

Discussion finale

Président : M. BANAL

M. COUPRIE : Je m'excuse de prendre la parole mais je voudrais, premièrement, expliquer pourquoi on parle beaucoup des digues depuis 1978. Il y a eu Sines qui a cassé. 80 % des dolos ont cassé en quelques heures, puis Arzeux, Tripoli, Bengazi, Saint Cyprien... et je ne les connais pas toutes. J'ai eu la chance d'être auprès de l'entreprise italienne qui réalisait Sines; j'ai suivi d'assez près le dossier de la réparation du tiers de la digue qui fait 2 000 m; la réparation (provisoire puisque l'on n'a pas reconstruit la digue suffisamment solide pour qu'elle résiste aux conditions centenaires) a coûté 500 millions de francs 82. Il y a donc un problème sérieux.

D'autre part, je voudrais me faire un peu l'écho de ce qu'a dit M. Barailler qui a apporté un témoignage. Nous appartenons à peu près à la même génération, 1964, date du congrès de Stockholm dont M. Brosselard-Faidherbe vient de parler, où l'on faisait des essais pour savoir s'il fallait prendre en compte l'amplitude significative pour déterminer la stabilité.

Je voudrais, car je suis d'une génération qui va bientôt quitter la scène, vous dire un peu ce que je pense de ces problèmes.

Mon premier point sera pour souligner le danger des formules. Pour moi, une digue c'est un ouvrage beaucoup trop sérieux pour être condensé dans une seule formule et je ne suis pas d'accord du tout avec M. Brosselard-Faidherbe lorsqu'il dit que l'on est d'accord sur les formules. Je ne suis d'accord sur aucune formule. J'ai déjà dit publiquement que je me refusais à publier les formules que j'utilise, parce qu'on les utiliserait mal, même au niveau de l'avant-projet. Je suis constructeur, vous savez que je suis entrepreneur après avoir été dans l'administration et je sais très bien qu'il faut se décider, mais je pense que pour le faire correctement il faut avoir amassé en son esprit beaucoup de choses. Il faut savoir d'où viennent les données sur la houle. Il faut savoir les qualités de ces données et se renseigner, car lorsque l'on a une certaine expérience, on sait bien à peu près quelles sont les houles dans les ports voisins. Il y a un élément de référence.

Deuxièmement, dans la formule d'Hudson, ce qui me paraît important c'est la tendance. M. Barailler l'a dit. Prenons les dolos, feu les dolos ! par exemple pour une hauteur de lame donnée, 2 % de chute, vous faites un incrément de cette hauteur de lame et vous avez 5 % de chute, ce n'est pas beaucoup. Puis vous faites encore un incrément de 1 % de chute et la digue tout entière disparaît. En répétant l'essai avec la même hauteur, là où vous aviez 5 % de chute, à 4 % vous avez disparition de la houle. Suivant les types de blocs le pourcentage de dégat est très variable. Les dolos sont des blocs très sensibles à un dépassement. Les enrochements sont les blocs les moins sensibles à un dépassement de la houle du projet. Dans le choix du bloc que l'on fait, il faut tenir compte de la sensibilité de la formule aux différentes données.

Autre point : la prise en compte de la fragilité. Vous pourrez m'accuser d'avoir publié une formule car dans l'article sur la fragilité des blocs que j'ai écrit en 1982, je vous garantis qu'il n'y a personne qui a réussi à comprendre comment l'on utilisait la formule que j'ai publiée car mon article était entortillé pour que l'on ne puisse pas l'utiliser : il s'agissait en effet d'une recherche théorique pour montrer un cadre de pensée mais absolument pas fondée sur l'expérience qui serait nécessaire pour qu'elle soit utilisable.

Mon projet, en écrivant cet article, était de lancer en France, à la suite de ce que j'avais vécu à Sines, une étude sérieuse de la prise en compte de la fragilité.

Il y a deux problèmes de base. Un problème propre aux blocs que j'évoquais ce matin, le cumul des effets de choc et l'ordre de survenance de ces chocs. Cela c'est le problème de Palmgreen-Miner généralisé. Je n'en suis pas encore sorti, je dois vous le dire.

Il y a le problème du mouvement des blocs. On peut espérer y arriver. Vous avez vu les six composantes de l'effort qu'a décrites M. Brosselard-Faidherbe. Mais ce qu'il nous faut ce sont les effets d'entrechoquement des blocs, c'est-à-dire les six composantes des mouvements à chaque passage de lame. Cela, on peut espérer le faire sur modèle réduit. En revanche, l'analyse de la fragilité des blocs, cela ne supporte pas l'effet d'échelle. Ce matin, j'ai oublié

d'expliquer pourquoi en mécanique des sols, comme en béton, l'effet d'échelle, c'est une échelle 1 et pas une autre. La raison est qu'il faut que sur la maquette l'on ait les mêmes contraintes que sur le prototype. Car les lois de la mécanique des sols, effort-déformation, sont si complexes que suivant que vous vous placez à la base des courbes à faible ou à forte contrainte la loi est complètement modifiée, et donc si vous êtes en maquette, vous êtes constamment dans le bas des courbes, c'est-à-dire que vous êtes dans les zones où les matériaux sont presque infiniment résistants.

Je peux vous dire, sur le problème des mouvements, de par mes fonctions au sein du M.R.T., que j'ai eu l'occasion de financer une recherche en France, dans la bonne ville de Grenoble. Les idées émanent un peu de SOGREA et d'un grand laboratoire mais je suis tenu à la discrétion car des brevets ont été pris et l'on ne pourra publier les choses qu'à partir du 15 janvier. Cependant je peux vous dire que les laboratoires vont être dotés d'une méthode qui permettra de connaître les six mouvements des blocs et que j'espère bien qu'on l'appliquera. C'est une question de crédits. Les crédits de recherche sont difficiles à trouver, bien que les budgets de l'Etat aient été augmentés et que j'ai vocation à indiquer quels sont les bons et les mauvais projets.

Pour ce qui est de la fissuration des blocs, les meilleurs essais ont été faits à Sines par M. Gonzalvez Da Silva, ingénieur du GAS. Ces essais publiés en anglais montrent, je m'excuse de le dire à Grenoble, que l'exposé de M. Danel sur les lois de la similitude applicables aux tétrapodes, publié en 1962, n'est pas valable. M. Da Silva a rompu des blocs cubiques dont les poids s'échelonnent entre une et 90 tonnes; je vous passe sur ces essais mais, si vous voulez, M. Danel disait, avec la loi de similitude de la fragilité des blocs, que c'était comme la puce et l'éléphant, ils ont les mêmes muscles mais ils ne sautent pas à la même hauteur. Deux blocs de taille différente se cassent pour une même hauteur de chute; or cette loi est fautive. D'après les essais de M. Da Silva, plus les blocs sont gros, plus ils sont fragiles. Je souligne ce point. Autrement dit, dans l'appréciation du facteur de fragilité des blocs, le coefficient doit dépendre de la taille des blocs. Moi qui suis entrepreneur, je pense relever ce challenge, car lorsque l'on fait un bloc de béton, le champ thermique qui survient au moment du durcissement du béton crée des fissurations en surface. Vous savez que tous les problèmes de fissure sont des problèmes de propagation, même pour les trains d'atterrissage, les turbines d'avion. Dans les conditions normales de fonctionnement d'un corps solide, les fissures ne se propagent pas; quand elles se propagent, qu'elles traversent la pièce, celle-ci se rompt. Je pense que l'on peut lutter contre la fissuration d'origine des blocs par un traitement convenable thermique des blocs, au moment de leur coulage. Je pense que nous devrions arriver, nous entrepreneurs, à relever le challenge et à démontrer que la loi de M. Da Silva est fautive.

Pour vous dire l'importance de la casse, à Sines il y a eu 80 % de blocs cassés.

Il y a d'autres types de casse. La tempête de 1982 à Sète, évoquée par mon ami Barailler, a cassé 3 % des tétrapodes. Si c'est la tempête des 25 ans, au bout de 100 ans, il en restera suffisamment, l'administration peut dormir tranquille, mais enfin cela pose quelques problèmes.

Mon dernier point concernera le problème du coût des digues et de la taille des blocs. Je parle là en tant qu'entrepreneur. C'est un sujet qui vous paraît un peu tabou. Tout le monde dit : on va prendre une hauteur de lame trop forte et l'on va avoir des blocs énormes, on ne fera pas la digue car elle sera trop chère.

Moi je fais deux remarques sur ce sujet. Premièrement, la formule de Hudson me paraît mauvaise pour la raison très simple que l'esprit humain ne sait pas ce que c'est que le cube d'une grandeur. Personnellement, mes formules sont linéaires parce que dans le fond un cube on peut très bien le caractériser par son arête et, à ce moment là, l'arête du cube est proportionnelle à la hauteur de la lame. La carapace est alors conçue comme un papier buvard assez épais qui peut absorber une tache d'eau assez épaisse qui est la lame qui rentre dedans. Vous verrez qu'il faut que l'épaisseur

de la couche soit à peu près les 2/3 de la hauteur de la lame. Là cela vous parle en tant que physiciens et à ce moment là vous comprenez de quoi il s'agit.

Deuxièmement : le coût d'une carapace. Vous me direz qu'il faut monter plus haut, si la lame est plus forte elle descend plus bas. C'est exact. Il y a des ports où la marée vous oblige à monter et à descendre pour d'autres raisons que celle-là et, en fait, le coût d'une digue est plutôt proportionnel à la dimension des cubes, c'est-à-dire à l'épaisseur de la couche plutôt qu'à la surface à couvrir. La surface à couvrir varie peu avec la hauteur. Donc, si vous doublez le poids d'un bloc, c'est-à-dire si vous augmentez la dimension linéaire par $\sqrt{2}$ vous ne doublez pas l'épaisseur du béton.

Donc le volume de béton ne croît pas si vite que cela. Quant au prix de ce béton, il faut savoir que sur les grandes digues, on ne peut mettre en place, au nez de la digue, qu'une seule grande grue et finalement la cadence d'exécution dépend du nombre de blocs que l'on pose chaque jour par ce seul enjeu.

On peut dire que dans la classe des crues de grande puissance, ce nombre de blocs est à peu près indépendant de la taille des blocs. A Antifer, on est arrivé à poser 220 blocs de béton par jour, beau record ! C'est vous dire que le coût du béton est proportionnel. Une grue en bout de digue cela vaut tant par jour. Elle a posé tant de blocs. Vous faites l'addition et vous avez le prix. Tout dépend du coût d'amortissement de la grue et, à cet égard, en ce qui concerne le coût des grues, il y a deux prix ; ou bien vous avez une grue sur catalogue, actuellement la grue la plus grosse sur catalogue c'est la Manitowoc 4.600 qui transporte ses 65 tonnes à 40 mètres, c'est une grue sur chenille, l'ensemble fait 14 mètres de longueur sur 12 mètres de largeur. Je ne sais pas si vous voyez le monument.

Il y a des grues américaines de capacité équivalente mais en dehors de cela, il n'y a pas beaucoup d'autres marques. Cela donne un certain prix et les prix de vente de ces engins sont assez standard. On arrive à les revendre. Sur le chantier d'Antifer, je ne trahirai pas de secret en disant que l'on a revendu la grue américaine plus cher qu'on ne l'avait achetée. On l'avait achetée au temps où le dollar valait 4,13 F et on l'a revendue au moment où le dollar valait plus cher. Je vous dis tout cela pour que vous n'ayez pas peur des très gros blocs. S'il fallait refaire Sines d'une manière sérieuse, il faudrait des blocs de 150 tonnes. Là, il faudrait une grue spéciale c'est-à-dire construite spécialement pour le chantier qui serait plus difficile à revendre, cela coûterait plus cher, mais il n'y a pas beaucoup de sites dans le monde où il faut dépasser les 50-60 tonnes ; c'est devenu la taille courante. Sines est, de loin, la digue la plus exposée que je connaisse dans le monde. J'ai eu l'occasion de travailler sur la Côte Ouest du Pacifique, eh bien je peux vous dire qu'à latitude égale, les houles sont plus faibles que celle de Sines.

Je pense qu'il faut avoir le courage de voir les digues comme il faut les faire, c'est-à-dire avec la taille qui convient et ne pas se dire que des questions de prix rendent impossible de faire des blocs d'une certaine taille. Les très gros blocs se produisent bien. Il y a un problème de traitement thermique au moment du coulage du béton dont le coût est tout à fait marginal, cela représente 1 à 2 % du prix du coulage du béton.

M. Le Président BANAL : Merci beaucoup, Monsieur Couprié.

M. BELORGEY : Les formules exploitées pour le calcul des ouvrages sont très discutables, et l'utilisation (abusives) de coefficients masque en réalité notre ignorance vis-à-vis de certains phénomènes physiques.

Actuellement, dans l'étude des relations entre les caractéristiques de la houle et les efforts sur les ouvrages, la communauté scientifique se préoccupe surtout de définir avec précision le modèle mathématique de houle le plus adapté, et à « caler » les coefficients des formules en fonction de l'ordre du développement utilisé dans le modèle.

Il serait peut-être souhaitable d'aborder le problème sous un aspect plus physique pour connaître la cinématique des particules fluides au voisinage des ouvrages et la turbulence engendrée par la houle. C'est à dire connaître la dynamique d'impact de la houle sur les ouvrages.

M. le Président BANAL : Qui veut encore prendre la parole sur l'ensemble des communications de cet après-midi, voire même de ce matin ?

M. GAILLARD : Je voudrais apporter des précisions concernant la méthode de génération de la houle irrégulière utilisée au laboratoire de SOGREAH, qui a été décrite comme un procédé de filtrage de bruit blanc. Il s'agit en réalité d'un « pseudo » bruit blanc, généré par un algorithme numérique sous forme d'une séquence d'éléments binaires (0,1) transitant par une pile de 65 registres, avec une période de répétition ajustable dans une très large gamme.

Une conséquence importante de ceci est que l'on peut maîtriser les trains d'ondes reproduits en laboratoire et en particulier répéter des essais successifs avec des conditions de houle incidente identiques pour étudier des ouvrages maritimes différents.

Il n'y a donc pas fondamentalement d'antagonisme entre ce procédé et ceux décrits par les représentants des autres laboratoires à ce colloque, car il s'agit dans tous les cas de houles pseudo-aléatoires.

M. le Président BANAL : Autrement dit, votre houle aléatoire n'est pas aléatoire non plus.

M. GAILLARD : Si, elle est aléatoire...

M. le Président BANAL : Elle est déterministe.

M. GAILLARD : En fait, aucun laboratoire ne fait de la houle véritablement aléatoire mais pseudo aléatoire. Ce sont des houles qui ont une certaine périodicité de répétition. Par exemple, si l'on fait une composition de houle sinusoïdale, si les composants ont une fréquence de base, il s'agit en fait d'un phénomène périodique dans la période de la fréquence de base ; donc, si vous voulez, tous les systèmes de génération actuels ne sont pas réellement aléatoires mais pseudo aléatoires.

M. BIESEL : Toute réalisation d'un phénomène aléatoire est un phénomène déterministe.