (phases de construction) .....	9	1.4.2. Touche F1 .....	23
1.1.1.5. Phase de service (ouvrage terminé) .....	9	1.4.3. Guide rapide .....	23
1.1.2. Assistant 2. Paroi moulée pour bâtiment avec un ou deux sous-sols .....	9	<b>2. Ecrans de soutènement .....</b>	<b>24</b>
1.1.2.1. Bâtiment .....	9	2.1. Typologies .....	24
1.1.2.2. Mitoyennetés .....	10	2.1.1. Ecrans génériques .....	24
1.1.2.3. Terrain .....	10	2.1.2. Paroi moulée .....	24
1.1.2.4. Information .....	11	2.1.3. Ecrans de pieux en béton armé .....	24
1.1.3. Généralités sur l'entrée libre des données .....	11	2.1.4. Ecrans de micropieux .....	25
1.1.3.1. Phases .....	11	2.1.5. Ecrans en palplanches du fabricant ProfilARBED .....	26
1.1.3.2. Normes utilisées .....	11	2.1.6. Ecrans de palplanches métalliques .....	27
1.1.3.3. Terrains: stratigraphie .....	12	2.1.7. Condition d'encastrement pour chaque typologie .....	28
1.1.3.4. Charges .....	13	2.2. Vérification du ferrailage .....	29
1.1.3.5. Appuis .....	14	2.2.1. Enrobage .....	29
1.1.3.6. Actions sismiques .....	15	2.2.2. Séparation minimale des armatures .....	29
1.1.3.7. Majoration des actions .....	16	2.2.3. Séparation maximale des armatures .....	30
1.1.3.8. Charges en couronnement de l'écran .....	16	2.2.4. Pourcentage géométrique minimal .....	30
1.2. Analyses et résultats .....	16	2.2.5. Pourcentage maximal géométrique .....	30
1.2.1. Modèle de calcul .....	16		

2.2.6. Pourcentage mécanique minimal . . . . .	30	3.2.2. Actions thermiques dans les butons . . . . .	41
2.2.7. Vérification sous flexion composée . . . . .	30	3.2.3. Retrait des planchers . . . . .	42
2.2.8. Vérification à l'effort tranchant . . . . .	30	3.2.4. Considération des moments aux appuis des planchers . . . . .	43
2.2.9. Vérification de la fissuration . . . . .	31	3.2.5. Plastification des ancrages . . . . .	43
2.2.10. Vérification des longueurs de recouvrement . . . . .	31	<b>4. Méthode de calcul . . . . .</b>	<b>44</b>
2.2.11. Vérifications des raidisseurs . . . . .	31	4.1. Modèle de calcul . . . . .	44
2.3. Dimensionnement de l'armature . . . . .	31	4.1.1. Discrétisation de l'écran de soutènement et interaction avec le terrain (loi de comportement du terrain) . . . . .	45
2.3.1. Dimensionnement de l'armature verticale . . . . .	31	4.1.2. Eléments d'appui: ancrages, butons, planchers . . . . .	47
2.3.2. Dimensionnement de l'armature horizontale . . . . .	32	4.2. Obtention de la solution . . . . .	48
2.3.3. Dimensionnement des raidisseurs . . . . .	32	<b>5. Exemple . . . . .</b>	<b>49</b>
2.3.4. Editeur d'armatures . . . . .	32	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>3. Poussées et actions additionnelles . . . . .</b>	<b>34</b>		
3.1. Poussées . . . . .	34		
3.1.1. Généralités . . . . .	34		
3.1.1.1. Coefficients de poussée . . . . .	34		
3.1.1.2. Effet des charges linéaires et en bande . . . . .	35		
3.1.1.3. Niveaux phréatiques suspendus . . . . .	35		
3.1.2. Vérifications de stabilité . . . . .	36		
3.1.2.1. Equilibre des moments et relation des poussées . . . . .	36		
3.1.2.2. Vérification de la stabilité globale (Cercle de glissement le plus défavorable) . . . . .	37		
3.1.3. Bermes et excavations . . . . .	38		
3.1.3.1. Considération de l'excavation arrière des phases . . . . .	38		
3.1.3.2. Bermes en avant . . . . .	38		
3.2. Actions additionnelles sur l'écran . . . . .	39		
3.2.1. Considération de l'action sismique . . . . .	39		

## **Introduction**

*La réalisation d'écrans de soutènement constitue une solution de plus en plus utilisée. Ceci est dû, entre autres, au développement des méthodes de calcul qui permettent de prédire le comportement structural prenant en compte le processus de construction et les interactions entre les différents éléments (mur, éléments d'appui et terrain).*

*Les méthodes de calcul les plus usuelles sont celles basées sur les éléments finis et celles reposant sur le coefficient de réaction. Le présent document présente le programme, détaille l'effet de l'interaction écran terrain, les considérations additionnelles dues aux actions introduites par les éléments d'appui (ancrages, butons ou planchers) ainsi que l'influence du procédé de construction et se centre sur le modèle de calcul pour les méthodes basées sur le coefficient de réaction.*



# 1. Présentation du programme

Le programme d'écrans de soutènement de CYPE Ingenieros permet de mener à bien l'analyse et le dimensionnement de structures de contention flexibles soumises à la poussée des terres. Il admet l'étude des éléments de contention suivants:

- Ecrans génériques de propriétés définies par l'utilisateur.
- Murs en béton armé d'épaisseur constante construits par tronçons.
- Murs composés de pieux équidistants de section circulaire.
- Rideaux de micropieux.
- Palplanches métalliques de sections Z, Omega ou définies par l'utilisateur.

Dans le cas des palplanches métalliques et des rideaux de micropieux, l'utilisateur peut définir et personnaliser sa bibliothèque d'écrans de soutènement.

## 1.1. Entrée des données

L'introduction des données nécessaires à la conception d'un écran déterminé peut être réalisée librement à partir d'un ouvrage vide ou en utilisant un des deux assistants du programme. Ces derniers permettent une introduction rapide et séquentielle des différents composants qui définissent le problème (couches, éléments d'appui provisoires ou permanents, charges sur le terrain, charges en couronnement, etc.); ce qui réduit substantiellement le temps d'entrée des données. L'assistant inclut la génération du mode constructif et le prédimensionnement géométrique d'un écran de soutènement en béton armé, excavé selon

différentes phases, puis génère une dernière phase de service dans laquelle le bâtiment charge l'écran de soutènement sur sa face supérieure.

Le programme propose les deux types d'assistants suivants, chacun envisageant un cas habituel de construction:

- Parois moulées pour bâtiments
- Parois moulées pour bâtiments avec un ou deux sous-sols.

En se servant des assistants, l'utilisateur pourra résoudre la grande majorité des cas d'écrans de soutènement utilisés dans la construction. Une fois les données introduites, il pourra réaliser n'importe quelle modification des paramètres introduits pour ajuster au maximum le modèle de calcul à la situation réelle du problème.

### 1.1.1. Assistant 1. Paroi moulée pour bâtiment

Cet assistant permet de générer des écrans de plusieurs niveaux. Les fenêtres d'entrée de données qui apparaissent sont expliquées ci-après. Avant de continuer, il est nécessaire de préciser que lorsqu'on parle de cote, il faut définir le signe (négatif si l'on prend comme cote 0 la surface du terrain).

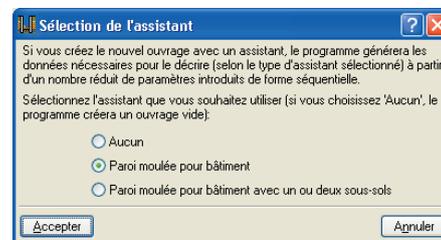


Fig. 1.1

### 1.1.1.1. Données générales

Vous devez y indiquer la profondeur totale d'excavation.

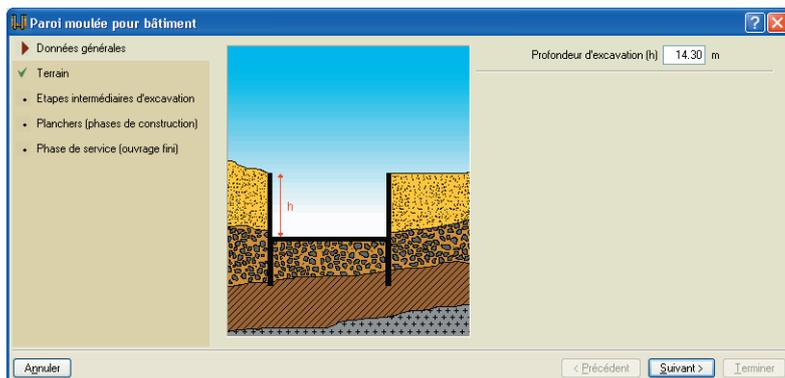


Fig. 1.2

### 1.1.1.2. Terrain

Ici vous avez la possibilité d'indiquer sur la présence d'un niveau phréatique, d'un affleurement rocheux ou d'une surcharge appliquée au terrain à l'arrière du mur. Vous devez également configurer les différentes couches de terrain à soutenir.

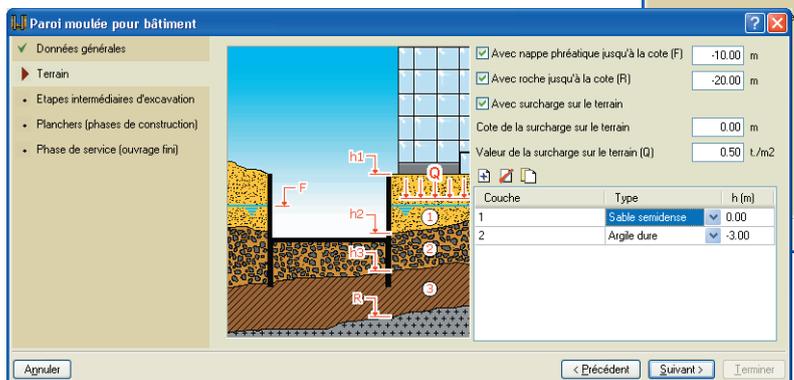


Fig. 1.3

### 1.1.1.3. Etapes intermédiaires d'excavation

Dans cette étape, vous devez définir le nombre d'étapes d'excavation pour lesquelles des ancrages sont mis en place, et pour chacune d'elles vous devrez indiquer la cote et le type d'ancrage (butons, ancrage actif permanent ou provisoire, ancrage passif permanent ou provisoire). L'ancrage possède sa propre cote. Pour chaque étape d'excavation, l'assistant génère 2 phases. La première correspond à l'excavation du terrain et la seconde à la mise en place de l'ancrage. Les cotes des étapes d'excavation ne peuvent être supérieures à la profondeur d'excavation indiquée dans la première fenêtre de l'assistant.

Si, par exemple, la profondeur totale de l'excavation est de 9 m et que les étapes d'excavation sont de 3 m chacune, vous n'avez ici qu'à définir deux étapes: la première, à la cote -3 m et la seconde, à la cote -6 m. Le programme génère automatiquement la dernière étape d'excavation, sans phase d'ancrage.

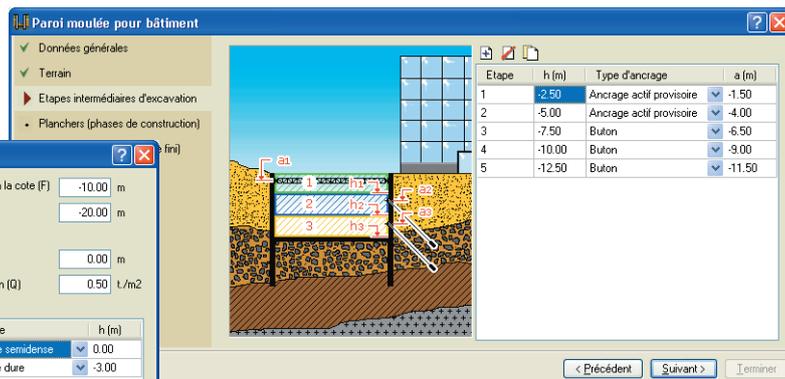


Fig. 1.4

### 1.1.1.4. Planchers (phases de construction)

Vous devez ici rentrer la liste des planchers et la fondation (si celle-ci exerce un effet de butonnage), en indiquant pour chacun sa cote supérieure, son épaisseur et son effort tranchant (en T/m) en phase de construction. La cote supérieure de la dalle de fondation moins l'épaisseur de celle-ci doit coïncider avec la cote du fond de l'excavation.

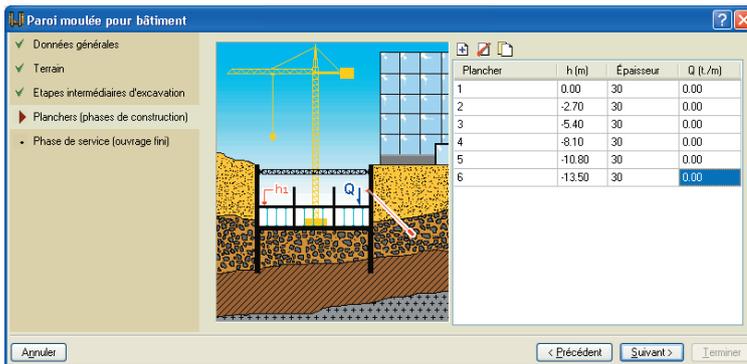


Fig. 1.5

### 1.1.1.5. Phase de service (ouvrage terminé)

Dans cette dernière fenêtre sont définies les charges en tête de l'écran, ainsi que les efforts tranchants en phase de service transmis au voile par les planchers des sous-sols.

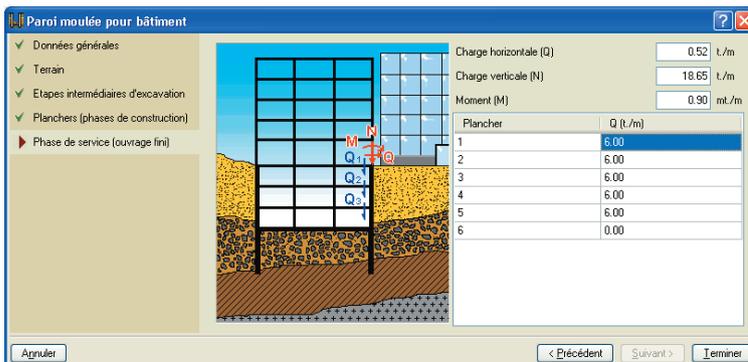


Fig. 1.6

## 1.1.2. Assistant 2. Paroi moulée pour bâtiment avec un ou deux sous-sols

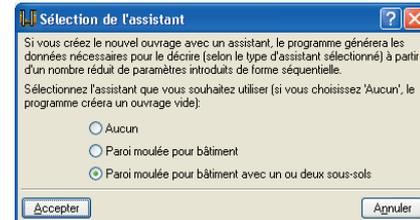


Fig. 1.7

Comme dans l'assistant précédent, différentes fenêtres d'entrée de données apparaissent.

### 1.1.2.1. Bâtiment

Par défaut, le bâtiment possède un seul sous-sol; si vous cochez la case correspondante, vous pouvez définir deux sous-sols. Vous devez indiquer la hauteur libre entre les planchers, la distance entre les appuis (portée de plancher entre l'écran de soutènement et l'appui suivant : grâce à cette donnée le programme génère approximativement les épaisseurs des planchers et les charges qu'ils transmettent à l'écran de soutènement), si le bâtiment appuie en tête de l'écran et le nombre d'étages qu'il y a en surélévation et, enfin, le type de fondation. Avec cette dernière donnée, vous informez l'assistant de la typologie de fondation du bâtiment.

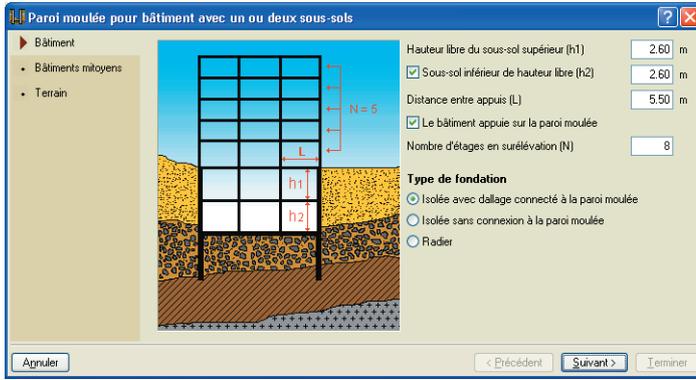


Fig. 1.8

### 1.1.2.2. Mitoyennetés

Vous devez introduire le type de charge mitoyenne (sans bâtiment mitoyen, chaussée de trafic léger, chaussée de trafic lourd ou bâtiment mitoyen pour lequel il faut définir le nombre d'étages et la profondeur du plan de fondation). En fonction de ce qui a été sélectionné, une charge surfacique sera appliquée au terrain situé à l'arrière du mur.

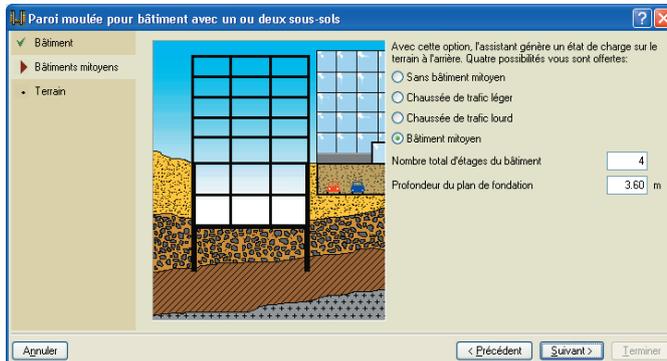


Fig. 1.9

### 1.1.2.3. Terrain

Il est possible d'introduire deux couches au maximum. Vous pouvez également indiquer s'il y a une couche rocheuse et une nappe phréatique ainsi que leurs profondeurs respectives.

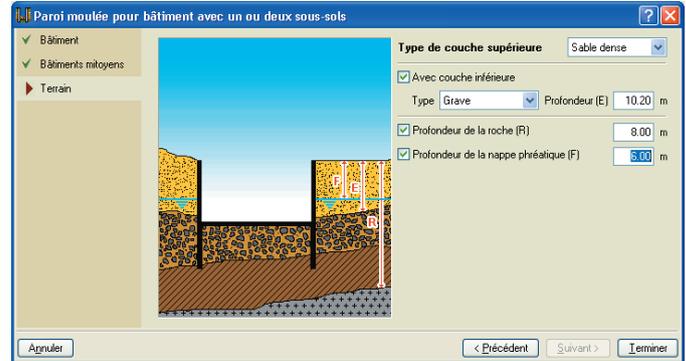


Fig. 1.10

### 1.1.2.4. Information

Avant de générer l'ouvrage, un récapitulatif des données qui vont être utilisées apparaît, afin de pouvoir éventuellement revenir en arrière pour effectuer des modifications. Ce récapitulatif peut être imprimé ou exporté en .TXT ou .HTML.

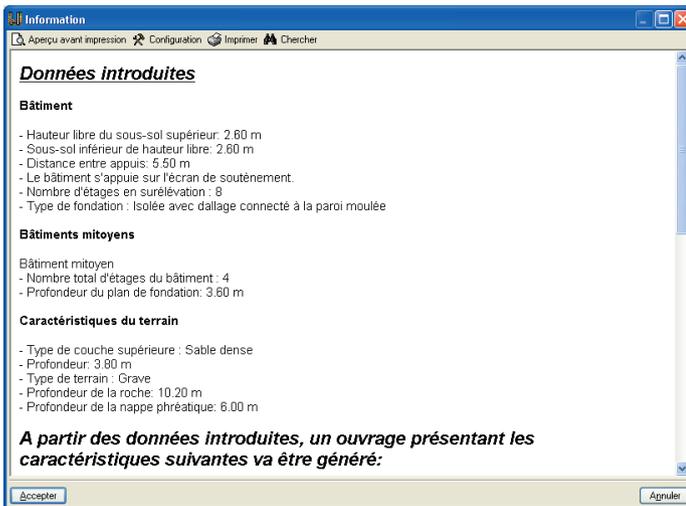


Fig. 1.11

Le prédimensionnement de l'épaisseur de l'écran est de  $H/20$  (avec  $H$  : profondeur d'excavation), avec un minimum de 45 cm et un maximum de 100 cm. Les arrondis s'effectuent pour des valeurs de 45, 60, 80 y 100.

La hauteur totale de l'écran varie entre  $2H$  et  $1.4H$ , selon que l'excavation est butonnée ou non. En fonction du nombre de phases à excaver, une valeur intermédiaire sera fixée. S'il y a une couche de roche à une profondeur inférieure, l'écran de soutènement l'atteindra jusqu'à la pénétrer de 20 cm, ce qui est le minimum pour considérer que l'écran est articulé en ce point.

Pour connaître les approximations effectuées, lisez les aides présentes dans chaque dialogue de l'assistant.

### 1.1.3. Généralités sur l'entrée libre des données

#### 1.1.3.1. Phases

Le programme permet de définir différentes phases ou états pour les écrans. Cela permet d'avoir accès à n'importe quel processus constructif usuel. Dans ces phases, sont spécifiées les profondeurs excavées, la mise en place des appuis élastiques externes (ancrages actifs, passifs, butons et planchers), les fluctuations du niveau phréatique, etc. Dans la configuration de chaque phase, l'utilisateur contrôle:

- La profondeur excavée
- Il peut affecter un coefficient à la valeur du module de réaction pour considérer d'éventuelles modifications dans la capacité de réaction latérale du terrain dans la phase en question (par exemple pour prendre en compte des dépressions, des pertes de confinement des sols granulaires, prismes de poussée non plane, etc.)
- Avec un critère similaire, il peut affecter le coefficient de poussée passive (dont l'effet est favorable) d'un coefficient réducteur ou amplificateur.
- Le type de phase, c'est-à-dire si la phase considérée est une phase constructive ou une phase de service de l'écran, ce qui conditionne les actions de conception.

#### 1.1.3.2. Normes utilisées

Le programme permet à l'utilisateur de sélectionner les normes d'application suivantes pour réaliser la conception d'un écran:

- EHE-98 (Espagne)
- REBAP y RSA (Portugal)
- CIRSOC (Argentine)

- NBR 6118:2003 (Brésil)
- ACI 318-99 (Chili)
- NTCRC (Mexique D.F.)
- ACI (USA)
- BAEL 91 (France)
- ACI 318M-99

Pour chacune de ces normes, le programme considère les matériaux spécifiés par celles-ci. La sélection des normes est accessible via l'icône **Configuration générale** de la barre d'outils présente en haut à droite de la fenêtre principale.



Fig. 1.12

### 1.1.3.3. Terrains: stratigraphie

En plus des propriétés géométriques des strates, nécessaires pour le calcul, l'utilisateur peut définir autant de couches qu'il souhaite, quelles que soient les épaisseurs de celles-ci. Il dispose également d'une bibliothèque de terrains types et de leurs propriétés qui l'assiste au moment de définir les couches.

Pour chaque couche, il est possible de considérer, pour le module de réaction (latéral), un diagramme linéaire croissant avec la profondeur ainsi que des facteurs affectant les coefficients de poussée, afin de prendre en compte les aspects de comportement du terrain que l'utilisateur juge opportuns (menu **Terrain > Nouvelle couche / Editer couche**).

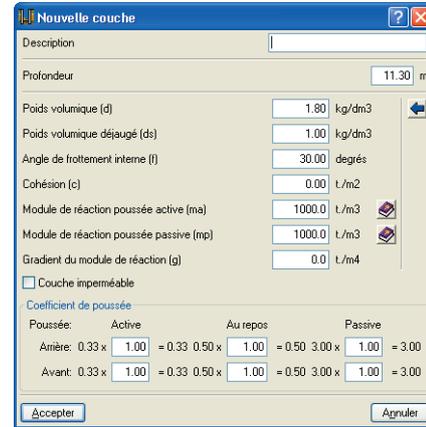


Fig. 1.13

Dans le menu **Terrain > Données générales**, il est aussi possible d'introduire une couche rocheuse semi infinie ainsi qu'un niveau phréatique (pouvant varier d'une phase à l'autre et entre les deux côtés du mur), et d'ajouter, pour chaque type de surface libre, une banquette à une distance choisie par l'utilisateur.

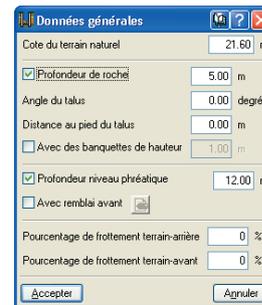


Fig. 1.14

Lorsque l'écran est visualisé, les couches peuvent être différenciées en éditant la couleur et le motif de chacune d'entre elles.

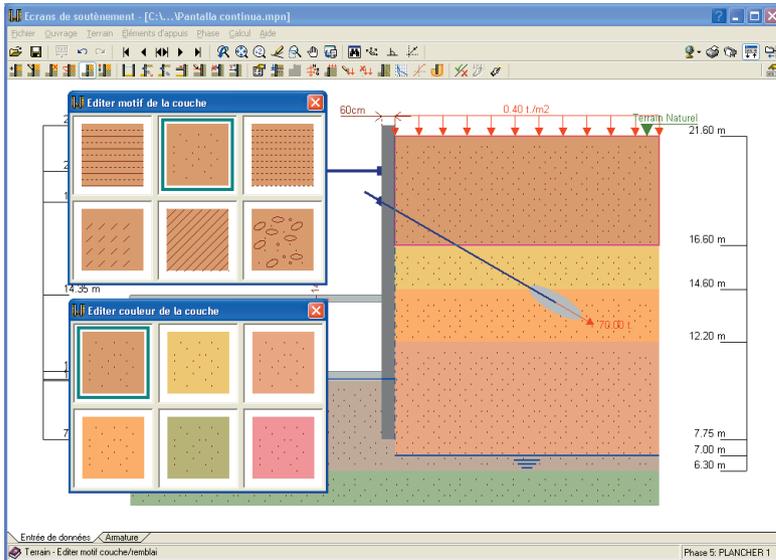


Fig. 1.15

La surface libre à l'arrière peut être:

- Horizontale
- Inclignée avec un angle positif (ascendant)

### 1.1.3.4. Charges

À l'arrière du mur, il est possible d'introduire les types de charges suivantes:

- Ponctuelle appliquée sur une surface rectangulaire dont les dimensions, la distance à l'écran et la proximité de la section d'étude sont définies par l'utilisateur.
- Linéaire et à la distance de l'écran définie par l'utilisateur.
- En bande de largeur déterminée et à une certaine distance de l'écran.
- Uniforme d'étendue infinie.

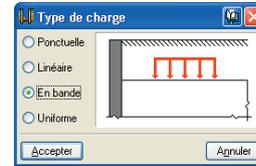


Fig. 1.16

Tous ces types de charges peuvent être placés:

- Dans la surface libre du terrain.
- À la cote choisie par l'utilisateur.
- À une profondeur choisie par l'utilisateur.

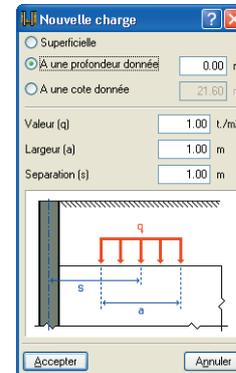


Fig. 1.17

Ces nombreuses possibilités de charges et de positions permettent à l'utilisateur de simuler n'importe quel type de charges externes pouvant affecter le comportement de l'écran, comme peuvent l'être les charges de trafic, de fondations proches (isolées ou filantes), l'influence de bâtiments voisins avec ou sans plancher, etc.

### 1.1.3.5. Appuis

Pour chacune des phases, il est possible de définir des appuis (provisoires ou permanents) des écrans dont les comportements sont élastiques, c'est-à-dire que leurs réactions sont définies comme le produit de la raideur axiale et du déplacement, en direction de ceux-ci et à partir du noeud de l'écran qu'ils restreignent ( $R = K_a \cdot \delta_a$ ).

Les types d'appuis permis par le programme sont ceux usuellement employés dans la pratique:

- Butons: pour ceux-ci, il est possible de définir:
  - la cote à laquelle ils agissent
  - la raideur axiale
  - l'écartement suivant la perpendiculaire à la section d'étude
  - la possibilité d'un décollement par traction entre le buton et l'écran
  - l'existence d'actions thermiques de dilatation ou de contraction dans les butons

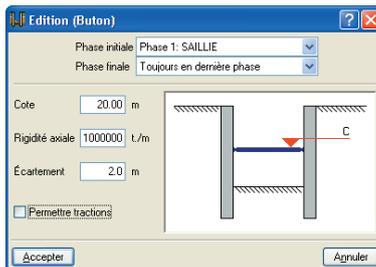


Fig. 1.18

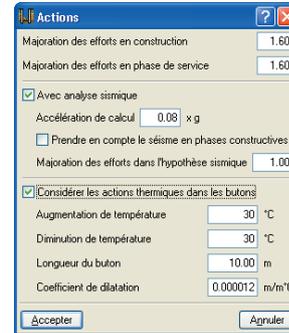


Fig. 1.19

- Ancrages actifs: pour ceux-ci, on peut définir:
  - la cote à laquelle ils agissent
  - la raideur axiale
  - l'angle formé par son axe avec l'horizontale
  - la charge de tension initiale
  - l'écartement dans le sens perpendiculaire à la section étudiée
  - la charge de plastification

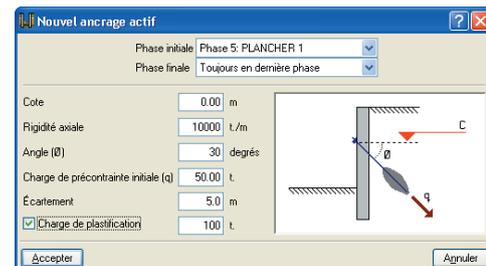


Fig. 1.20

- Ancrages passifs : pour ceux-ci, on peut définir:
  - la cote à laquelle ils agissent
  - la raideur axiale
  - l'angle formé par son axe avec l'horizontale
  - l'écartement dans le sens perpendiculaire à la section étudiée

- la charge de plastification

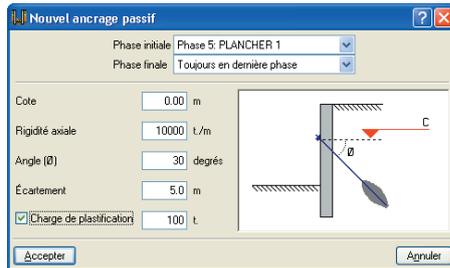


Fig. 1.21

- Planchers: il est possible de définir:
  - leur épaisseur et la cote à laquelle ils agissent
  - la raideur axiale
  - la possibilité d'un décollement par traction entre le plancher et l'écran
  - la réaction verticale et uniforme par unité de longueur transmise par le plancher à l'écran dans les phases de construction et de service
  - un raccourcissement possible du plancher dû aux phénomènes de rétraction de celui-ci

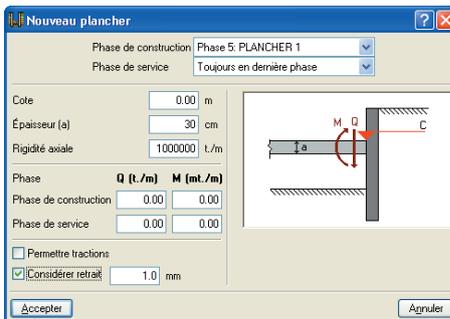


Fig. 1.22

La figure suivante montre différents types d'appuis et de charges:

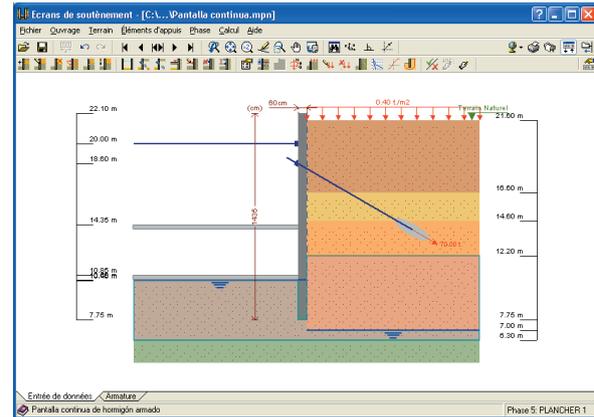


Fig. 1.23

### 1.1.3.6. Actions sismiques

Il est possible de considérer une augmentation ou une diminution horizontale de poussée du terrain produite par une excitation sismique statique équivalente en considérant un coefficient s'exprimant comme une portion de l'accélération de la gravité. La méthode de Mononobe-Okabe est utilisée pour quantifier cette augmentation (poussées actives ou au repos) ou cette diminution (poussée passive).

### 1.1.3.7. Majoration des actions

Pour les phases constructives comme pour les phases de service, il est possible de définir des coefficients de majoration des actions, afin de réaliser par la suite le dimensionnement ou la vérification de l'écran étudié.

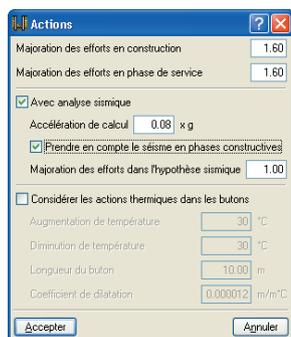


Fig. 1.24

### 1.1.3.8. Charges en couronnement de l'écran

Pour visualiser les effets produits par les éléments appuyant sur la partie supérieure des écrans (par exemple la superstructure), il est possible de définir un triplet d'actions (effort tranchant, normal et moment) en couronnement des écrans pour chaque phase.

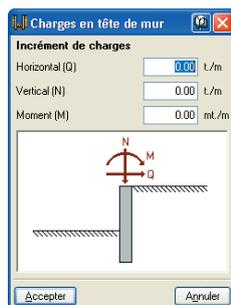


Fig. 1.25

## 1.2. Analyses et résultats

### 1.2.1. Modèle de calcul

Le modèle de calcul employé pour l'obtention des efforts et des déplacements de l'écran est basé sur les méthodes

d'interaction terrain-écran, où l'ampleur des poussées du terrain sur l'écran dépend du déplacement de celui-ci. Pour le calcul de l'action et/ou de la réaction que le terrain produit sur l'écran, on considère que celui-ci suit une loi de comportement élasto-plastique (non linéaire), qui s'obtient par l'approximation du comportement réel du terrain incluant la plastification de celui-ci. Le rang linéaire de comportement est associé au concept de module de réaction latéral du terrain, et le rang plastique au concept de poussée active ou passive selon le sens du déplacement. De même, les éléments d'appui (ancrages, butons et planchers) engendrent une série d'actions et coactions supplémentaires qui sont considérées aux cotes auxquelles elles se situent.

Etant donné que la solution du problème dépend de la déformation de l'écran, la méthode exige d'utiliser un processus itératif jusqu'à ce que la situation d'équilibre à une itération "i" soit suffisamment approchée pour obtenir l'itération "i+1".

### 1.2.2. Récapitulatifs et plans

Toutes les informations manipulées par le programme, des données entrées aux résultats des vérifications et des plans, peuvent être imprimées directement ou bien exportées aux formats usuels de texte (RTF, PDF, HTML, TXT) ou de fichiers dessin type DXF ou DWG, ce qui permet à l'utilisateur de pouvoir générer des documentations complètes, claires et de haute qualité, du projet d'écrans analysé.

L'obtention de récapitulatifs s'effectue grâce à l'option **Fichier > Imprimer > Récapitulatifs de l'ouvrage**.

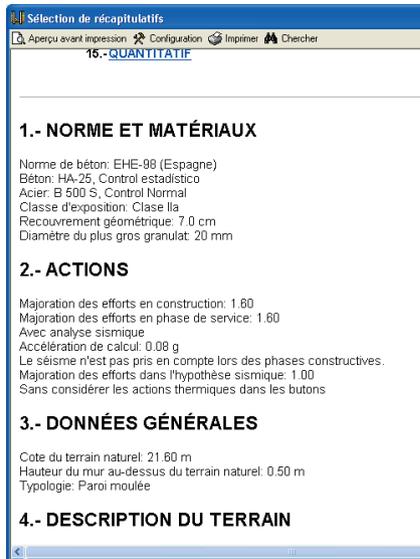


Fig. 1.26

L'obtention de plans s'effectue grâce à l'option **Fichier > Imprimer > Plans de l'ouvrage**.

Pour le tracé des plans, les opérations suivantes peuvent être réalisées:

- La fenêtre **Sélection de plans** permet d'ajouter un ou plusieurs plans pour imprimer simultanément et spécifier le périphérique de sortie : imprimante, plotter, DXF ou DWG, de sélectionner un cartouche (de CYPE ou défini par l'utilisateur) et de configurer les calques.

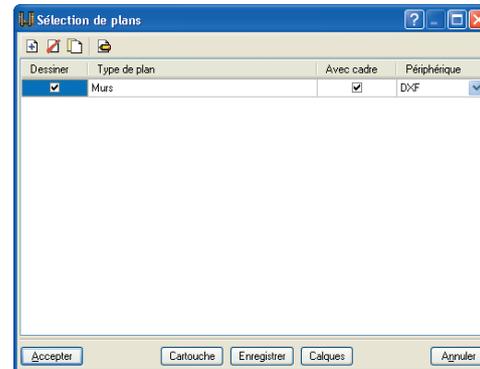


Fig. 1.27

- Dans chaque plan vous pouvez configurer les éléments à imprimer, avec la possibilité d'inclure des détails constructifs de l'utilisateur préalablement importés.

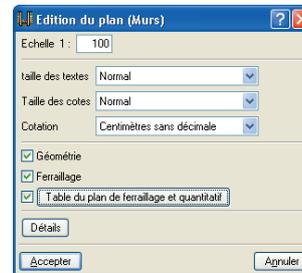


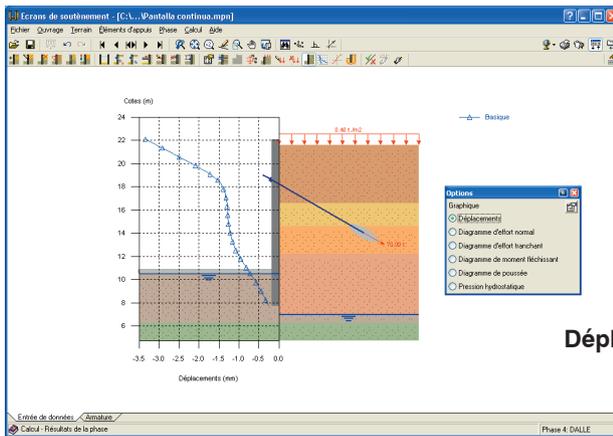
Fig. 1.28

- Modifier la position des textes.
- Repositionner les objets à l'intérieur du même plan ou les déplacer vers un autre.

### 1.2.3. Graphiques

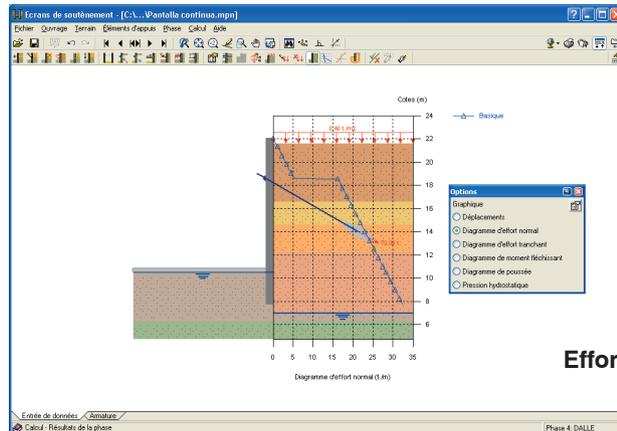
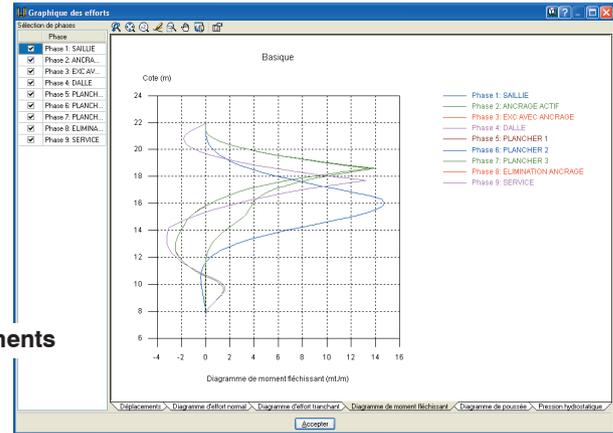
Comme résultats du calcul de toutes les phases, le programme permet de visualiser pour chacune d'entre elles, sur le schéma graphique de l'écran et dans un système cartésien, les graphiques représentant sur toute la hauteur de l'écran, la distribution de:

**Graphique sur schéma**

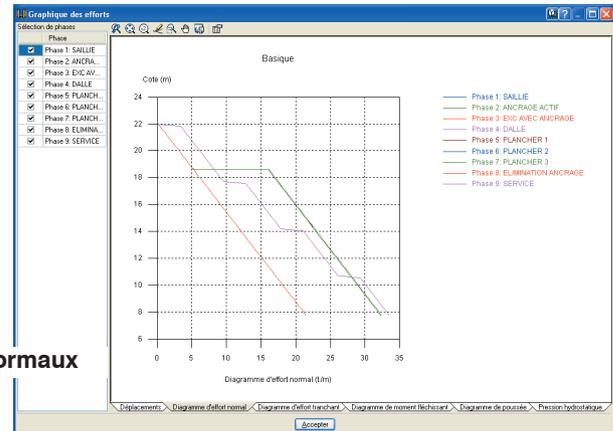


**Déplacements**

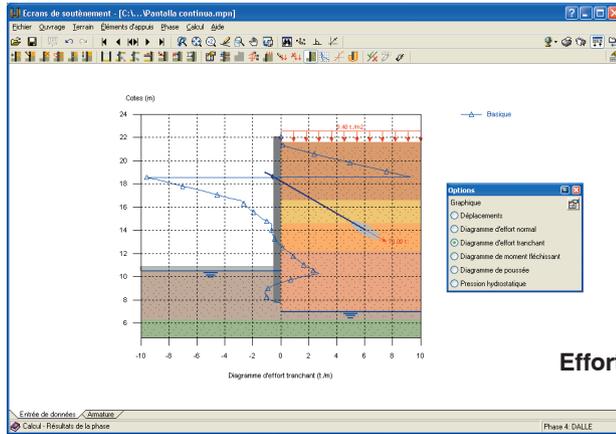
**Diagramme cartésien**



**Efforts normaux**

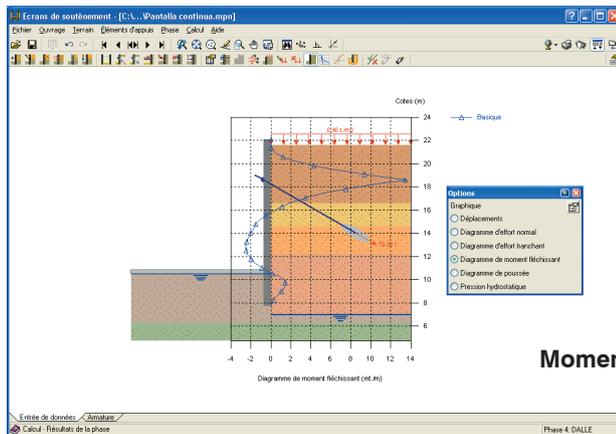
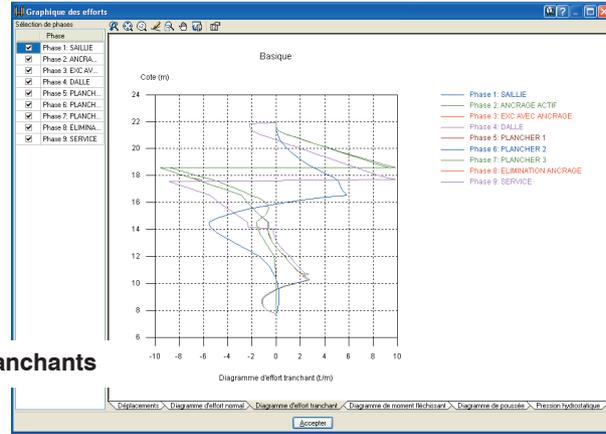


### Graphique sur schéma

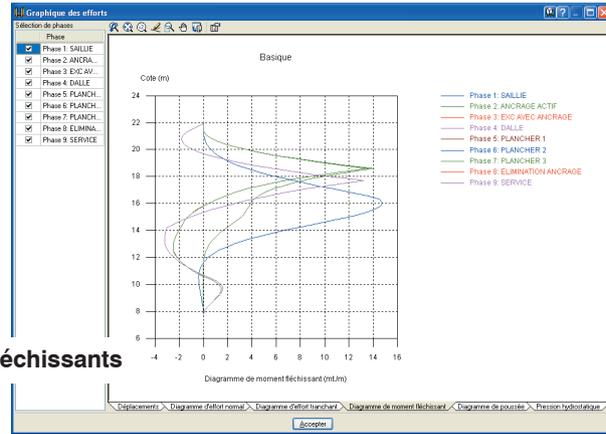


Efforts tranchants

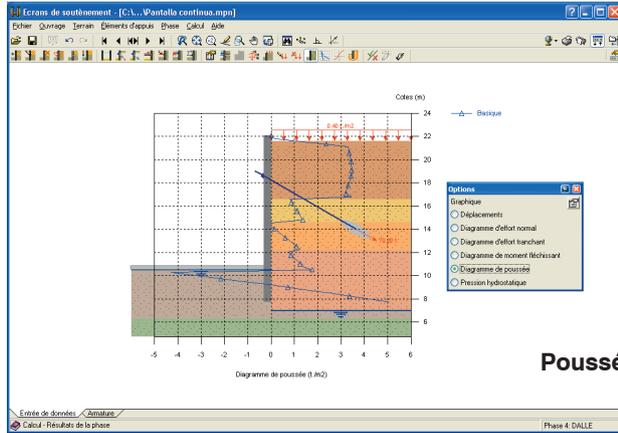
### Diagramme cartésien



Moments fléchissants

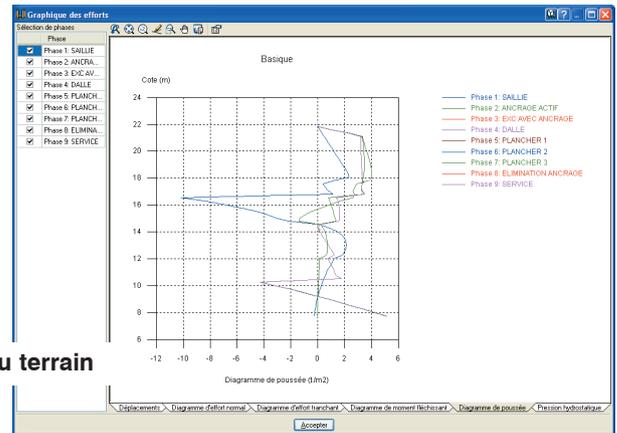


### Graphique sur schéma

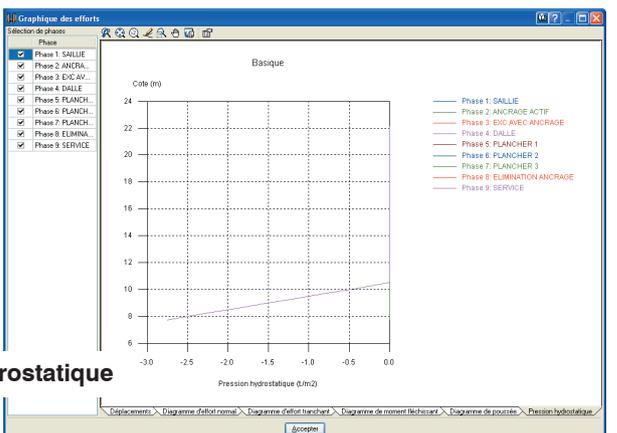
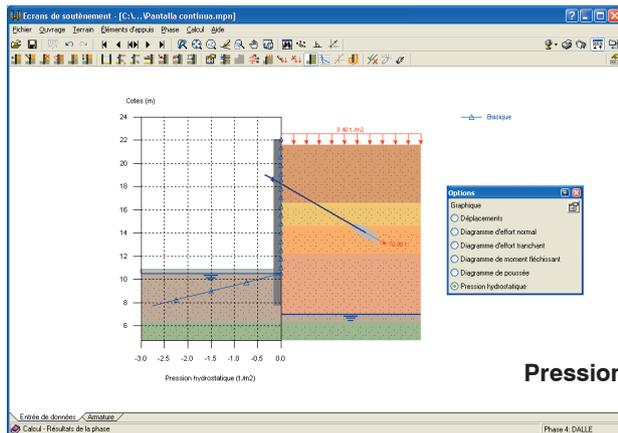


Poussées du terrain

### Diagramme cartésien



Pression hydrostatique



Ces graphiques apparaissent indépendamment pour les actions statiques et sismiques, si elles existent. Sur le schéma de l'écran, apparaissent les graphiques correspondant à la phase où se trouve l'utilisateur et, sur le graphique cartésien, apparaissent les valeurs des phases sélectionnées par l'utilisateur.

Cette représentation graphique des variables de comportement de l'écran permet, à chaque phase, d'évaluer quantitativement et qualitativement la conception proposée.

De plus, le programme permet de connaître la loi de comportement du terrain à la cote désirée, en traçant graphiquement le diagramme Poussée-Déplacement :

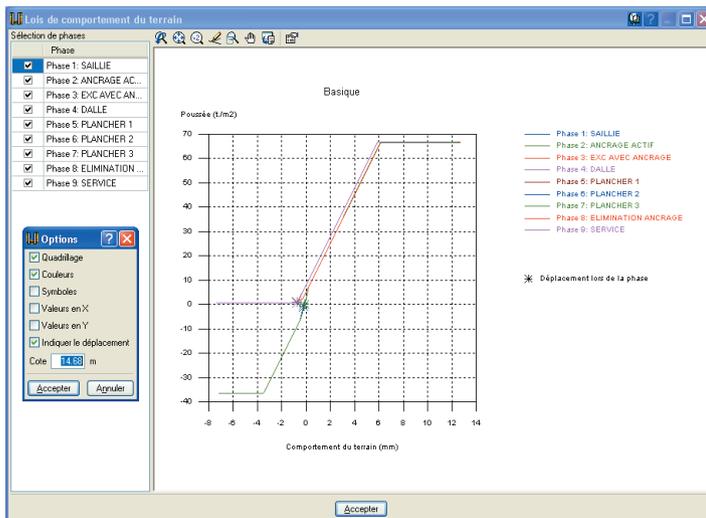


Fig. 1.29

### 1.2.4. Dimensionnement et vérification des écrans

Le programme permet de réaliser les deux actions usuelles suivantes dans la conception de n'importe quel élément structural :

- Dimensionnement
- Vérification

Selon la typologie d'écran étudiée, le dimensionnement conduit le programme à réaliser ce qui suit :

- Parois moulées d'épaisseur constante construites par tronçons.

Sont disposées les armatures nécessaires pour satisfaire la norme, laquelle demande une armature de base plus des renforts localisés, des raidisseurs horizontaux et verticaux, des étriers, etc.

- Ecrans composés de pieux équidistants de section circulaire.

Sont disposées les armatures nécessaires aux exigences de la norme, laquelle préconise une armature type pieux circulaires, c'est-à-dire une armature longitudinale uniformément répartie, confinée par des étriers circulaires (ou spirales).

- Palplanches métalliques de sections commerciales ou définies par l'utilisateur.

Pour des palplanches de type Z, Oméga ou définies par l'utilisateur, le programme choisit la palplanche (profil) de la série qui vérifie l'inéquation :

$$\sigma_{\text{VON\_MISES}} \leq \sigma_{\text{LIM\_ELASTIQUE}}$$

Dans le processus de choix des palplanches, le programme recalculé l'écran afin de considérer les changements des propriétés des palplanches et ainsi d'utiliser les efforts réels de chaque profil évalué.

- Rideaux de micropieux.  
De façon similaire à celle des palplanches, le programme choisit le tube vérifiant toutes les conditions de résistance d'une pièce de directrice droite et de section composée (béton + acier).
- Ecrans génériques de propriétés définies par l'utilisateur.  
Comme on peut s'y attendre, la définition de ce type d'écran ne permet pas de réaliser son dimensionnement, mais seulement de connaître ses efforts.  
Lors de la vérification, est réalisé un processus de contrôle des recommandations exigées par la norme sélectionnée, en utilisant une liste ample et complète de vérifications géométriques, de résistance et de stabilité ou équilibre global (stabilité des moments globaux, poussées passives mobilisées et cercle de glissement le plus défavorable).

### 1.2.5. Armature

L'armature des parois moulées d'épaisseur constante et des écrans de pieux équidistants de section circulaire peut être dimensionnée ou vérifiée. Le programme possède de puissants outils pour la gestion pratique, rapide et intuitive de toutes les armatures et réalise immédiatement la vérification de la nouvelle armature de l'écran.

Les armatures peuvent être éditées via les tracés et sections transversales et, de plus, le programme permet d'accéder à une vue 3D de tout l'écran pour le visualiser avec le maximum de ressemblance possible.

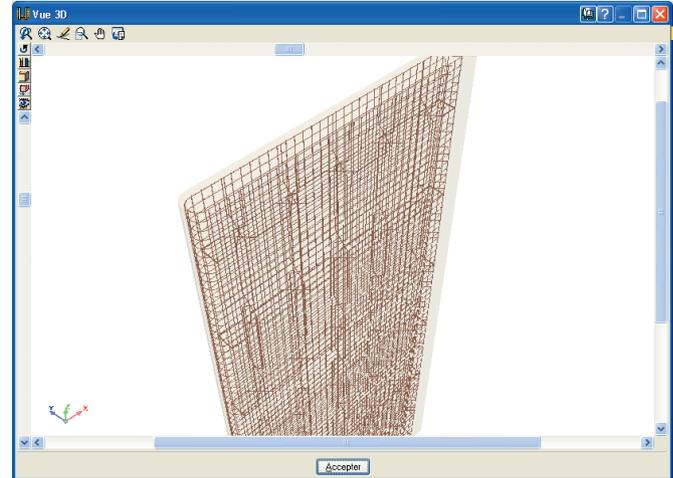


Fig. 1.30

L'utilisateur pourra facilement réaliser les plans d'armatures nécessaires à une exécution correcte, dans lesquels, en plus de la définition complète de l'écran, il pourra disposer des mesures et du ferrillage des barres.

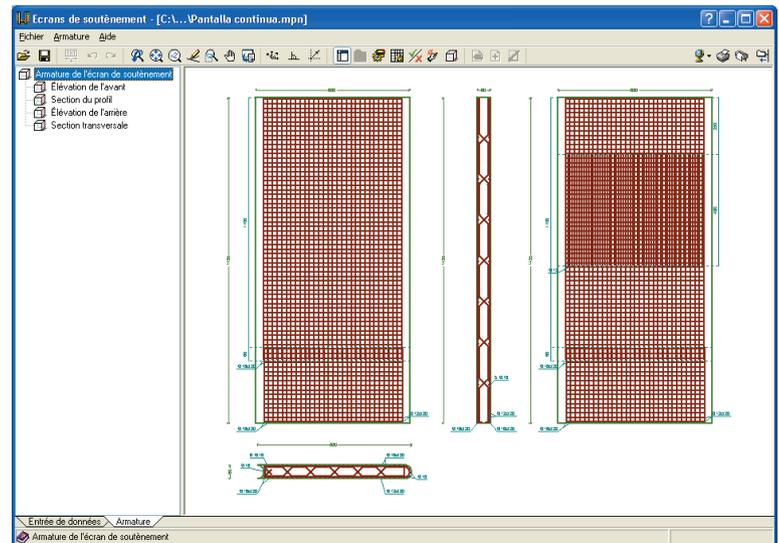


Fig. 1.31

### 1.3. Méthode de travail

Il est recommandé de travailler de la manière suivante:

1. Créez un **Nouveau fichier** avec le nom de l'ouvrage.
2. Sélectionnez le type d'assistant ou **Aucun**. Dans ce dernier cas vous devrez créer manuellement les phases ou étapes constructives avec l'option **Sélection** et entrer toutes les données nécessaires dans chaque phase, profondeur d'excavation, ancrages, etc.
3. Revoyez les **données introduites** en passant par la sélection de toutes les **phases**.
4. **Calculez** et **révissez** les efforts dans chaque phase en cliquant sur **Efforts**.
5. Si l'écran de soutènement est en béton armé, cliquez sur le bouton **Dimensionner** pour obtenir les armatures.
6. Revoyez les récapitulatifs de vérification avec le bouton **Vérifier**.
7. Editez les armatures, à l'aide du bouton **Edition armature**, puis **Vérifier**.
8. Obtenez les récapitulatifs et plans en utilisant les boutons **Récapitulatifs de l'ouvrage** et **Plans de l'ouvrage**.

### 1.4. Aides

Dans toutes les introductions ou éditions de données, l'utilisateur peut solliciter l'aide informant sur la donnée qu'il désire gérer de plusieurs manières:

#### 1.4.1. Icône avec le point d'interrogation

Cliquez sur le point d'interrogation qui apparaît dans le coin supérieur droit de chaque fenêtre puis sur la donnée désirée (les options pour lesquelles vous disposez d'une aide s'entourent en bleu). Ensuite cliquez sur l'icône pour laquelle vous souhaitez obtenir de l'aide.

Pour obtenir une aide spécifique sur une option d'un menu déroulant de la fenêtre principale du programme, cliquez sur le point d'interrogation, déroulez le menu qui contient l'option pour laquelle vous souhaitez consulter l'aide, puis cliquez sur l'option. Une fenêtre apparaîtra avec l'information sollicitée.

Pour désactiver ce type d'aide vous disposez de plusieurs possibilités : cliquez sur le bouton droit de la souris, cliquez sur l'icône avec le point d'interrogation ou utilisez la touche **Esc**.

#### 1.4.2. Touche F1

Dérouler le menu, placer le curseur sur l'option et, sans l'exécuter, taper sur la touche F1.

#### 1.4.3. Guide rapide

Bien entendu, le manuel de l'utilisateur reste accessible à tout moment dans le menu **Aide > Guide rapide**.

## 2. Ecrans de soutènement

### 2.1. Typologies

#### 2.1.1. Ecrans génériques

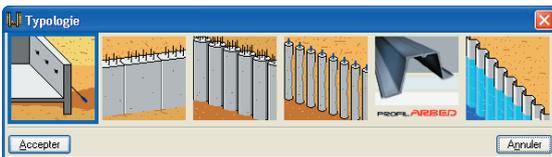


Fig. 2.1

Pour cette typologie, il est demandé de définir les modules d'élasticité longitudinale et transversale du matériau utilisé, ainsi que son poids propre. A partir de ces données, le programme pourra calculer les efforts s'appliquant sur l'écran.

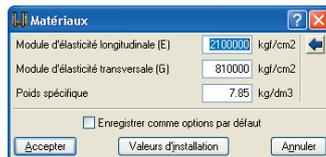


Fig. 2.2

#### 2.1.2. Paroi moulée

Cette typologie est un écran de soutènement réalisé en béton armé coulé dans le sol.

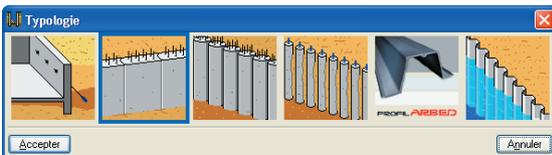


Fig. 2.3

Dans la description des matériaux, on définit la qualité du béton, l'acier des barres, le milieu ambiant, le recouvrement générique et le diamètre du plus gros granulat. L'utilisateur a également la possibilité de limiter la résistance caractéristique du béton.

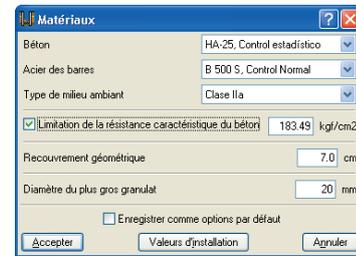


Fig. 2.4

Une fois l'écran de soutènement calculé, vous pouvez éditer son armature via l'onglet Armature présent en bas à gauche de la fenêtre principale.

#### 2.1.3. Ecrans de pieux en béton armé

Typologie d'écrans de pieux en béton armé in situ.

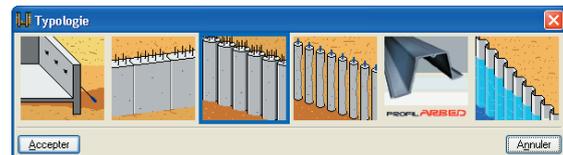


Fig. 2.5

Cette typologie permet par exemple d'introduire des pieux sécants, où chaque pieu est en contact avec ceux qui lui sont adjacents, formant une structure continue, constituée

de pieux primaires en mortier ou en béton, sans armatures, et de pieux secondaires en béton armé. Ce type d'écran est en général utilisé dans des terrains durs avec un niveau phréatique superficiel, ou lorsque l'utilisation de boues thixotropiques pour la stabilité de l'excavation est impossible.

Dans la géométrie de l'écran de pieux, on définit le diamètre et la séparation entre les axes des pieux résistants ou la bande de terrain poussant sur celui-ci. Dans le cas des écrans de pieux sécants, vous devrez introduire la distance entre les axes de pieux secondaires.



Fig. 2.6

Une fois l'écran de soutènement calculé, vous pouvez éditer son armature, uniquement constituée d'une armature de base verticale et de cercles horizontaux.

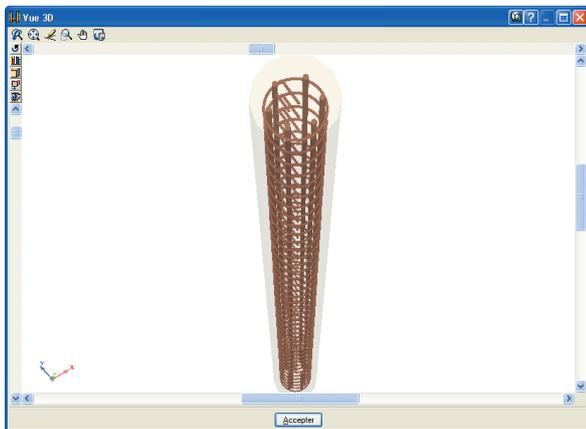


Fig. 2.7

## 2.1.4. Ecrans de micropieux

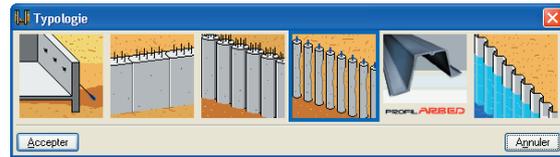


Fig. 2.8

Les micropieux sont des éléments cylindriques, forés in situ, armés de tubes en acier, injectés de chaux ou de mortier de ciment, et dont les diamètres ne dépassent habituellement pas 30 cm. On définit le diamètre extérieur ou diamètre d'excavation et le programme dimensionne le tube cylindrique d'acier définissable dans la bibliothèque. Le dimensionnement du micropieu est réalisé en flexion-compression excentrée. Pour le calcul de la section de béton aux états limites ultimes, la méthode de la parabole rectangle est employée, en utilisant les diagrammes contrainte-déformation du béton et de l'acier. A partir de la série du profil sélectionné pour l'ouvrage, tous les profils de la série sont vérifiés de façon séquentielle croissante. La compatibilité des efforts et des déformations est établie et il est vérifié que les contraintes du béton et de l'acier ainsi que leurs limites de déformation ne sont pas dépassées.

L'excentricité minimale ou accidentelle est considérée, tout comme l'excentricité additionnelle de flambement, selon la norme, en limitant la valeur de l'élançement mécanique conformément à celle-ci. La longueur de flambement considérée est la longueur libre dans chaque phase, en considérant impossible le flambement de la partie enterrée, ou entre points de moment nul (lorsqu'il existe des planchers, des butons, etc., qui produisent des inflexions dans le diagramme des moments fléchissants).

Le dimensionnement maximal du tube circulaire est limité par le diamètre du micropieu.

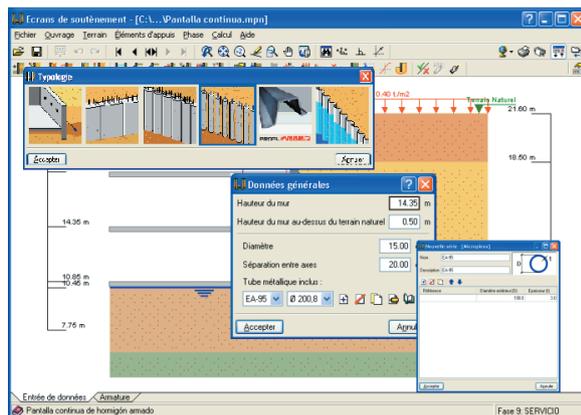


Fig. 2.9

Les écrans de micropieux sont généralement utilisés:

- Dans les espaces réduits, concernant les superficies d'étage ou les gabarits.
- Lorsque l'accessibilité au lieu d'excavation est compliquée.
- Si on souhaite limiter les déformations ou les mouvements sur les constructions contiguës.
- Seulement s'il n'existe pas de niveau phréatique au-dessus de la cote maximale d'excavation, étant donné qu'il s'agit d'une solution discontinue de soutènement et donc perméable à l'eau.

Deux options de calcul correspondant aux recouvrements minimal et maximal pour le dimensionnement du tube du micropieu s'ajoutent au programme.

## 2.1.5. Ecrans en palplanches du fabricant ProfilARBED

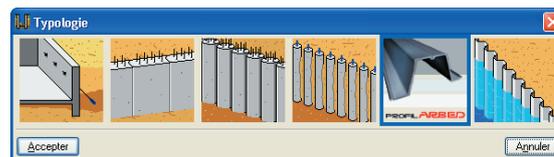


Fig. 2.10

Les paramètres géométriques et la résistance nécessaire au calcul des palplanches du fabricant **ProfilARBED** sont obtenus automatiquement une fois la sélection du **Type de section** et du **Profil** réalisée dans le menu **Ouvrage > Données générales**.

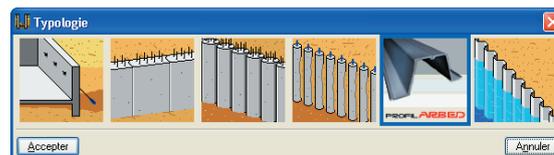


Fig. 2.11

Le type d'acier du profil peut être sélectionné dans **Ouvrage > Matériaux**.

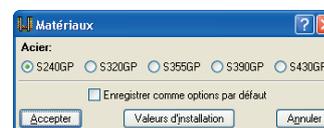
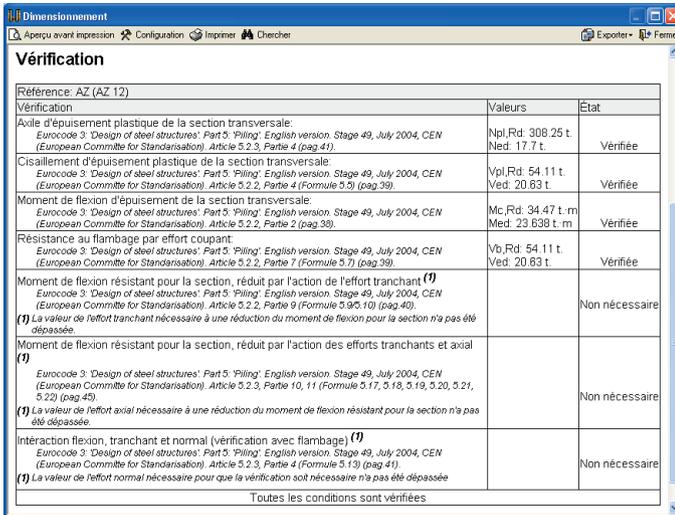


Fig. 2.12

La vérification du profil est réalisée en accord avec les critères de l'Eurocode 3, partie 5 (prEN 1993-5:2004). Il est également possible de dimensionner un profil satisfaisant toutes les vérifications requises de la série de profils sélectionnée.



Vérification	Valeurs	État
Référence: AZ (AZ 12) Avale d'épaulement plastique de la section transversale: <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 4 (page 41).</i>	Npl.Rd: 308 25 t. Ned: 17.7 t.	Vérifiée
Cisaillement d'épaulement plastique de la section transversale: <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 4 (Formule 5.3) (page 39).</i>	Vpl.Rd: 54 11 t. Ved: 20 63 t.	Vérifiée
Moment de flexion d'épaulement de la section transversale: <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 2 (page 38).</i>	Mc.Rd: 34 47 t.m Med: 23 638 t.m	Vérifiée
Résistance au flambage par effort coupant: <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 7 (Formule 5.7) (page 39).</i>	Vb.Rd: 54 11 t. Ved: 20 63 t.	Vérifiée
Moment de flexion résistant pour la section, réduit par l'action de l'effort tranchant <sup>(1)</sup> <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 9 (Formule 5.95.10) (page 40).</i> <sup>(1)</sup> La valeur de l'effort tranchant nécessaire à une réduction du moment de flexion pour la section n'a pas été dépassée.		Non nécessaire
Moment de flexion résistant pour la section, réduit par l'action des efforts tranchants et axial <sup>(1)</sup> <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 10, 11 (Formule 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22) (page 45).</i> <sup>(1)</sup> La valeur de l'effort axial nécessaire à une réduction du moment de flexion résistant pour la section n'a pas été dépassée.		Non nécessaire
Interaction flexion, tranchant et normal (vérification avec flambage) <sup>(1)</sup> <i>Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: 'Piling', English version, Stage 49, July 2004, CEN (European Committee for Standardisation), Article 5.2.2, Partie 4 (Formule 5.13) (page 41).</i> <sup>(1)</sup> La valeur de l'effort normal nécessaire pour que la vérification soit nécessaire n'a pas été dépassée.		Non nécessaire

Toutes les conditions sont vérifiées

Fig. 2.13

## 2.1.6. Ecrans de palplanches métalliques

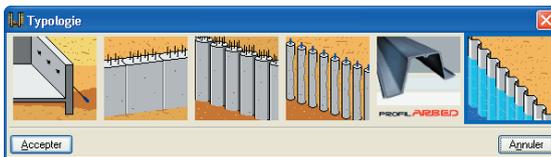


Fig. 2.14

Deux typologies pré-établies et une typologie générique sont admises.

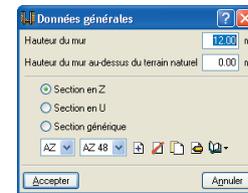


Fig. 2.15

Les palplanches incluses dans le programme correspondent au fabricant Arbed (Luxembourg).

- **Section en Z**

Sont demandées la largeur, la hauteur totale et l'épaisseur de l'aile d'une pièce; mais également l'aire et le moment d'inertie, tous deux par mètre de longueur d'écran (Fig. 2.16). Le programme contient la série AZ.

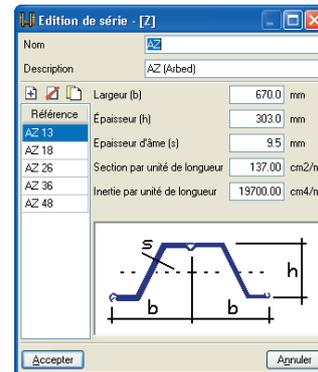


Fig. 2.16



- **Section en Omega**

Sont demandées la largeur de la pièce simple, la hauteur de la pièce composée et l'épaisseur de l'aile; mais également l'aire et le moment d'inertie, tous deux par mètre de longueur d'écran. Le programme contient les séries PU et LS.

- **Section générique**

Sont demandées la largeur à l'avant (distance de la fibre avant la plus éloignée de l'axe neutre de la section) et la largeur arrière (distance de la fibre arrière la plus éloignée de l'axe neutre de la section); mais également l'aire totale, la surface résistante à l'effort tranchant et l'inertie, toutes par mètre de longueur d'écran. Pour chaque type de section, qu'il soit en Z, en Omega ou générique, l'utilisateur peut créer autant de séries et de profils dans la série qu'il le souhaite.

Une fois une série et un profil de cette série choisis, on procède au dimensionnement. Dans le cas où le profil choisi n'est pas satisfaisant, le programme prend le suivant de la série et recalcule l'écran, étant donné qu'en changeant le profil on change également les efforts. Ensuite une nouvelle vérification est effectuée, et si le profil n'est toujours pas satisfaisant, l'opération est répétée.

Les vérifications effectuées pour ce type d'écran sont les suivantes (Fig. 2.17):

- **Contrainte avec majoration pour élancement**

La contrainte de Von Mises est calculée à partir de la contrainte normale (en fonction de l'effort normal, du coefficient de flambement dû à l'élancement, du moment de flexion et du module résistant) et de la contrainte de cisaillement (en fonction de l'effort tranchant et de la section résistante à l'effort tranchant).

- **Contrainte avec excentricité de charge en tête**

Dans ce cas, au lieu de multiplier l'effort normal par le coefficient de flambement comme précédemment, on considère un moment additionnel égal à l'effort normal en tête multiplié par l'excentricité maximale produite par la déformation de l'écran.

- **Élancement**

Puisqu'il s'agit d'un élément comprimé, il est vérifié que l'élancement de la palplanche ne dépasse pas celui recommandé par la norme.

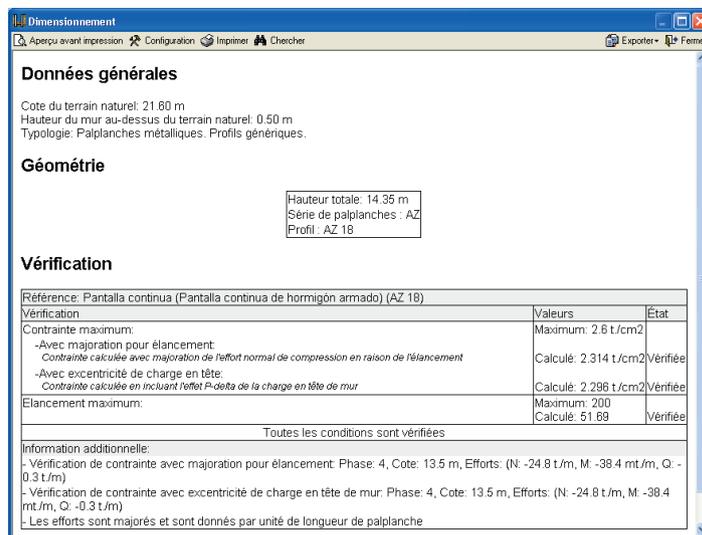


Fig. 2.17

### 2.1.7. Condition d'encastrement pour chaque typologie

La condition d'encastrement de l'écran dans la roche dépend de la typologie. Les longueurs d'encastrement sont les suivantes:

**Ecran générique:**

$$L_{\text{encastrement}} = \sqrt{\frac{12 \cdot I_{\text{transversale}}}{A_{\text{transversale}}}}$$

**Paroi moulée:**

$$L_{\text{encastrement}} = 2 \cdot \text{épaisseur écran}$$

**Ecran de pieux:**

$$L_{\text{encastrement}} = 2 \cdot \text{diamètre pieux}$$

**Ecran de micropieux:**

$$L_{\text{encastrement}} = 2 \cdot \text{diamètre micropieux}$$

**Ecran de palplanches:**

$$L_{\text{encastrement}} =$$

$$= 2 \cdot (\text{distance maximale entre la palplanche et le centre à l'arrière} +$$

$$+ \text{distance maximale entre la palplanche et le centre à l'avant})$$

(générique)

**2.2. Vérification du ferrailage**

Sont détaillées ci-après les vérifications effectuées pour l'armature d'un écran en béton armé. En premier lieu une justification des armatures horizontale et verticale est réalisée, en vérifiant que tous les critères géométriques et résistants sont respectés. Ensuite les raidisseurs sont vérifiés.

Pour les vérifications résistantes, des sections de vérification sont établies tous les 0,25 m. Dans chacune des sections sont obtenus les efforts de calcul à partir des résultats de chacune des phases, selon les hypothèses suivantes:

- **H1:** Effort normal, effort tranchant et moment fléchissant de chaque phase multipliés par le coefficient de majoration.
- **H2:** Effort normal nul, effort tranchant et moment fléchissant multipliés par le coefficient de majoration.

Pour les vérifications aux états limites ultimes le coefficient de majoration sera celui introduit par l'utilisateur, selon qu'il s'agit d'une phase constructive ou de service. Pour les vérifications des états limites de service (fissuration) les coefficients de majoration sont pris égaux à l'unité.

Les efforts sont toujours calculés par module et la vérification est effectuée en prenant une section résistante de celui-ci tel qu'indiqué sur la figure suivante.

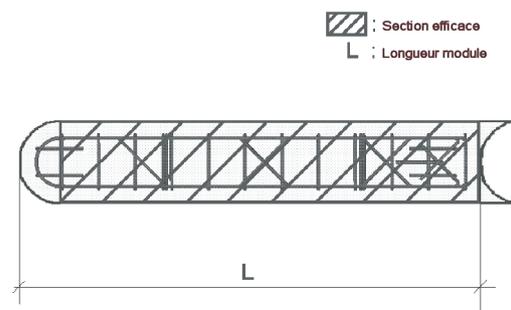


Fig. 2.18

**2.2.1. Enrobage**

Comme il s'agit d'un élément bétonné en pleine fouille, l'enrobage géométrique de l'armature doit être celui correspondant à cette condition dans la norme utilisée.

**2.2.2. Séparation minimale des armatures**

Pour permettre un bétonnage correct, une séparation libre minimale est exigée entre les armatures selon la norme.

### **2.2.3. Séparation maximale des armatures**

Cette limite est établie afin d'éviter qu'il reste des zones non ferrillées. On peut considérer qu'il s'agit d'une condition minimale pour rester dans le domaine du 'béton armé' contrairement au 'béton non armé'.

### **2.2.4. Pourcentage géométrique minimal**

Afin de contrôler la fissuration due aux déformations générées par les effets de la température ou du retrait, des pourcentages minimaux d'armature sont imposés selon la norme.

### **2.2.5. Pourcentage maximal géométrique**

Un maximum est imposé pour le pourcentage d'armature verticale totale de 4%, basé sur l'article 5.4.7.2 de l'EC-2.

### **2.2.6. Pourcentage mécanique minimal**

Des pourcentages mécaniques minimaux pour l'armature verticale sont exigés pour que des ruptures fragiles ne se produisent pas à la fissuration de la section sous les efforts de flexion composée.

### **2.2.7. Vérification sous flexion composée**

La justification résistante de la section est réalisée en utilisant comme règle constitutive du béton le diagramme déformations-contraintes simplifié parabole rectangle, sur

lequel peut se distinguer la zone des efforts de rupture sous flexion composée de celle de non rupture d'une section en béton armé. La vérification sous flexion composée a été définie pour toutes les normes pouvant être utilisées avec le programme en considérant leurs indications quant à l'intégration des contraintes dans la section et aux pivots qui délimitent les déformations maximales permises par les matériaux constitutifs (acier et béton).

Au moment de réaliser cette vérification, il est pris la précaution d'ancrer les armatures dans le but de pouvoir les considérer effectives dans le calcul sous flexion composée.

De plus, comme les efforts de flexion composée agissent conjointement à l'effort tranchant, il se produit une interaction entre les deux types d'effort. Ce phénomène est pris en compte en décalant la courbe enveloppe des moments fléchissants dans le sens le plus défavorable, d'une distance déterminée par la norme utilisée.

### **2.2.8. Vérification à l'effort tranchant**

La vérification de cet état limite ultime est réalisée, de la même manière que sous flexion composée, à différents niveaux de l'écran de soutènement. Comme la section ne présente pas d'armature transversale, seule est considérée la contribution du béton pour la résistance à l'effort tranchant.

La valeur de la contribution du béton sous effort tranchant est évaluée à partir d'un terme  $V_{CU}$  obtenu de manière expérimentale. Ce terme est inclus en général dans la vérification de l'effort tranchant ultime par traction dans l'âme de la section. Dans l'application, les diverses expressions qui évaluent cette composante  $V_{CU}$  ont été considérées selon la norme choisie.

### **2.2.9. Vérification de la fissuration**

L'état limite de fissuration est un état limite de service qui se vérifie afin de contrôler l'apparition de fissures dans les structures en béton, dans notre cas : un écran de soutènement. Dans le cas des murs, le contrôle de la fissuration est très important puisque celle-ci se produit principalement sur la face arrière. Cette zone, où il est possible que la corrosion des armatures soit abondante, ne peut être observée visuellement. Il peut alors se produire la détérioration de la structure sans qu'il soit possible d'apprécier les effets négatifs qui se produisent sur le mur. Il faut donc contrôler les fissures générées par les actions qui agissent sur le mur (terrain, niveau phréatique, surcharges...), et non les fissures dues au retrait et à la température qui sont déjà prévenues en considérant des minimums géométriques d'armature.

Pour le calcul de la fissuration (contrainte limite des barres ou ouverture limite de la fissure, selon la norme), un processus simplifié en flexion simple est réalisé, avec lequel on obtient des résultats du côté de la sécurité par rapport à ceux qui pourraient s'obtenir en appliquant les méthodes en flexion composée.

Pour les différentes normes utilisées, les résultats obtenus sont comparés avec les limites imposées par chaque norme, selon le type d'exposition ou de fissuration à laquelle la structure se trouve exposée.

A la différence des états limites ultimes de flexion composée et de l'effort tranchant dans lesquels les combinaisons d'actions correspondantes sont utilisées ; dans le cas de la fissuration, les combinaisons employées sont celles des actions correspondantes aux états limites de service.

Le programme calcule la contrainte de traction des barres ou ouverture caractéristique des fissures  $w_k$  pour toutes les hypothèses de chargement.

Le calcul est répété à différentes cotes du voile selon le même procédé que pour les vérifications sous flexion composée et sous effort tranchant. La valeur la plus défavorable est alors extraite et comparée avec la valeur limite de contrainte dans les barres ou d'ouverture des fissures, tel qu'indiqué dans la norme. Il est ainsi possible de s'assurer du respect ou non de cet état limite de service.

### **2.2.10. Vérification des longueurs de recouvrement**

Le calcul des longueurs de recouvrement est effectué selon les différentes normes considérées.

### **2.2.11. Vérifications des raidisseurs**

Il est vérifié que le diamètre des raidisseurs est au moins égal à celui de l'armature de base, et que ceux-ci sont répartis uniformément le long de l'écran de soutènement, de façon à ce que la séparation entre eux soit au maximum de 2,5 m pour les horizontaux, et de 1,5 m pour les verticaux.

Ces critères sont communs à toutes les normes.

## **2.3. Dimensionnement de l'armature**

### **2.3.1. Dimensionnement de l'armature verticale**

De toutes les entrées de la table d'armatures, ce sera la plus économique qui sera sélectionnée parmi toutes celles qui respectent les critères de séparation, pourcentage et de résistance. En effet, l'armature de base doit, en plus de vérifier les critères de séparation et de pourcentage, couvrir au moins 50% du moment maximal. Des renforts seront

disposés dans les zones où la dite armature ne respecte pas les vérifications de flexion composée et de fissuration.

Dans le cas où les longueurs des barres seraient supérieures à la longueur maximale introduite par l'utilisateur, les recouvrements nécessaires seront générés.

### 2.3.2. Dimensionnement de l'armature horizontale

De toutes les entrées de la table d'armatures, ce sera la plus économique qui sera sélectionnée parmi toutes celles qui respectent les critères de séparation et de pourcentage décrits auparavant pour l'armature horizontale.

### 2.3.3. Dimensionnement des raidisseurs

Le diamètre du raidisseur, qu'il soit vertical ou horizontal, doit être supérieur ou égal au plus grand diamètre des armatures avant et arrière. Le nombre de barres disposées est tel que la séparation des raidisseurs horizontaux soit au maximum de 2,5 m et celle des verticaux de 1,5 m.

### 2.3.4. Editeur d'armatures

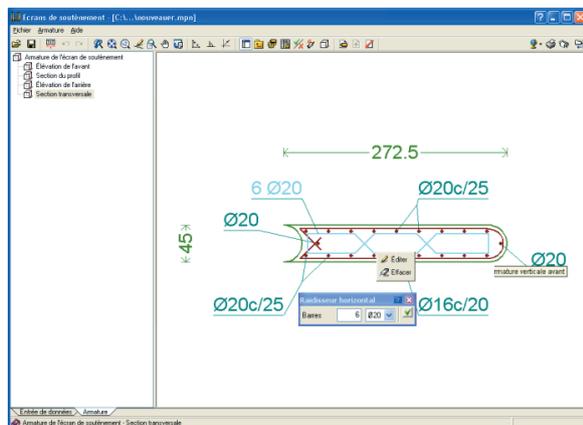


Fig. 2.19

Toutes les armatures sont éditées (effacées, ajoutées ou modifiées) en cliquant avec le bouton droit de la souris sur les armatures du mur dans l'onglet Armatures.

Pour ajouter ou supprimer des armatures, il faut prendre en compte qu'il existe une armature de base à laquelle peuvent être ajoutés des renforts là où il y a des tractions. Par conséquent, en cliquant avec le bouton droit de la souris sur une armature de base, un menu contextuel apparaît avec les possibilités suivantes :

- Possibilité d'ajouter des renforts seulement aux armatures de base présentant des zones de traction. Lorsque le pointeur de la souris se déplace sur ces armatures, elles changent de couleur, signifiant ainsi qu'il est possible d'agir dessus.

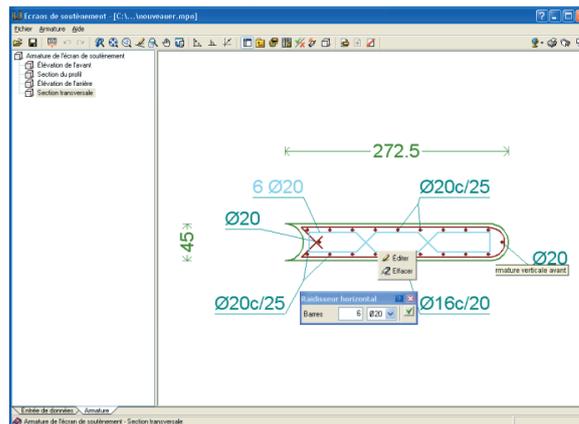


Fig. 2.20

- En cliquant avec le bouton droit de la souris sur une armature de base pouvant posséder des renforts, apparaissent dans un menu contextuel les types de renforts dépendant des zones possibles de traction et les renforts déjà existants. Si une armature de base possède déjà tous les renforts possibles introduits, il n'est pas possible d'ajouter plus de renforts.

- Les renforts déjà existants pourront être modifiés ou éliminés en cliquant dessus avec le bouton droit de la souris.

En cliquant avec le bouton droit de la souris sur une zone vide d'armatures, s'affiche un menu contextuel dans lequel apparaissent les options suivantes :

- **Nouveau.** Toutes les armatures de base auxquelles peuvent être ajoutées des renforts dans la situation actuelle se dessinent de couleur différente. Vous pouvez ajouter un renfort en cliquant avec le bouton gauche sur une de ces armatures de base.
- **Effacer.** Tous les renforts existants sont mis en évidence. En cliquant sur l'un d'entre eux avec le bouton gauche de la souris, celui-ci sera supprimé.
- **Options.** Affiche une fenêtre dans laquelle apparaissent les options influant sur le dimensionnement du mur ainsi que les coefficients de sécurité employés. Cette fenêtre est également accessible depuis le menu **Ouvrage > Options** de l'onglet **Entrée des données**.
- **Tables d'armature.** Elles peuvent également être éditées depuis **Ouvrage > Tables d'armature** de l'onglet **Entrée des données**.
- **Vérifier**
- **Réarmer**
- **Vue 3D**

Il est également possible de déplacer les textes faisant référence aux armatures en utilisant l'icône  de la barre d'outils.

Vous pouvez visualiser ou cacher le schéma en forme d'arbre de l'armature en cliquant sur l'icône  de la barre d'outils.

En utilisant l'icône  vous pouvez accéder au niveau supérieur du schéma de l'arbre d'armature, qu'il soit visible ou non.

## 3. Poussées et actions additionnelles

### 3.1. Poussées

#### 3.1.1. Généralités

##### 3.1.1.1. Coefficients de poussée

Le programme calcule les coefficients de poussée d'après les formules suivantes :

- Poussée au repos: formule de Jaky.
- Poussée active: formule de Coulomb.
- Poussée passive (butée): formule de Rankine.

Pour plus d'information sur le calcul de ces poussées, consultez le manuel annexe de Calcul des poussées.

Dans certains cas, il est pratique d'affecter à ces coefficients des facteurs dont la valeur dépend de la situation du terrain à modéliser. Par exemple, pour des sols surconsolidés, il est intéressant de multiplier le coefficient de poussée au repos par un facteur qui dépend du degré de surconsolidation (il existe plusieurs formules pour obtenir ce facteur: Meyerhof, Mayne et Kulhawy, etc).

Le programme permet l'introduction de facteurs de correction pour chaque type de poussée. Ces facteurs peuvent être différents de chaque côté de l'écran, c'est-à-dire pour le terrain et pour le remblai.

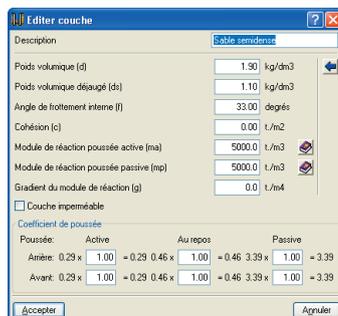


Fig. 3.1

Les valeurs du module de réaction, tout comme pour n'importe quel paramètre géotechnique, sont difficiles à évaluer. Dans le programme vous trouverez des valeurs indicatives de quelques types de terrain, mais il est recommandé de recourir à la documentation spécialisée et aux essais empiriques de plaque de charge pour une meilleure précision. Normalement, si un rapport géotechnique a été réalisé, celui-ci doit fournir la valeur exacte de ce module pour les dimensions qu'aura l'écran de soutènement.

Ces modules de réaction servent à représenter la rigidité du terrain en un point, qui peut être différente selon le sens du déplacement.

De plus, étant donné que la rigidité du sol augmente en général avec la profondeur, vous pouvez considérer une variation linéaire de celle-ci grâce au paramètre connu sous le nom de gradient du module de réaction, qui n'est autre que l'incrément du dit module par mètre de profondeur.

Sur le diagramme, le terrain est considéré comme réagissant de manière plastique, de façon à ce que entre une phase et la suivante le diagramme s'actualise comme le montre la figure, où  $\delta_{ant}$  est le déplacement de la phase antérieure:

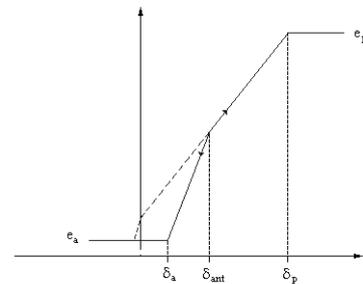


Fig. 3.2

Si l'écran continue de se déplacer vers la droite, nous obtiendrons un point qui se situe sur la courbe de charge tandis que si le sens de déplacement change, la poussée varie selon la courbe de décharge qui passe par le point initial.

Aux points où le terrain est présent à la fois à l'avant et à l'arrière de l'écran, le diagramme de comportement employé est obtenu en faisant la somme des diagrammes correspondants à la profondeur d'un côté et de l'autre de l'écran.

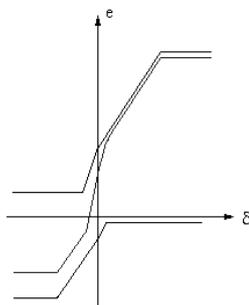


Fig. 3.3

### 3.1.1.2. Effet des charges linéaires et en bande

Les poussées du terrain produites par les surcharges linéaires et en bande se calculent suivant la théorie de l'élasticité (formule de Boussinesq). Plusieurs auteurs recommandent de multiplier les poussées ainsi obtenues par un coefficient compris entre 1 et 2 afin de prendre en compte que les poussées réelles peuvent être supérieures aux théoriques. Il est possible de modifier cette valeur nommée **Coefficient amplificateur de poussée pour surcharges linéaires et en bande** dans le menu **Ouvrage > Options**.

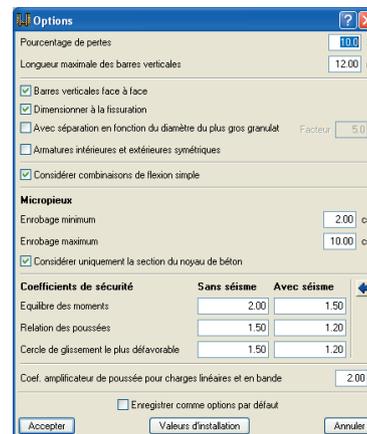


Fig. 3.4

### 3.1.1.3. Niveaux phréatiques suspendus

Dans les terrains avec un niveau phréatique, et lorsqu'il existe des couches suffisamment imperméables alternant avec des couches perméables, il est possible de considérer les lois de poussée de l'eau comme accidentées. La présence de niveaux imperméables entraîne une pression hydrostatique permanente constante sur toute son épaisseur, alors que cette dernière croît dans les niveaux perméables. On considère que cela est valable dans les couches imperméables ayant une épaisseur minimale comprise entre 3 et 4 m et n'étant pas saturées ; de plus, cela permet de faire d'importantes économies. Pour inclure cet effet, vous devez indiquer dans le programme, pour chaque couche de terrain, s'il s'agit d'une **Couche imperméable**, dans la fenêtre **Nouvelle couche / Editer couche** du menu **Terrain**.

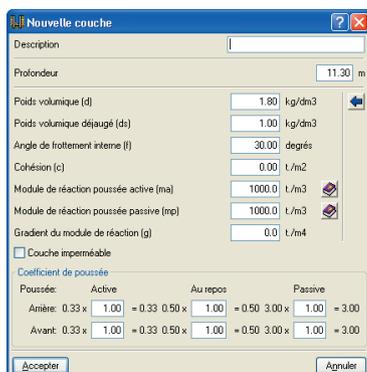


Fig. 3.5

### 3.1.2. Vérifications de stabilité

#### 3.1.2.1. Equilibre des moments et relation des poussées

Dans le menu **Ouvrage > Options**, il est possible de définir les coefficients de sécurité afin de réaliser ces vérifications

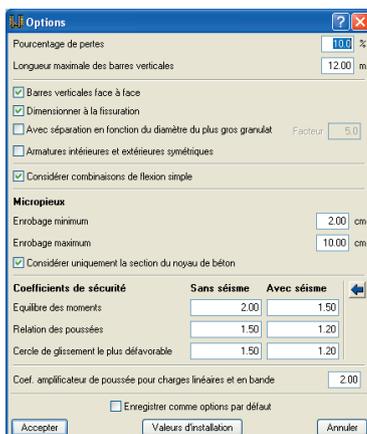


Fig. 3.6

Le coefficient d'équilibre des moments représente, pour chaque phase, la relation entre le moment stabilisateur produit par la poussée passive à l'avant et le moment déstabilisateur produit par la poussée active à l'arrière. Les deux moments se calculent par rapport à la côte de fond de l'écran, lorsqu'il est en console, ou par rapport à la cote d'appui, auquel cas celui-ci est unique.

Le coefficient de relation des poussées représente, pour chaque phase, la relation entre la poussée passive totale mobilisée et la poussée passive réellement mobilisée à l'avant.

S'il existe plus d'un appui, l'écran est stable et il est inutile de calculer ces coefficients.

Vous pouvez définir des coefficients différents pour les vérifications avec séisme et pour celles sans séisme.

Le programme affiche les résultats de chaque phase dans les listes de **Vérification de stabilité (Coefficients de sécurité)**. Vous pourrez accéder à cette liste en sélectionnant l'option **Récapitulatifs de l'ouvrage** se trouvant dans la partie droite de la barre d'outils. Ces données sont également incluses dans les listes que le programme permet de visualiser et d'imprimer après avoir utilisé l'option **Vérifier** du menu **Calcul**. N'oubliez pas que s'il existe plus d'un appui, l'écran est stable et qu'il n'est pas nécessaire de calculer ce coefficient. De ce fait, dans les phases où cela se succède, le texte **"Non nécessaire"** apparaîtra dans les listes.

Vérification	Valeurs	État
Relation entre le moment résisté par les poussées passives sur l'avant et le moment généré par les poussées actives sur l'arrière.		
Hypothèse basique:		
Valeur introduite par l'utilisateur:	Minimum: 2	
-Excavation jusqu'à la cote: -2.00 m:	Calculé: 4.355	Vérfiée
-Mise en place du buton à la cote -1.00 m:	Calculé: 5.115	Vérfiée
-Excavation jusqu'à la cote: -4.50 m:	Calculé: 3.28	Vérfiée
*Mise en place du buton à la cote -4.00 m (f)		Non nécessaire
*Excavation jusqu'à la cote: -6.50 m (f)		Non nécessaire
*Mise en place du buton à la cote -6.00 m (f)		Non nécessaire
*Excavation jusqu'à la cote: -9.00 m (f)		Non nécessaire
*Construction de plancher (Cote: -8.50 m) (f)		Non nécessaire
*Construction de plancher (Cote: -6.00 m) (f)		Non nécessaire
*Construction de plancher (Cote: -3.00 m) (f)		Non nécessaire
*Construction de plancher (Cote: 0.00 m) (f)		Non nécessaire
*Phase de service (f)		Non nécessaire

(f) Il y a plus d'un appui.

Fig. 3.7

### 3.1.2.2. Vérification de la stabilité globale (Cercle de glissement le plus défavorable)

Le programme peut analyser la stabilité globale, via l'obtention du cercle de glissement le plus défavorable. Il peut être consulté sur l'écran (dans la phase visualisée) via l'option **Cercle de glissement le plus défavorable** du menu **Phase**.

Pour plus d'information sur le calcul du cercle de glissement le plus défavorable, consultez le manuel annexe de **Calcul du cercle de glissement le plus défavorable**.

La vérification du cercle de glissement le plus défavorable est réalisée dans les phases où il n'existe encore aucun plancher construit car dans les phases où ceux-ci entrent en fonctionnement, on suppose que la construction, jusqu'à ce qu'elle soit réalisée, empêche le glissement. Le résultat apparaît dans la liste des **Vérifications de stabilité (Cercle de glissement le plus défavorable)**. Vous pourrez accéder à cette liste en sélectionnant l'option **Récapitulatifs de l'ouvrage** se trouvant dans la partie droite de la barre d'outils.

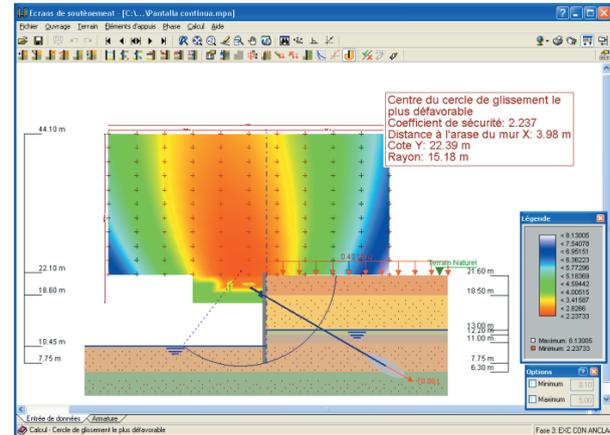


Fig. 3.8

Ces données sont également incluses dans les listes que le programme permet de visualiser et d'imprimer après avoir utilisé l'option **Vérifier** du menu **Calcul**.

Vérification	Valeurs	État
Relation entre le moment résisté par les poussées passives sur l'avant et le moment généré par les poussées actives sur l'arrière.		
Hypothèse basique:		
Valeur introduite par l'utilisateur:	Minimum: 2	
-Excavation jusqu'à la cote: -2.00 m:	Calculé: 7.958	Vérfiée
-Mise en place de l'ancrage actif à la cote -1.00 m:	Calculé: 61.197	Vérfiée
-Excavation jusqu'à la cote: -4.00 m:	Calculé: 49.78	Vérfiée
Relation entre la poussée passive totale et la butée réellement mobilisées sur l'avant		
Valeur introduite par l'utilisateur:	Minimum: 1.5	
-Excavation jusqu'à la cote: -2.00 m:	Calculé: 4.66	Vérfiée
-Mise en place de l'ancrage actif à la cote -1.00 m:	Calculé: 4.51	Vérfiée
-Excavation jusqu'à la cote: -4.00 m:	Calculé: 4.778	Vérfiée
Toutes les conditions sont vérifiées		
Référence: 1 (AZ 49)		
Vérification		
Contrainte maximum:	Maximum: 2.6 t/cm2	
-Avec majoration pour élanement:		
Contrainte calculée avec majoration de l'effort normal de compression en raison de l'élanement	Calculé: 0.5 t/cm2	Vérfiée
-Avec excentricité de charge en tête:		
Contrainte calculée en incluant l'effet P-delta de la charge en tête de mur	Calculé: 0.5 t/cm2	Vérfiée
Élanement maximum:	Maximum: 200	
	Calculé: 41.18	Vérfiée
Toutes les conditions sont vérifiées		
Information supplémentaire:		
Vérification de contrainte avec majoration pour élanement: Phase: 1, Cote: -5.8 m, Efforts: (N: -2.2 t/m, M: 23.6 mt/m, Q: 1.3 t/m)		

Fig. 3.9

Dans le menu **Ouvrage > Options** il est possible de définir les coefficients de sécurité pour la vérification du cercle de glissement. Vous pouvez définir des coefficients différents pour les vérifications **avec séisme** et **sans séisme**.

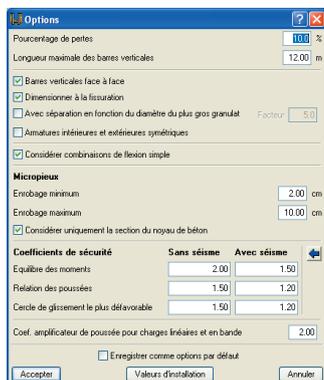


Fig. 3.10

### 3.1.3. Bermes et excavations

#### 3.1.3.1. Considération de l'excavation arrière des phases

Dans des circonstances précises, le processus constructif de l'écran de soutènement exige la réalisation d'excavations dans le terrain arrière. Il est possible d'activer l'option **Profondeur excavée** à l'arrière (menu **Phase > Description**) et d'introduire la valeur correspondante à cette zone de terrain, en plus de celle habituelle de l'avant. Pour que le calcul puisse être réalisé, il est nécessaire que le fond de l'excavation à l'avant reste en dessous de celle à l'arrière.

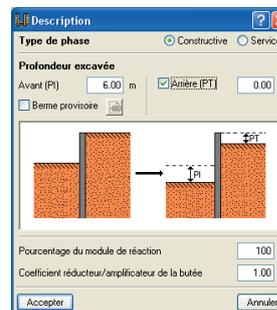


Fig. 3.11

#### 3.1.3.2. Bermes en avant

En pratique, une solution habituelle consiste à laisser des bermes provisoires de terre, qui agissent comme un contrefort passif jusqu'à la mise en place des planchers. Leur définition est possible en considérant son effet stabilisateur sur l'écran de soutènement durant les phases d'excavation ; de cette façon, il est possible de réduire, voire d'éliminer les éléments d'ancrage.

Dans le menu **Phase > Description**, il est possible de choisir pour chacune des phases si l'excavation sera réalisée avec ou sans **Berge provisoire**. La berme est de forme trapézoïdale et sa géométrie est définie par l'introduction de sa **Hauteur** par rapport au fond de l'excavation, de son **Angle de talus** et de sa **Distance à la cime du talus** depuis le parement de l'écran. Lors des calculs des poussées sur l'écran, on considère qu'une partie de la poussée passive correspondant à sa hauteur est développée.

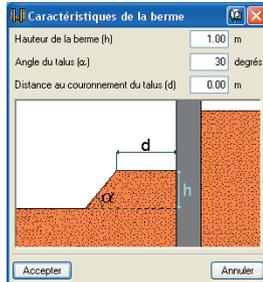


Fig. 3.12

## 3.2. Actions additionnelles sur l'écran

### 3.2.1. Considération de l'action sismique

L'action sismique a pour effet une augmentation transitoire de la poussée sur les murs.

La poussée active, dans des conditions sismiques, est supérieure à celle correspondant à la situation statique.

De la même manière, la poussée passive pouvant être transmise au mur contre le terrain peut être réduite considérablement durant les séismes. La poussée passive en conditions sismiques est inférieure à celle correspondant à une situation statique.

Dans le menu **Ouvrage > Actions**, on trouve les options relatives aux séismes suivantes:

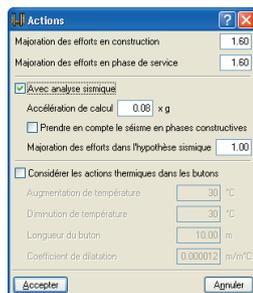


Fig. 3.13

- **Accélération de calcul.** L'accélération horizontale de calcul, obtenue d'après la norme sismorésistante correspondante à la situation géographique de l'ouvrage, est utilisée. L'accélération verticale de calcul sera prise égale à la moitié de la précédente.
- **Prendre en compte le séisme en phases constructives.** Lorsque l'analyse sismique est réalisée, l'effet du séisme est toujours pris en compte dans les phases de service. En sélectionnant cette option, vous prenez également en compte son effet dans les phases de construction.
- **Majoration des efforts dans l'hypothèse sismique.** Les coefficients de majoration des efforts multiplient les diagrammes des efforts obtenus lors de la vérification et du dimensionnement des sections résistantes de béton armé et métalliques. Ce coefficient est utilisé pour majorer les efforts obtenus dans les phases où le séisme est pris en compte.

Que ce soit dans l'option **Calcul > Graphiques des Efforts** ou dans **Calcul > Lois de comportement du terrain** de chaque phase constructive, deux graphiques apparaissent: le premier sans action de séisme et le second avec.

Les deux cas apparaissent également dans les listes des efforts, des résultats des éléments d'ancrage, etc.

Les **Options** pour **l'édition de phases**, qui sont disponibles dans le menu **Phase > Description** (voir Fig. 3.13), sont les suivantes:

- **Pourcentage du module de réaction**  
Le coefficient de réaction, également appelé module de ballast, du sol peut varier à chaque phase en fonction de la profondeur d'encastrement de l'écran. Ce pourcentage permet d'augmenter ou de diminuer à chaque phase sa valeur initiale.
- **Coefficient réducteur/amplificateur de la butée**  
La butée se calcule avec l'hypothèse de prisme droit.

Dans le cas où l'on souhaite considérer un prisme en spirale logarithmique, on peut appliquer un coefficient réducteur de poussée passive. De même, dans quelques cas (tranchées avec écrans proches, etc.), il est possible de mobiliser des butées plus importantes que celles calculées avec cette hypothèse, c'est pourquoi on peut appliquer un coefficient amplificateur de butée. Les actions sismiques font varier transitoirement les poussées sur l'écran. La situation la plus défavorable est considérée lorsque l'accélération sismique se fait de l'arrière vers l'avant. Dans ce cas, la poussée active, la poussée passive et la poussée au repos augmentent à l'arrière de l'écran et diminuent à l'avant.

Le résultat complet du diagramme de comportement du terrain est la somme des poussées des deux côtés de l'écran. Pour savoir si les poussées actives et passives augmentent ou diminuent par rapport au cas sans action sismique, il faut connaître la variation des poussées de chaque côté de l'écran; par conséquent, il n'est à priori pas possible de connaître l'évolution des poussées. Cependant, il se produit généralement une augmentation des poussées actives et passives.

Pour simuler l'effet des charges sismiques, est utilisé un coefficient d'accélération de calcul qui doit être introduit par l'utilisateur et qui modifie le calcul des poussées actives et passives. Le coefficient d'accélération de calcul introduit est l'accélération sismique horizontale  $a_H$ ; l'accélération sismique verticale est définie comme étant la moitié de l'horizontale soit:

$$a_v = \frac{1}{2} a_H \quad (\text{selon la ROM 0.5-94}).$$

Pour le calcul des poussées avec charges sismiques, sont utilisées les formules de Mononobe-Okabe, selon lesquelles le nouveau coefficient de poussée est donné par:

$$K_{\text{Active}} = \frac{1}{\cos(\theta)} \left[ \frac{\sec(\alpha) \cdot \cos(\phi - \alpha - \theta)}{\sqrt{\cos(\alpha + \delta + \theta)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\alpha - \beta)}}} \right]$$

$$K_{\text{Passive}} = \frac{1}{\cos(\theta)} \left[ \frac{\sec(\alpha) \cdot \cos(\phi - \alpha - \theta)}{\sqrt{\cos(\alpha + \delta - \theta)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \cdot \sin(\phi + \beta - \theta)}{\cos(\alpha - \beta)}}} \right]$$

où les angles apparaissent plus loin, dans les figures 3.14 et 3.15, pour le cas générique de poussée sur un mur. Lorsque  $\beta$  est supérieur à  $(\phi - \theta)$ , on prendra  $\beta = (\phi - \theta)$ .

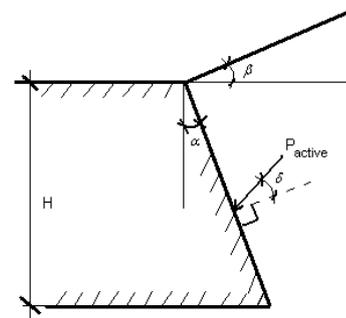


Fig. 3.14 Poussée active

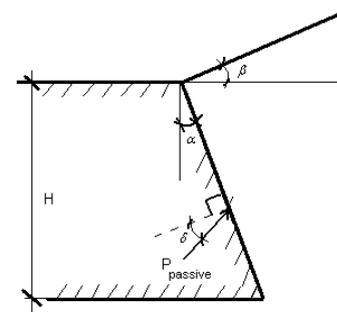


Fig. 3.15. Poussée passive

Les poussées actives et passives s'expriment de la façon suivante:

$$P_{\text{active}} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_{\text{active}} \cdot H^2$$

$$P_{\text{passive}} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_{\text{passive}} \cdot H^2$$

Comme on peut l'observer, une fois l'accélération de calcul ( $a_H$ ) introduite et la géométrie de l'écran connue, les coefficients de poussée déterminant les nouvelles poussées actives et passives peuvent être calculés.

Pour finir, pour calculer l'augmentation de poussée de l'eau libre  $\Delta P_W$  par une charge sismique (tant à l'arrière qu'à l'avant), l'hypothèse de Westergaard est admise:

$$\Delta P_W = \pm \frac{7}{12} \cdot \frac{a_H}{g} \cdot \gamma_W \pm \cdot h^2$$

( $\gamma_W$  est le poids spécifique de l'eau)

### 3.2.2. Actions thermiques dans les butons

Il est possible de prendre en compte l'augmentation ou la diminution de la température dans les butons, ce qui affecte les efforts dans l'écran du fait de la déformation longitudinale résultant de la variation de température. Dans chaque phase où agissent les butons, deux hypothèses additionnelles sont générées: une avec accroissement de la température, et l'autre avec diminution de la température.

La situation des butons doit être prise en compte au moment d'introduire la longueur de ceux-ci. Si deux butons se superposent entre deux écrans similaires dans des terrains semblables, il est correct de supposer que l'effort thermique se répartit également aux extrémités de chaque buton. Dans ce cas, il faudra introduire directement la longueur du buton et, intérieurement, on prendra la moitié de cette grandeur pour le calcul de l'effet sur l'un des écrans.

Autrement, il serait nécessaire de comparer les terrains et écrans où sont placés les butons et d'estimer la proportion de l'effort thermique qu'absorbe l'écran faisant l'objet du calcul, dépendant de la rigidité de chaque appui.

La variation de température provoque des dilatations ou des rétractions dans les butons, effet qu'il est intéressant de prendre en compte dans le calcul structural de l'élément de contention.

Le buton peut être ancré ou non dans l'écran de soutènement. En sélectionnant l'option permettant les tractions, il est possible d'ancrer le buton dans l'écran de façon à ce que si le buton se dilate, il ne se décolle pas de l'écran mais engendre un effort tranchant sur ce même écran. S'il se produit une dilatation du buton et que celui-ci n'est pas ancré dans l'écran, il peut arriver que la diminution de longueur du buton soit supérieure au déplacement de l'écran; dans ce cas, le buton tomberait en cessant d'appuyer sur l'écran. Etant donné qu'il s'agit d'une solution indésirable, cette possibilité est prévenue en calculant la longueur de la séparation (différence entre le déplacement du buton et celui de l'écran).

L'allongement ou la diminution de la longueur du buton sera donné pour chaque cas par la formule suivante:

$$\Delta L = \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot L_b \cdot \Delta T \quad , \quad \text{où}$$

$\alpha$  est le coefficient de dilatation du matériau du buton

$L_b$  est la longueur du buton

$\Delta T$  est la variation thermique

Comme on peut le voir dans l'expression précédente, la longueur prise pour le calcul est égale à la moitié de la longueur du buton (celle introduite par l'utilisateur). Ceci est dû au fait qu'en principe, on considère que les écrans sur lesquels s'appuie le buton sont semblables et que les terrains présentent des caractéristiques similaires. Dans ces

conditions, la variation de longueur du buton est répartie aux deux extrémités de celui-ci et par conséquent, on ne considère que la moitié de cette longueur pour le calcul d'un écran.

Si les conditions citées précédemment ne sont pas validées, il faut prendre en compte la situation des butons au moment d'introduire la longueur de ceux-ci. Il faudra alors comparer les terrains et les écrans où les butons sont mis en place et estimer la proportion de l'effort thermique absorbé par l'écran objet du calcul, dépendant de la raideur de chaque appui. Cette même proportion affectera la longueur des butons et, par conséquent, il faudra introduire le double de cette grandeur.

Prenons l'exemple d'un écran où s'appuie un buton. Si la raideur de cet écran est trois fois supérieure à celle de l'autre extrémité, il apparaît que l'écran de soutènement objet du calcul absorbera trois fois moins de variation de longueur du buton. Par conséquent, la longueur de buton à introduire sera une longueur égale aux trois quarts de la longueur du buton et multipliée par deux. Une fois l'accroissement de longueur par conditions thermiques calculé, celui-ci est introduit comme un déplacement initial au point d'ancrage et est utilisé pour le calcul de la solution de la phase.

En sélectionnant l'option des actions thermiques dans les butons, sont calculées les deux solutions pour la phase, sans et avec actions thermiques. Le calcul de phases successives partira de la solution calculée pour le cas sans action thermique, ainsi le calcul de la solution avec actions thermiques dans les butons n'influera pas sur la solution dans les phases suivantes.

### 3.2.3. Retrait des planchers

On peut considérer le retrait de chaque plancher individuellement, en introduisant la valeur du retrait en millimètres. Lors de la phase d'introduction du plancher, les deux solutions, avec et sans retrait, sont calculées. Dans les phases successives, on utilise seulement le calcul pour le plancher déjà rétracté. Par conséquent, le retrait du plancher n'est pris en compte que pendant la phase de construction de ce dernier. Ainsi, la valeur de retrait potentiel dans cette phase, affectant les résultats obtenus dans les phases suivantes de l'ouvrage, doit être introduite.

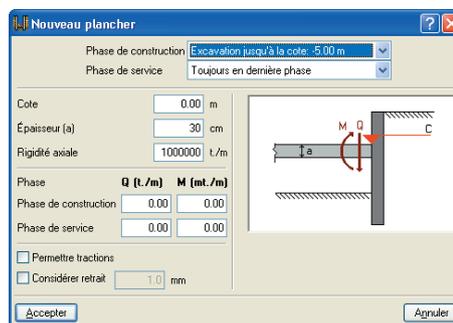


Fig. 3.16

Pour évaluer la valeur de rétraction, il faut prendre en compte diverses variables qui influent sur le phénomène, en particulier: le degré d'humidité ambiante, l'épaisseur ou dimension minimale de la pièce, la composition du béton et le temps écoulé depuis l'apparition du phénomène.

Etant donné le nombre de variables nécessaires pour calculer la valeur de la rétraction, c'est à l'utilisateur d'introduire la valeur de rétraction qu'il estime convenable pour une phase. Cette valeur, tout comme les actions thermiques dans les butons, sera prise comme déplacement initial du point d'ancrage dans l'écran avec lequel la solution est calculée.

De ce qui précède, il est déduit que le traitement de la rétraction est approximative. Comme il a été mentionné, la valeur de rétraction introduite doit correspondre à la rétraction prévue dans la phase où elle est introduite. La rétraction engendrée à posteriori n'est pas considérée.

Ensuite, lorsque l'option de calcul avec rétraction des planchers est sélectionnée, deux solutions, avec et sans rétraction, sont proposées. A la différence du cas des actions thermiques dans les butons, le calcul des phases suivantes est basé sur la solution avec rétraction étant donné que la rétraction affectera les phases successives. Pour finir, étant donné que les planchers peuvent être ou non ancrés dans le mur, des tractions peuvent apparaître dans ces derniers et cela doit être pris en compte lors de l'introduction de la rétraction. Dans le cas où le plancher est ancré (en sélectionnant l'option qui permet les tractions) et qu'il se produit une rétraction, cela engendrera un effort tranchant dans l'écran.

### 3.2.4. Considération des moments aux appuis des planchers

On peut considérer que les planchers introduisent des efforts de flexion sur l'écran avec des valeurs différentes en phase de construction et en phase de service. Pour cela, dans l'édition des données des planchers réalisée lors de l'introduction (ou de l'édition) d'un élément d'appui de type plancher, il faut introduire, conjointement avec les efforts tranchants (**Q**), les valeurs correspondantes aux moments fléchissants (**M**). Cela se fait dans **Eléments d'appui > Nouveau plancher / Editer éléments d'appui**. (Fig. 3.16)

### 3.2.5. Plastification des ancrages

Cette option permet de considérer qu'à partir d'une certaine valeur de la charge de traction nommée charge de plastification, l'ancrage peut continuer à s'élargir sans se rompre, mais est incapable d'accroître sa charge. Pour prendre en compte cet effet, vous devez sélectionner l'option **Charge de plastification** dans la fenêtre d'édition des données d'ancrages actifs et passifs, qui apparaît lors de l'introduction ou de l'édition d'un élément d'appui des types mentionnés (**Eléments d'appui > Nouvel ancrage actif / Nouvel ancrage passif / Editer éléments d'appui**). Une fois le calcul réalisé, il est recommandé de vérifier que les allongements produits dans les ancrages sont admissibles.

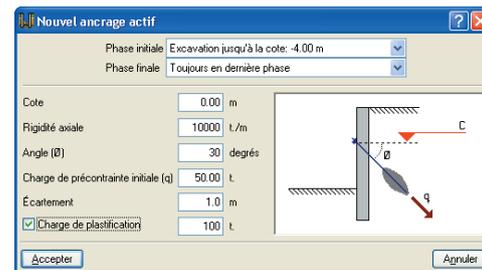


Fig. 3.17

## 4. Méthode de calcul

### Très important

*Le programme calcule les écrans de soutènement comme des éléments structurels soumis aux poussées des différents terrains et aux charges extérieures qui leurs sont appliquées.*

*Les justifications géotechniques ne sont pas effectuées, telles que la détermination de sa résistance en pointe, résistance par frottement, phénomène de Renard, etc., qui font l'objet d'une étude complémentaire à partir du rapport géotechnique, ainsi que les vérifications de tous les éléments tels que butons, ancrages et types d'ancrage, son diamètre, etc., qui exigent également une étude structurelle complémentaire.*

*Le programme ne détermine aucun coefficient de sécurité vis-à-vis de la stabilité au glissement ou au renversement. Le calcul de toutes les phases du mur prend fin lorsqu'il y a équilibre entre les actions et les réactions, mais il n'est pas possible de connaître la réserve de sécurité qui peut exister dans le cas d'un incrément imprévu des actions, d'une diminution de la profondeur sur chantier du mur, etc. Une manière de vérifier cette réserve de sécurité disponible consiste en la répétition des calculs en faisant varier les conditions initiales sur une copie de l'ouvrage.*

*Par exemple, vous pouvez répéter le calcul en diminuant de 20% la longueur enterrée de l'écran en dessous du niveau inférieur de l'excavation, ou en réduisant les paramètres du sol en divisant l'angle de frottement interne par 1.20 et la cohésion par 2. Si vous aviez défini un pourcentage de l'angle de frottement terrain-arrière et terrain-avant réduisez-le à 0 afin que seules les poussées horizontales soient prises en compte. Si pour ces copies de l'ouvrage le calcul se finalise sans problèmes et sans message de non vérification de*

*l'équilibre, cela signifie qu'il existe au minimum une réserve de sécurité pour les coefficients réducteurs introduits.*

*Pour l'obtention des efforts et des déplacements des écrans, une des méthodes les plus utilisées actuellement est l'interaction terrain-écran, où l'amplitude des poussées sur le mur dépend du déplacement de celui-ci. Pour le calcul de l'action produite par le terrain sur l'écran, une approximation non linéaire à la loi réelle de comportement du terrain qui comprend la plastification de celui-ci (comme il sera vu ultérieurement), est utilisée. Ainsi, les éléments d'ancrage, butons et planchers, introduisent une série de co-actions et actions additionnelles qui, évidemment, influent sur le résultat final. En conséquence, l'obtention de la solution n'est pas directe et requière un processus itératif de calcul.*

### 4.1. Modèle de calcul

Le modèle de calcul utilisé consiste en une barre verticale dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues par mètre transversal d'écran. Sur cet écran agissent: le terrain, sur l'arrière comme sur l'avant, les charges sur le terrain, les éléments de soutien latéral tels que les butons, ancrages actifs ou passifs, les éléments constructifs comme les planchers ou les charges appliquées en tête.

L'introduction des éléments de soutien comme les butons, les ancrages actifs et passifs introduisent des conditions d'environnement à l'écran qui se matérialisent par des ressorts de raideur égale à la raideur normale de l'élément.

Lorsqu'une couche de roche est introduite, le programme considère que l'écran se trouve encastré si la longueur introduite est supérieure ou égale à deux fois l'épaisseur de

l'écran. Entre 20 cm et deux fois l'épaisseur, l'écran est considéré appuyé sur le dit affleurement, c'est-à-dire que la rotation en ce point est permise, mais pas le déplacement.

La discrétisation de l'écran est effectuée tous les 25 cm, en obtenant pour chaque point le diagramme de comportement du terrain. De plus, les points sur lesquels agissent des blocages latéraux sont ajoutés à la discrétisation précédemment définie.

#### 4.1.1. Discrétisation de l'écran de soutènement et interaction avec le terrain (loi de comportement du terrain)

L'écran est discrétisé en étant considéré comme une série d'éléments verticaux de type barre avec déformation au cisaillement, unis rigidement entre eux. Tous les éléments présentent les mêmes caractéristiques mécaniques, dépendantes de la typologie, du matériau et de la géométrie de l'écran à calculer.

Le noeud supérieur est toujours considéré comme extrémité libre, alors que pour le noeud inférieur, trois types possibles de coactions sont considérés :

- Extrémité encastrée
- Extrémité articulée
- Extrémité libre

Le choix de l'un ou de l'autre de ces types dépend pour chaque cas des caractéristiques du terrain et de l'écran considéré.

Les efforts introduits par l'action du terrain et des éléments d'appui sont supposés concentrés dans les noeuds extrêmes de chacune des barres verticales.

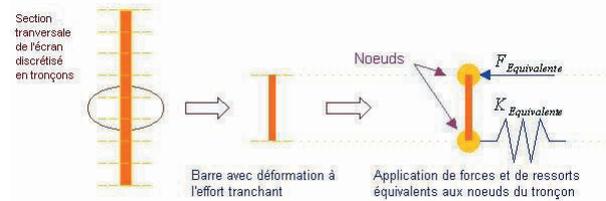


Fig. 4.1. Discrétisation de l'écran de soutènement

Pour obtenir les efforts engendrés par l'action du terrain en chaque noeud, il est nécessaire de définir le modèle de comportement poussée-déplacement. Etant donné que la courbe est complexe, on utilisera l'approximation linéaire par parties suivante :

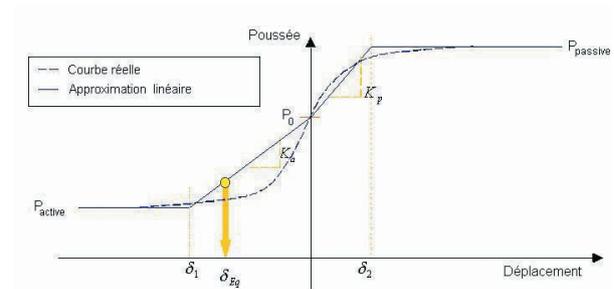


Fig. 4.2. Approximation linéaire de la loi de comportement du terrain

Les lois de comportement du terrain sont obtenues en chaque point de la discrétisation à partir des données du terrain, variant en fonction de la profondeur. Pour une déformation nulle, la poussée est celle correspondant au repos alors que pour des déformations positives ou négatives, la valeur de la poussée est respectivement limitée par les poussées passive et active. Les valeurs des pentes du graphique ( $K_p$  et  $K_a$ ) sont les modules de ballast ou coefficients de réaction.

Etant donné que la fonction de réponse du terrain est définie par tronçons, et que, à priori, la zone à laquelle appartient le déplacement d'un point concret n'est pas connue, il est nécessaire d'utiliser un procédé itératif pour la résolution du problème.

Pour des déplacements inférieurs à  $\delta_1$  ou supérieurs à  $\delta_2$  (zone de poussée constante active ou passive), l'action du terrain est représentée par une force dont l'amplitude est équivalente à la poussée correspondante (active ou passive). Pour les points ayant des déplacements compris entre  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , l'action du terrain est considérée comme une force extérieure indépendante de la déformation, et correspondante à la somme de la poussée de déformation nulle et d'une force dépendant de la déformation qui est représentée par un ressort de constante équivalente au module de ballast.



Fig. 4.3. Discrétisation du terrain sur l'écran

Pour les zones de l'écran sur lesquelles le terrain agit des deux côtés, on utilise un diagramme formé de six droites, résultant de la somme des diagrammes de comportement à l'arrière et à l'avant en chaque point. Dans ce cas, l'action du terrain sur l'écran peut également être représentée par l'introduction sur les nœuds d'une charge extérieure, ou d'une charge extérieure et d'un ressort.

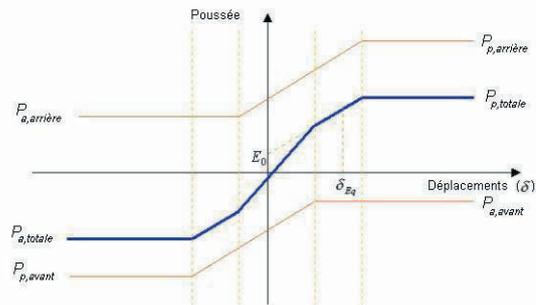


Fig. 4.4. Diagramme de comportement du terrain avec sol des deux côtés

Tout ce à quoi il a été fait référence jusqu'ici correspond au comportement du terrain pendant une phase (d'exécution ou de service) déterminée. Pour la résolution complète du problème, il faut également définir la variation des diagrammes de comportement d'une phase à l'autre.

Toute charge ou décharge du terrain (excavation, accroissement des charges, etc.) engendre une variation des poussées. Pour la prendre en compte, on suppose que la variation de pression horizontale du sol d'une phase à l'autre pour une déformation nulle,  $\Delta\sigma_H$ , peut être calculée à partir de la variation de pression verticale,  $\Delta\sigma_V$ , en utilisant un coefficient de proportionnalité  $K_0$ .

$$\Delta\sigma_V = K_0 \cdot \Delta\sigma_H$$

Tant que les poussées ne varient pas d'une phase à l'autre, il est nécessaire de considérer les déformations plastiques ou non réversibles qui apparaissent à chaque changement de sens des déformations dans une zone de l'écran, par exemple, lors de l'introduction et de la mise en tension d'un ancrage. En conséquence, les pentes des diagrammes poussées - déformations pour les cas de charge et de décharge sont respectivement égales à celles, initiales, des branches passive et active.

La figure suivante montre les hypothèses exposées, via les diagrammes de poussée qui sont considérés qualitativement pour un point du terrain situé dans la zone d'encastrement. Sur cette figure apparaît l'évolution autour du point 0, représentant la poussée au repos, qui relie le point 1 correspondant à la poussée active dans la zone droite et à une poussée inférieure à la poussée passive à gauche. En ce point apparaît, lors de la mise en tension de l'ancrage, un changement de sens dans les déplacements, et au lieu de réaliser un tour sur cette branche, les droites tracées en gras se poursuivent jusqu'à rejoindre les états limites actif et passif prolongés par des droites horizontales.

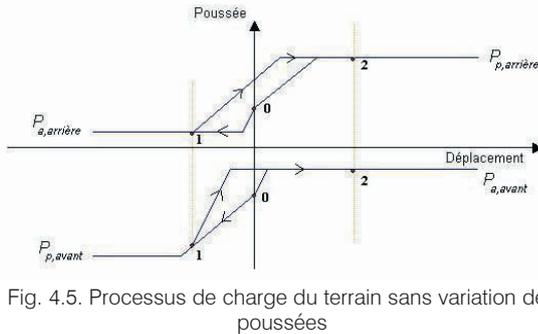


Fig. 4.5. Processus de charge du terrain sans variation des poussées

Pour les situations dans lesquelles se produit en plus une variation des poussées, due à des changements au niveau phréatique ou dans les charges agissant sur le terrain, excavations, etc., le comportement est analogue à celui décrit précédemment (voir figure suivante dans le cas d'un point avec terrain d'un seul côté).

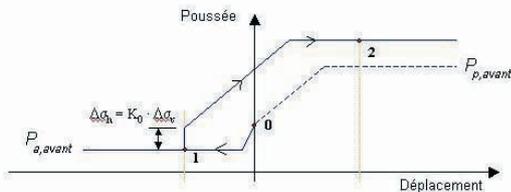


Fig. 4.6. Processus de charge du terrain avec variation des poussées

#### 4.1.2. Éléments d'appui: ancrages, butons, planchers

De manière générale, les éléments d'appui génèrent une coaction élastique au noeud se trouvant à la côte à laquelle ils ont été définis, l'action sur ce noeud étant égale à:

$$F = K \cdot (\delta - \delta_0)$$

où  $K$  est la raideur de l'élément,  $\delta$  le déplacement du noeud dans la phase correspondante et  $\delta_0$  le déplacement du noeud au moment de la mise en place de l'élément (déplacement de référence).

Dans le cas des ancrages actifs, s'ajoute en plus une charge équivalente à celle de la tension. Pour les éléments qui ne sont pas continus longitudinalement (ancrages et butons), les forces et raideurs équivalentes par unité de longueur sont utilisées pour le calcul.



Fig. 4.7. Considération d'un élément d'appui

- **Ancrages actifs:** Dans la phase de tension, l'ancrage engendre uniquement une force équivalente à la charge de tension, afin de prendre en compte le processus de re-tension qui s'utilise habituellement. Dans les autres phases, est considérée, en plus de cette force, une coaction élastique horizontale correspondant à la raideur de l'ancrage.
- **Ancrages passifs:** ils engendrent une coaction élastique. Dans ce cas, comme dans celui des ancrages actifs, il est nécessaire de prendre en compte que, si des déplacements amenant à la détention de l'ancrage se produisent, celui-ci ne travaille plus et, par conséquence, n'engendre plus aucun type de coaction.

- **Planchers et butons:** ils engendrent une coaction élastique à la cote correspondante. Dans le calcul, il est nécessaire de savoir si le type d'union prévu entre l'écran et l'élément correspondant permet aux actions d'être transmises. Dans le cas où il ne le permet pas, s'il se produit des déplacements inférieurs à la référence, l'élément considéré n'engendre aucune coaction.

En plus de ce qui a été vu, les planchers et butons peuvent engendrer des actions additionnelles respectivement dues aux effets de la rétraction et des variations thermiques, qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte.

## 4.2. Obtention de la solution

Comme il a été commenté précédemment, du fait de la non linéarité du comportement du terrain, l'obtention de la solution n'est pas directe et implique l'application d'un processus itératif. Chacune des solutions du processus itératif s'obtient par la résolution frontale de la matrice de rigidité de la structure, en établissant la compatibilité des déformations à tous les noeuds.

Comme point de départ du processus itératif, il est supposé qu'aucun déplacement de l'écran n'a lieu. Par conséquent, l'action du terrain sera initialement représentée en chaque noeud de la discrétisation par une force équivalente à la poussée au repos et par un ressort dont la constante sera équivalente au module de ballast du terrain. La solution des déplacements obtenue pour cette première hypothèse est utilisée pour recalculer les forces et coactions de chaque noeud au commencement de l'itération suivante et ainsi de suite pour obtenir une nouvelle solution. La solution définitive est obtenue lorsque d'après le calcul des déplacements solution d'une itération, chaque point de l'écran se trouve dans la zone du graphique de comportement qui a été supposée.

Supposons que, comme le montre la figure suivante, la solution des déplacements pour l'itération  $i$  appartienne à la zone constante de poussée active du diagramme de comportement du terrain. Si, dans l'itération suivante, itération  $j = i + 1$ , la solution des déplacements appartient à une zone non constante, la force équivalente à la poussée active doit être remplacée en ce noeud par un ressort de constante égale au module de ballast plus une force correspondant à la poussée au repos.

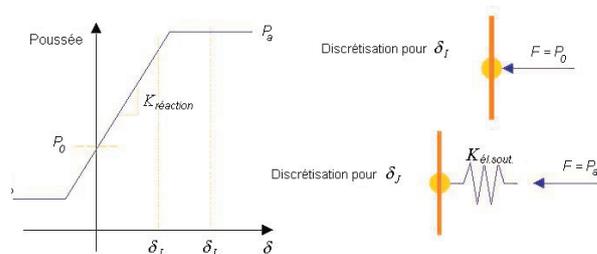


Fig. 4.8. Modification de la discrétisation d'un tronçon d'écran

S'il existe deux solutions consécutives du processus itératif, c'est la dernière qui est considérée comme définitive lorsque la différence de déplacement entre les deux ne dépasse pas  $10^{-6}$  m.

## 5. Exemple

A titre d'exemple, nous allons calculer un écran exécutable en cinq phases. Dans la première phase, on réalise une excavation de deux mètres et on met en place un ancrage passif non permanent qui sera retiré ultérieurement dans la phase de service. Dans la deuxième phase, on réalise une seconde excavation jusqu'à la cote quatre mètres et on met en place un buton qui sera retiré avant de construire le second plancher. Dans les deux phases suivantes, les deux planchers sont construits et dans la dernière, la structure entre en service.

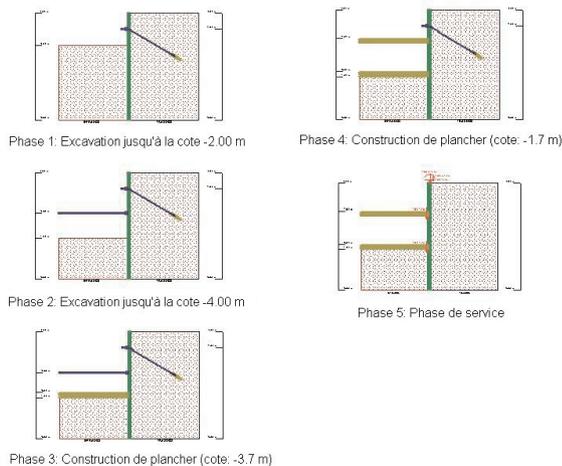


Fig. 5.1 Phases de l'ouvrage

La figure suivante montre le graphique correspondant à la solution des déplacements obtenue pour la phase de service.

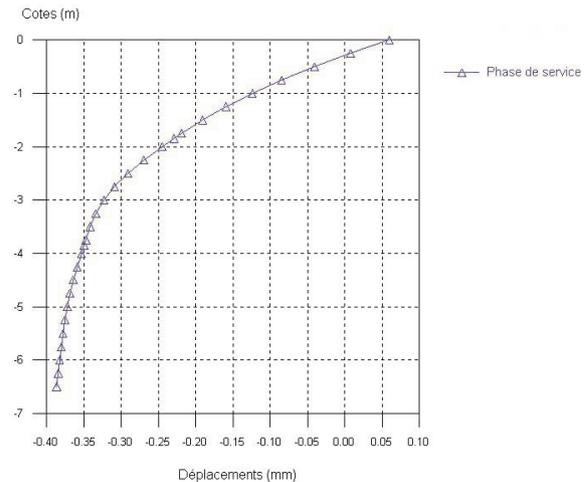


Fig. 5.2. Solution des déplacements en phase de service

De plus, pour chaque point, on considère un diagramme de comportement du terrain en fonction des caractéristiques de celui-ci. La figure suivante montre, pour la phase de service, le diagramme considéré à la cote  $-4.5$  m. Le déplacement correspondant à cette cote dans la phase en question est indiqué par un X, et on peut observer qu'il coïncide avec le graphique des déplacements.

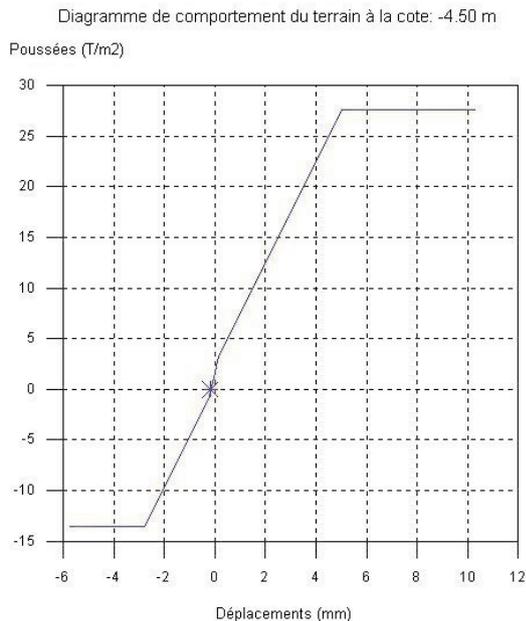


Fig. 5.3. Diagramme de comportement du terrain pour point à -4.5

La figure suivante montre un schéma correspondant au modèle de calcul pour la phase 2. Sur les zones supérieures et inférieures de l'écran, on observe que les déplacements ne sont pas suffisamment grands pour développer les poussées limites, cependant, il existe en chaque point, une coaction élastique et une force à la poussée de déformation nulle. Dans la zone centrale, au contraire, des déplacements, tels que la poussée active soit mobilisée, se produisent, et par conséquent une seule force agit en chaque noeud. De plus, aux cotes 1 et 2.5, les actions introduites par l'ancrage actif et le bouton sont visibles.

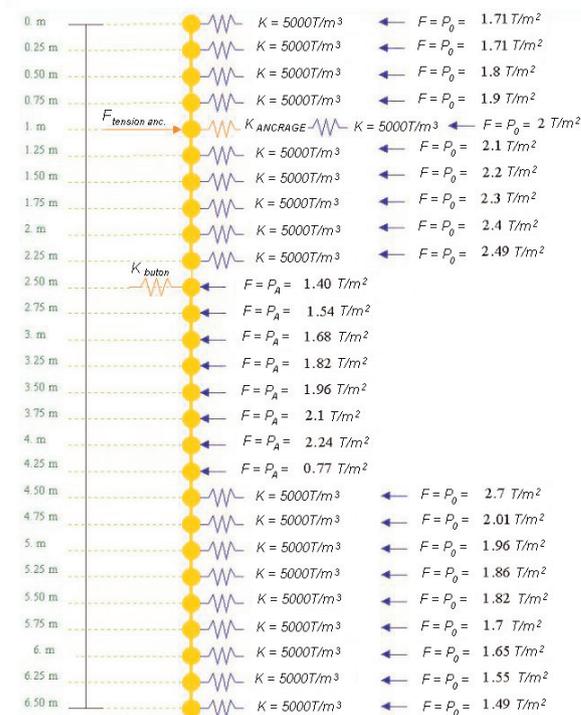


Fig. 10.- Schéma d'écran de soutènement avec charges équivalentes

## Conclusion

Le programme d'écrans de soutènement de CYPE Ingenieros offre à l'utilisateur un puissant outil d'analyse structural des éléments flexibles soumis aux poussées du terrain, où la praticité, la facilité et le contrôle d'un grand nombre de paramètres lui permettent de réaliser un projet complet et contrôlé, dans lequel la documentation (textes et plans) définit grandement le concept et le comportement de l'écran réalisé.

### Bibliographie

- "ROM 0.5-94. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias". Ministère des travaux publics, des transports et du milieu ambiant.
- "Sobre la influencia de las deformaciones en el comportamiento de pantallas continuas de hormigón". Thèse doctorale d'Enrique Castillo Ron. Escuela superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Madrid.
- "Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction". Jean Balay. Laboratoire central des ponts et chaussées.
- "Geotécnia y Cimientos". J.A. Jiménez Salas.
- "Muros Pantalla". G. Schneebeil.
- "Manual de Cálculo de Tablestacas". Ministère des Travaux Publics et des Transports.

