

## DISCOURS GEOTECHNIQUE DANS BELIDOR, 1729

### BELIDOR'S 1729 GEOTECHNICAL DISCOURSE

Jean-David VERNHES<sup>1</sup>, Bassam BARAKAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UniLaSalle, Beauvais, France

**RÉSUMÉ** – *La Science des Ingénieurs*, ouvrage de B. F. de Bélidor publié en 1729 et consacré au génie militaire, se présente aujourd'hui comme un miroir des connaissances de l'époque en matière de construction, notamment dans son interaction avec roches et sols. Le discours géotechnique de l'auteur, parfois insolite, montre tout à la fois la continuité entre ce temps et le nôtre et les tensions naissantes entre rationalisation et expérience.

**ABSTRACT** – *La Science des Ingénieurs*, (The Knowledge of Engineers) was brought out in 1729 by the military academy professor Bélidor. It appears to us today as a mirror of what engineers knew about the construction industry, in particular when it dealt with rocks and soils. The author's geotechnical discourse, occasionally surprising, shows both similarities with our times' concepts and emerging tensions between rationalisation and experience.

#### 1. Introduction

En 1729, Bernard Forest de Bélidor (v. 1698 - 1761) publia son premier traité intitulé *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile* (la *Science des Ingénieurs* dans la suite de l'article). Le livre eut pour objet de former de jeunes ingénieurs à la construction militaire (Fig. 1) et par extension civile. Alors professeur à l'école d'artillerie de la Fère, Bélidor s'était distingué dès 1725 par la diffusion d'un *Nouveau cours de mathématique*. Ce manuel, outre la notoriété internationale qu'il lui donna, le fit tôt considérer comme professeur général de ces nouvelles écoles militaires françaises où l'on enseignait le Génie (Grandjean de Fouchy, 1761).

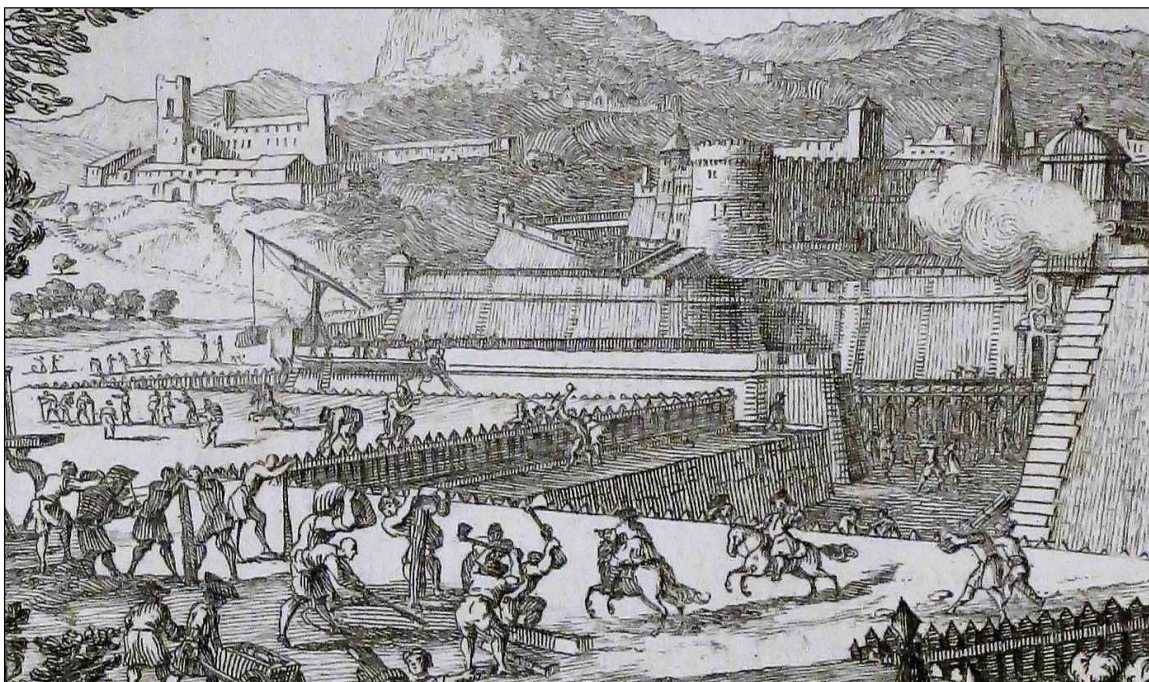


Figure 1. Frontispice originel de la *Science des Ingénieurs*, détail. Gravure de Rigault. Scène imaginaire montrant entre autres des travaux de terrassement.

Dans la *Science des Ingénieurs*, Bélidor mit par écrit un enseignement de l'ingénierie principalement destiné à un jeune public sans expérience de la construction, mais plus largement à l'ensemble des Maîtrises d'Ouvrage de son temps dans leurs rapports directs avec les Entreprises. Il s'emploie de ce fait à conduire un exposé systématique dont la visée générale est en fin de compte contractuelle.

Nous estimons avoir mis en évidence dans la *Science des Ingénieurs* l'avancée historique que constitue au Livre 1 la théorie du dimensionnement des murs de soutènement (Vernhes et Barakat, 2016), analyse que nous avons prolongée par une présentation de la façon dont l'auteur appréhende la masse volumique comme paramètre (ibid., 2020). Cependant, l'ouvrage de Bélidor comporte un ensemble discursif très dense d'autres éléments « géotechniques », relativement disséminés. Nous nous efforçons dans la suite d'en restituer les plus instructifs ou insolites au regard contemporain.

## 2. Propos liminaires sur la *Science des Ingénieurs*

### 2.1. Composition du traité

En six livres, le corps du traité totalise 504 pages pour un total de 56 chapitres numérotés, auxquelles viennent s'ajouter 53 planches hors-texte. Il n'y a pas à y chercher de pagination globale, elle n'est donnée que par livre. C'est pourquoi, dans l'article, nos références au texte renvoient aux numéros de livre puis au numéro de page dans chaque livre.

| Plan interprété de <i>La Science des Ingénieurs</i> (1729) |                                                                                                                                                                                                                                          |                                         |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TABLE DES MATIERES et APPROBATION DU ROI                   |                                                                                                                                                                                                                                          |                                         |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| LIVRE 6                                                    | Qui comprend la manière de faire les devis pour la construction des fortifications et celle des bâtiments civils                                                                                                                         | Etablissement de devis                  |   |   | Devis de la grande citerne de Calais<br>Devis communiqués par des contemporains de Bélidor<br>De la forme des adjudications (...)<br>Conditions élémentaires du devis d'un bâtiment civil<br>Modèle de devis d'une place-forte : Neuf-Brisac (Vauban)                                                                                                                                      |
| LIVRE 5                                                    | Où l'on enseigne tout ce qui peut appartenir à la décoration des édifices                                                                                                                                                                | Décoration des édifices                 |   |   | CH12. De la distribution et de la décoration des édifices (...)<br>CH8 à 11. Divers sujets : colonnes, persiques, frontons...<br>CH2 à 7. Les cinq ordres, détail des cinq ordres<br>CH1. Propriétés des moulures et ornements<br>Introduction                                                                                                                                             |
| LIVRE 4                                                    | Qui traite de la construction des édifices militaires et civils                                                                                                                                                                          | ≈ Superstructures                       |   |   | CH14. Détails nécessaires à la construction (dont pavements)<br>CH13. Règles générales dans la construction des bâtiments<br>CH12. De la construction des puits et citernes<br>CH11. Divers appendices d'ouvrages dont la glacière<br>CH1 à 10. Le bois, le fer, ponts et portes, divers bâtiments                                                                                         |
| LIVRE 3                                                    | Qui comprend la connaissance des matériaux, leur propriété, leur détail, et la manière de les mettre en œuvre                                                                                                                            | ≈ Infrastructures                       |   |   | CH11&12. Souterrains. Terrasses. Règlement de Vauban<br>CH10. Emploi matériaux en maçonnerie, tableau pour soutènement.<br>CH9. Fondations<br>CH8. Du transport et remuement des terres<br>CH7. Instructions pour la conduite des travaux<br>CH6. Détails pour la maçonnerie, table de densités<br>CH2&3&4&5. Brique. Chaux. Sable, pouzzolane et plâtre. Mortier<br>CH1. Types de pierres |
| LIVRE 2                                                    | Qui traite de la mécanique des voûtes, pour montrer comment s'en fait la poussée, et la manière de déterminer l'épaisseur de leurs piédroits                                                                                             | Dimensionnement des voûtes              |   |   | CH4. Règles simplifiées pour « ceux qui ne savent pas l'Algèbre »<br>CH3. Piédroits pour d'autres voûtes et tableau de résultats<br>CH2. Epaisseur des piédroits pour une voûte en plain ceintre<br>CH1. Etude de la poussée des voûtes                                                                                                                                                    |
| LIVRE 1                                                    | Où l'on enseigne la manière de se servir des principes de la mécanique pour donner les dimensions qui conviennent aux revêtements des ouvrages de fortification, pour être en équilibre avec la poussée des terres qu'ils ont à soutenir | Dimensionnement des murs de soutènement |   |   | CH5. Cas des murs à contreforts & Comparaison avec Vauban<br>CH4. Calcul de la poussée des terres & Tableau de résultats<br>CH3. Epaisseur de murs à fruit pour une résultante de poussée<br>CH2. Epaisseur de murs droits pour une résultante de poussée<br>CH1. Centres de gravité<br>Introduction                                                                                       |
| EPITRE, PREFACE et APPROBATIONS                            |                                                                                                                                                                                                                                          |                                         |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Titre complet des livres                                   |                                                                                                                                                                                                                                          | Transcription simplifiée                | A | B | Chapitres ou parties : titres simplifiés (italiques : mot-à-mot)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Figure 2. Plan interprété de la *Science des Ingénieurs* par livre et chapitre, visualisés à proportion de leur nombre de pages. Colonne A : appréciation d'intérêt géotechnique, direct (gris foncé), indirect (gris clair). Colonne B : découpage des livres en chapitres ou parties.

La figure 2 offre une vue synthétique du traité. Elle met en évidence que les Livres 3 mais également 4 ont été ici les plus utilisés (Fig. 2, colonne A). Pour des raisons distinctes, nous avons volontairement laissé de côté les Livres 1 (déjà étudié en grande partie), 2 (pouvant

servir à justifier des ouvrages souterrains voûtés) et 6 (application de principes énoncés dans les livres précédents). Pour une étude plus exhaustive, ils mériteraient d'être incorporés à l'inventaire.

## 2.2. Base des connaissances de Bélidor

Bélidor utilise un ensemble diversifié de sources d'information au premier rang desquelles figurent ses propres lectures : des Anciens, tels les architectes Vitruve (Livre 3, p. 62) pour l'Antiquité, Philibert de Lorme ou Palladio pour la Renaissance (L. 3, p. 65), l'ingénieur et Maréchal de Vauban dans l'époque qui le précède, le plus abondamment cité (L. 3, p. 36, etc.), et ses propres contemporains tel Gauthier (L. 2, p. 50), à titre d'exemples.

D'autres pourvoyeurs d'informations sont dans son propre entourage, les Ingénieurs en Chef avec lesquels il entretient des relations directes (L. 3, p. 50 ; L. 6, p. 50), des artisans qu'il connaît (L. 3, p. 22) ou *Ouvriers du Pays* dont il recommande le savoir (L.3, p. 49), sans doute aussi avec des membres de l'Académie Royale des Sciences (peut-être les « *Phisiciens* et *Chimistes* » qu'il cite collectivement : L. 3, p. 19).

Bélidor fonde enfin une part de son enseignement sur ses recherches ou raisonnements personnels (L. 3, p. 62 ; L. 4, p. 95). Des analyses mécaniques novatrices fondées sur l'emploi de l'algèbre sont sa source de premier ordre dans les Livres 1 et 2 mais quasiment plus par la suite. Dans les deux premiers livres, il célèbre l'émancipation du joug de la seule expérience qu'offrent les mathématiques (L. 1, Introduction) pour admettre plus tard la prépondérance de l'expérience sur le calcul (L. 3, p. 50 ; L. 4, Introd.) ou encore que l'art de bâtir est principalement un « *enchaînement de détails* » (L. 3, p. 1).

## 2.3. Recherche d'informations dans le traité et regroupements thématiques

Les Livres 3 et 4 étudiés ont une organisation en chapitres assez structurée, mais qui ne font pas preuve d'une telle qualité à l'intérieur de chaque chapitre, dont les titres ne reflètent pas nécessairement l'ensemble des contenus. Cela vient par exemple d'associations d'idées ou de certaines digressions. Elles peuvent être d'une grande valeur mais réduisent l'efficacité de la table des matières pour toute recherche thématique.

Considérant la variété des sujets d'intérêt géotechnique abordés par Bélidor dans la *Science des Ingénieurs*, nous avons choisi d'en retenir quelques-uns en les regroupant en trois grands thèmes classiques, ici exprimés en langage actuel : matériaux géologiques, terrassement, fondations. Nous en avons écarté d'autres tels que l'hydraulique, les reconnaissances de terrain, les ouvrages souterrains ou les marchés de travaux pour ne pas trop amoindrir la place donnée aux premiers.

# 3. Matériaux géologiques (Livre 3)

## 3.1. Catégories

La classification en catégories des matériaux géologiques qu'utilisent ou auxquels sont confrontés les ingénieurs des années 1720 dépend de leur usage. Pour mieux les comparer entre eux et voyant qu'ils s'y prêtent convenablement, nous organisons l'ensemble des termes utilisés par Bélidor en regroupements habituels en géotechnique : roches, sols grossiers, sols fins (Tab. 1).

Le Livre 3 offre encore d'autres termes désignant des matériaux géologiques. L'auteur les cite de façon consciencieuse sans forcément les situer dans un ensemble plus général, quitte à rendre l'apparence de son enseignement moins systématique. Nous en rapportons une série supplémentaire, évoquée p. 43 du Livre 3 à propos de « *certaines Pays* » où l'on « *distingue ordinairement pour le marché des Ouvrages trois sortes de terres pour en régler le prix, la terre douce ou épierrée pour les parapets, la roccaille & le roc.* » La définition de chacun des trois matériaux se réfère aux outils nécessaires pour les enlever :

respectivement, le *louchet* (sorte de bêche), la *pioche* et le *pic*, puis le *pic*, le *coin*, la *masse* et l'*aiguille* (barre à mine, pour des tirs de mine mentionnés p. 44). On remarque d'une part que cette catégorisation en trois ensembles peut rappeler dans le langage actuel celui des sols, SIRT (Sols Indurés et Roches Tendres) et roches, exprimant l'absence de frontière nette entre les polarités sols et roches. D'autre part, on note que de telles définitions du XVIII<sup>e</sup> siècle, basées sur l'expérience pratique, ne sont pas inexistantes aujourd'hui. Un exemple est la définition d'un sol diffusée par la norme XP P 94-010 (AFNOR, 1996), agglomérat dont les particules solides peuvent être séparées « *par trituration sous l'eau* », définition qui ne passe par aucun scalaire.

Tableau 1. Synthétique des termes de classification lithologique utilisés par Bélidor, 1729

| CONTEXTE                                                       | ROCHES                                                                                       | SOLS FINS                                                           | SOLS GROSSIERS                                                                       |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| RESSOURCES naturelles pour la construction (Livre 3, p. 4-12)  | <i>Pierre de taille, moilon, Meulière, libage<br/>Grès dur ou tendre<br/>Pierre à Plâtre</i> | <i>Terre grasse et forte<br/>Vaze (inconvenient)</i>                | <i>Gravier<br/>Sables de Cave<br/>Sable de Rivière<br/>Sablon, év. dit bouillant</i> |
| Terrains A FOUILLER ou EXCAVER et transporter (Livre 3, p. 25) | <i>Ardoise<br/>Pierre de Saint Leu, de Liais, bleu de Tours<br/>Marbres</i>                  | <i>Argile<br/>Terre grasse<br/>Terre extraordinaire</i>             | <i>Sable de Terre<br/>Sable fort<br/>Sable de Rivière</i>                            |
| Terrains DE FONDATION (Livre 3, p. 47-48)                      | <i>Tuf &amp; roc</i>                                                                         | <i>Terre ordinaire<br/>Terre glaise<br/>Terre grasse<br/>Tourbe</i> | <i>Sable ferme &amp; dur<br/>Sable mouvant<br/>Sable bouillant (sablon)</i>          |

En fin de compte, les disparités constatées dans la terminologie relayée par Bélidor selon les contextes montrent que cette terminologie répond à des besoins opérationnels de l'ingénierie et non à une volonté de décrire le milieu naturel considéré en soi, ou ce qui revient au même, de manière universelle.

### 3.2. Propriétés attribuées aux sols et roches

#### 3.2.1. Nouvel éclairage sur les masses volumiques

L'état de fait qui vient d'être mis en évidence éclaire un point de notre analyse précédente (2020) sur les masses volumiques. Les valeurs qui en sont données dans le tableau du Livre 3 p. 25 sont destinées à fixer des marchés de *remuement* et transport de terres du point de vue de l'ingénieur comme donneur d'ordre vis-à-vis de l'entrepreneur. La logique est donc de ne pas les surestimer. Le tableau n'avait aucunement pour vocation d'être repris dans un calcul de poussée des terres où s'applique le principe de prudence conduisant à apprécier les valeurs cette fois par excès, puisque c'est l'ingénieur qui, pour les fortifications, assure la conception des ouvrages. Le rapport forfaitaire de densité remblais/maçonnerie fixé par Bélidor à 2/3 dans le Livre 1 avait d'autant moins de raison d'être relié au tableau pourtant très complet du Livre 3.

#### 3.2.2. Roches : porosité, effets du gel et de la lune

L'auteur, en citant les matériaux naturels qui le concernent, en décrit d'autres propriétés physiques générales, surtout pour les roches. En voici des exemples.

« *Dans l'assemblage des parties qui composent la Pierre, il y a des pores imperceptibles remplis d'eau & d'humidité* » (sic., Livre 3, p. 2). La porosité est une caractéristique physique des roches alors bien connue et reliée principalement à leur comportement vis-à-vis du mortier. La porosité n'est par ailleurs pas explicitement décrite pour les sols bien qu'elle soit manifestée plus loin dans leurs propriétés hydrauliques. Les notions de teneur en eau ou de degré de saturation en eau des pores ne sont pas non plus conceptualisées.

La présence d'eau dans les pores « (...) venant à s'enfler dans le tems des gelées, fait effort (...) pour occuper un plus grand espace (...) & la Pierre ne pouvant résister à cet effort, se fend & tombe en destruction... » (p. 2). Après avoir décrit le phénomène de gélivité, le professeur indique ensuite que plus la pierre comprend d'argile, qui doit la rendre plus humide, plus elle est sujette à la gelée. Avec le recul, on sait que les roches argileuses sont en effet plus sensibles au gel. C'est cependant la microporosité qui est la propriété commune aux roches gélives, parmi lesquelles ont compte par exemple la diatomite et la craie pure. Le constat était donc juste mais l'explication incomplète.

Ce n'est pas seulement la gelée qui détruit la Pierre, on croit que la Lune l'altère, ce qui peut arriver pour les Pierres d'une certaine espee, dont les rayons de la Lune peuvent dissoudre les parties les moins compactes : en ce cas on pourroit croire que ces rayons sont humides & que venant à s'introduire dans les pores de la Pierre, ils font cause de la séparation de ces parties, qui tombant insensiblement en parcelles, la fait paroître moulignée ; il en sera au reste tout ce que l'on voudra ; mais ce qui me réjouit, c'est que si la Lune mange ou mouline les Pierres, la Terre qui doit être une bien plus grande Lune, a bien sa revanche, & les Pierres de la haut sans doute n'ont pas beau jeu.

Figure 3. Extrait continu des pages 2 et 3 du Livre 3 de la *Science des Ingénieurs* (Bélidor, 1729).

Le passage ci-dessus, enfin, montre comment Bélidor rapporte un autre phénomène d'altération des pierres lié à leur porosité. On y voit la subtile distance qu'il prend avec une hypothèse scientifique héritée des siècles et le trait malicieux avec lequel il conclut. On retrouve néanmoins cette mention de la lune dans un des devis qu'il donne au Livre 6.

#### 4. Terrassement (Livres 3 et 4)

Le *remuement* des terres pour les ouvrages de fortification relève dans la *Science des Ingénieurs* de divers objectifs. Le principal est le reprofilage des terrains par déblaiement et mise en dépôt puis remblaiement et mise en œuvre, incorporant souvent l'emploi des structures maçonnées que sont les *revêtements* (murs de soutènement, traités au Livre 1), ou laissant place à des talus. Nulle part est-il question de calculs : tout n'est que dispositions forfaitaires.

Dans les paragraphes suivants, nous illustrons quelques aspects spécifiques au problème des tassements de remblais et au choix de pentes de stabilité.

##### 4.1. Mise en œuvre de remblais et tassements

Pour l'auteur, les marchés sont réglés tels que « une toise courante de la vidange (...) fournira des terres pour une toise courante de rempart » (Livre 3, p. 46) – le rempart étant le terre-plein en remblais soutenu par un mur de soutènement (Fig. 4). Bélidor signifie sans doute par là que le contrôle des volumes après excavation n'a pas à tenir compte du phénomène de foisonnement des déblais.

A la mise en œuvre des déblais, la méthode de compaction à la dame par lits de 25 cm environ doit satisfaire le critère d'une réduction de 25 % de la hauteur initiale d'un lit (de 8 à 6 pouces, p. 84). Mais plus loin, il préconise que soit donné aux remparts « un peu plus d'élévation (...) pour prévenir les réductions que causent les affaissements », tassements consommés après « trois ou quatre ans » (p. 88). Ces affaissements, retour d'expérience de l'époque, notablement de long terme dans les standards actuels, viennent de la difficulté générale de recompresser les sols à leur densité initiale. L'amplitude des tassements selon la hauteur du remblai et donc la compensation à apporter n'est pas indiquée par Bélidor.



Vauban (1705) avait estimé pour une *levée de terre* que les tassements totaux à prévoir pour son réglage altimétrique seraient de l'ordre de 15 à 20 % de la hauteur de l'ouvrage fini, valeurs sûrement supérieures à celle pour un coin de terre en arrière d'un mur de soutènement, toutes choses étant égales par ailleurs.

#### 4.2. Stabilité des pentes

Le tableau 2 offre une vue générale sinon exhaustive de la question des pentes de talus dans la *Science des Ingénieurs*. Le pivot des valeurs relevées est la pente de 45°. C'est non seulement parce qu'elle apparaît dans le tableau comme une médiane, mais surtout parce qu'elle correspond à la pente expérimentale de talus naturel pour des terres quelconques, d'après une expérience que Bélidor rapporte au Livre 1. C'est elle qui a guidé ses raisonnements sur la poussée qu'un remblai exerce sur un mur de soutènement.

Tableau 2. Diverses pentes de talus mentionnées par Bélidor, 1729 (Livres 3 et 4)

| Talus : situations | Bord de plateforme subaquatique en pierres perdues (Fig. 4) | Terre-plein d'un rempart en remblai | Calcul poussée<br>- Contrescarpe en déblai<br>- Glacière en déblai | Extérieur de parapet en remblai renforcé (hauteur plurimétrique) | Intérieur de parapet en remblai renforcé (hauteur métrique) |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Pentes H/V ; deg.  | 2/1 ; ~27°                                                  | 3/2 ; ~34°                          | 1/1 ; 45°                                                          | 2/3 ; ~56°                                                       | 1/3 ; ~72°                                                  |
| Réf.               | Livre 3, p. 61                                              | Livre 3, p. 87                      | Livre 1<br>Livre 3, p. 87<br>Livre 4, p. 80                        | Livre 3, p. 86                                                   | Livre 3, p. 86                                              |

On remarque qu'une certaine logique gouverne la répartition des pentes préconisées en fonction des objectifs, mais pas ou presque pas en fonction des sols. Nous précisons que les remblais renforcés sont armés de fascines (racines ou branchages, Fig. 4 à droite). Son commentaire sur le cas de la glacière, fosse abritée en forme d'entonnoir où l'on conserve de la glace à la saison chaude, est particulièrement intéressant à étudier.

*« (...) si l'on rencontroit pour faire cette fosse une terre glaise qui n'eût point été remuée, on pourroit se dispenser de la revêtir de Maçonnerie ; mais quand cela ne se trouve point, on y fait un revêtement de Briques de deux pieds d'épaisseur [≈ 60 cm] ou davantage selon qu'on aura lieu de craindre la poussée des terres qui n'a guère lieu dans cette occasion, parce que donnant pour profondeur à peu-près le rayon du grand cercle, les terres se trouvent avoir leur pente naturelle, & par conséquent se soutiendront sous l'angle de 45 degrés. »*

La *Science des Ingénieurs* (Bélidor, 1729), Livre 4 (chapitre 11), p. 80, extrait.

L'auteur conçoit un raisonnement ne permettant pas de tirer de conclusion franche sur ce qu'il y a à faire. Il semble vouloir limiter la dispense de soutènement au cas d'une pente à 45° dans de la *terre glaise* en déblai, un sol par ailleurs plutôt bon en fondation (Livre 3, p. 48), alors que cette pente est censée être inconditionnellement stable. Comme la hauteur de fouille de sa glacière est de trois ou quatre mètres, on s'aperçoit qu'il suffirait d'un peu de frottement et d'une cohésion de quelques dizaines de kilopascals à cette argile afin que la situation ne se dégrade pas, situation statistiquement réaliste. Son hypothèse de pente stable reste donc sauve en apparence. Nous avons tout de même constaté que l'auteur évite de se lancer dans un commentaire mécanique général des autres pentes qui apparaissent dans le tableau et qui relèvent de la pratique d'alors.

#### 5. Fondations

*« J'ai toujours regardé ce Chapitre comme le plus difficile de ceux que j'avois à traiter... »* (Livre 3, p. 50). Ce passage de la *Science des Ingénieurs* est une digression qui apparaît

au bout de quelques pages dans le chapitre intitulé « *De la manière de faire les Fondemens des Edifices dans toute sorte d'endroits & principalement dans le mauvais terrain.* » Avec 20 pages, c'est l'un des plus longs du traité. En s'attachant à « *donner dans ce Chapitre, une idée generale* » de la question (p. 62), il constate : « *Si l'on vouloit rapporter toutes les différentes manieres de fonder selon les occasions qui se peuvent presenter, je ne finirois jamais...* » (p. 63). Victime d'un effet catalogue, il peine donc à exprimer des principes généraux, plus encore à mettre en place une théorie comme au Livre 1. Nous donnons ici un très bref aperçu des méthodes constructives que transmet de Bélidor, puis une analyse de de son discours en matière de dimensionnement.

### 5.1. Aperçu des méthodes (Livre 3, p. 47-66) et incertitude

On trouve dans les méthodes enseignées par Bélidor pour fonder des structures-type en maçonnerie, dont la plus exigeante en termes de charges est le mur de soutènement de fortification, les grandes catégories de la géotechnique actuelle. Il s'agit ainsi de fondation superficielle, par tranchée ou au rocher après *écorchemens* (Fig. 4), semi-profonde par ce qui apparaît comme des puits court, profonde par *pilots* en bois (Fig. 4), subaquatique par *pierres perdues* (Fig. 4), améliorations de sols (par pieux dit *de remplage ou compression*), jusqu'au coffrage périphérique par *palplanches* en pratiquant des rainures dans les *pilots de bordage*.

Lorsqu'ils sont en usage, un grand soin est apporté à décrire les éléments élastiques (longrines et traversines en bois) formant réseau de diffusion des efforts en tête de fondation, et le soubassement, structure rigide assurant la transition mécanique entre le complexe sol support / fondation et la structure à fonder.

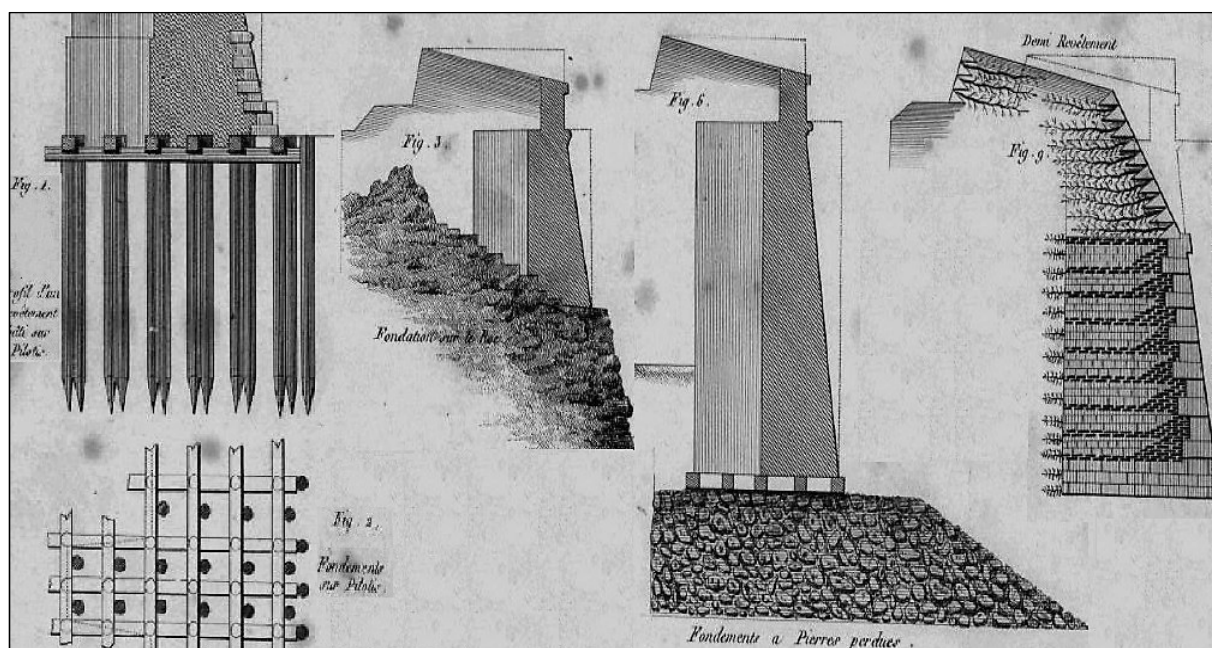


Figure 4. Extrait de la Planche n°8 de la *Science des Ingénieurs*, édition Navier 1830, modifiée. De gauche à droite, fondations *sur pilotis*, *sur le roc*, *à pierres perdues* ; *lits de fascines* (haut).

Relevons pour finir une différence entre travaux de terrassement et de fondation établie dans le « *Réglemens de Mr le Maréchal de Vauban, pour la conduite des Travaux* », que Bélidor reproduit à la lettre pour clore son Livre 3. En cas d'écart entre estimation des quantités dans le devis et constats en cours de chantier, « *on prendra toujours le moindre nombre pour le compte du Roy, ce qui se doit entendre pour le remuement des terres seulement, car pour la maçonnerie il pourra y avoir des changemens dans la fondation* » (p. 91), ce qui traduit deux degrés distincts dans l'appréciation des incertitudes liées au sol.

## 5.2. Le problème irrésolu du dimensionnement des fondations

La notion répétitive qu'enseigne Bélidor en matière de fondation est celle du « *bon fond* ». Il porte donc spontanément son attention sur ce qu'il convient de faire selon la profondeur, parfois non atteignable, de ce niveau de *bon fond*. C'est cette notion qualitative communément admise qui le malmène lorsqu'il essaye de répondre de manière théorique à la question quantitative des dimensions à donner aux fondations les plus courantes, superficielles, à savoir la largeur et la profondeur.

L'auteur disqualifie un discours de principe sur leur profondeur, « *parce qu'il est assés difficile de la déterminer, dependant en quelque sorte de la nature du terrain* » (L. 3, p. 63) et se montre assez critique avec un approfondissement injustifié qui « *ne fera rien pour la solidité des murs qu'on veut élever* », arguant entre autre que les fondations de « *l'Eglise de Notre-Dame de Paris, Vaisseau des plus considerables, quoi que bâti dans un fort mauvais terrain, n'ont presque pas de profondeur* » (p. 63-64).

La largeur d'une fondation concentre son attention. Le professeur estime qu'elle doit être proportionnée « *non seulement à l'épaisseur du mur, mais plus encore à sa hauteur* », préconisation selon lui non triviale car un mur peut être « *fort élevé & (...) d'une épaisseur médiocre* » (p. 65). Mais la règle qu'il introduit, pour rationaliser celle des Anciens, d'une largeur égale à celle du mur augmentée du 30<sup>ème</sup> de sa hauteur, est plus géométrique que mécanique : il ne parvient à expliciter ni les descentes de charge, ni la réaction du terrain.

## 6. Conclusions

Durant ses années de travail à rédiger la *Science des Ingénieurs* (1729), le professeur en école d'artillerie Bernard Forest de Bélidor, réalise quelles difficultés il doit affronter pour mettre à profit son esprit rationnel dans l'ingénierie de la construction, tout particulièrement en ce qu'elle a de « géotechnique ». Comme nous l'avons déjà avancé (2.2), il défend « *l'avantage des Mathématiques qui est de voir toujours clair à ce que l'on fait* » (L. 3, p. 79) mais, sans la renier, semble dépité de reconnaître que « *l'experience dans l'art de bâtir est la regle que l'on peut suivre avec plus d'assurance, principalement quand on n'a qu'à imiter les ouvrages qui ont déjà été exécutés avec succès* » (L. 4, p. 1). L'entrée en matière magistrale de son traité, avec une théorie aux origines du dimensionnement géotechnique, cède ailleurs la place à une approche plus traditionnelle du métier. Son discours offre au temps qui est le nôtre bien des trésors pour regarder avec lucidité notre propre pratique.

## 7. Références bibliographiques

- AFNOR (1996). Sols : reconnaissances et essais - Glossaire géotechnique - Définitions, notations, symboles. XP P 94-010. 24 p.
- Bélidor B. F. de (1725). Nouveau cours de mathématique à l'usage des ingénieurs et officiers d'artillerie. Ed. C. Jombert, Paris, 649 p. (Via Gallica, BNF)
- Bélidor B. F. de (1729). La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile. Ed. C. Jombert, Paris, 533 p. | Editions critiques de Navier (Via Gallica, BNF) : F. Didot, 1813, Paris, 593 p., F. Didot, 1830, Paris, 596 p.
- Grandjean de Fouchy J.-P. (1761). Eloge de M. de Bélidor. In : Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1761. Ed. J. Boudot, Paris, p. 167-181 (Via Gallica, BNF).
- Vauban S. L. de (1705). Traité de la fortification de campagne. In : Virol M. (dir.) 2007. Les Oisivetés de Monsieur de Vauban, Tome X (notice de Bragard Ph.), p. 1493-1626.
- Vernhes J.-D., Barakat B. (2016). Prémices du dimensionnement géotechnique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Nancy, 6-8 juillet 2016. Actes du colloque.
- Vernhes J.-D., Barakat B. (2020). Un problème de masse volumique dans Bélidor, 1729. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lyon, 30 juin-2 juillet 2020. Actes du colloque.