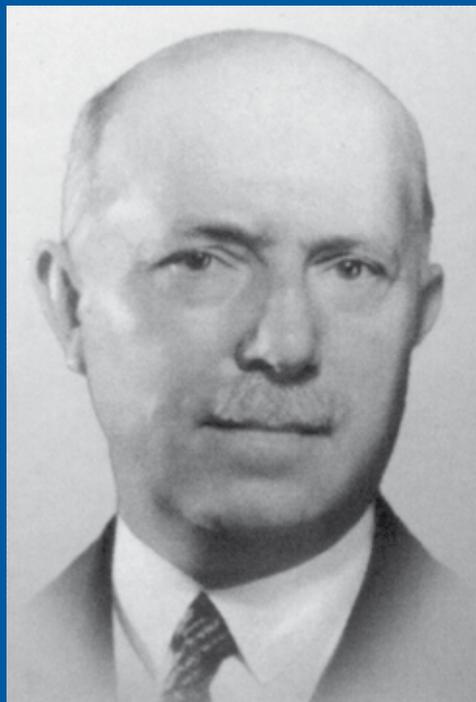




musée des arts et métiers

L E S C A R N E T S

ALBERT CAQUOT



Ne craignons pas les anticipations,
si nous ne voulons pas être dépassé
par les événements [...] Dans dix ans,
il sera peut-être trop tard pour agir.
J'aime mieux être en avance.

A. Caquot, *Journal L'Air*, 15 octobre 1931

1881 - 1976

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

L E S H O M M E S

Albert Caquot

■ Aéronautique : du globe des frères Montgolfier au ballon captif

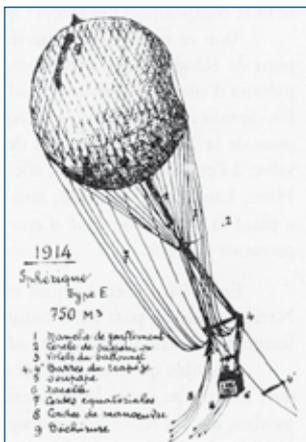


Expérience aérostatique des frères Montgolfier, faite à Versailles, le 19 mars 1783. Gravure du temps (R. Chambe, *Histoire de l'aviation*, p. 14).

Les vrais débuts des ballons eurent lieu en 1783 avec le ballon gonflé à air chaud des frères Montgolfier et celui rempli d'hydrogène du physicien Charles et des frères Robert. Le ballon sphérique était alors constitué d'une enveloppe en soie et d'une nacelle en osier. Fort de son succès, le ballon évolue et permet de réaliser des exploits (traversées d'océan, sauts en parachute...). Ses intérêts sont divers : domaine scientifique et militaire, attraction populaire.

Dès 1794, les militaires français utilisent des ballons captifs, c'est-à-dire retenus au sol par des câbles pour des missions fut abandonnée. Elle connaît toutefois un regain d'intérêt lors

du siège de Paris en 1870 ; les ballons servent alors à observer l'ennemi et à transporter les hommes et le courrier afin de communiquer avec l'extérieur de la capitale.



Ballon sphérique du colonel Renard, mis au point en 1880 (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 25)

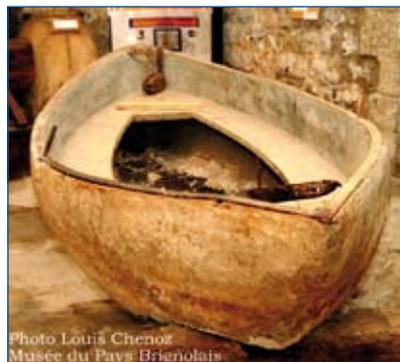
La volonté de se déplacer dans les airs amène des inventeurs à propulser les ballons et à créer le dirigeable. Ce dernier connaît ses heures de gloire à partir de 1900 avec le dirigeable du comte Von Zeppelin. Le ballon captif, quant à lui, a peu évolué depuis Charles et les frères Robert. Il n'est quasiment plus utilisé en 1914 ; l'armée n'en possède que quelques exemplaires dus au colonel Renard.

■ Génie civil : les premiers pas du béton armé et de la mécanique des sols

Béton armé

L'utilisation du béton comme matériau de construction est très ancienne. Constitué d'un mélange de ciment, de granulats et d'eau, ce matériau travaille en compression. C'est au XIX^e que l'on eut l'idée d'associer au béton des fers qui permirent au matériau dit béton armé de travailler en compression mais aussi en traction grâce à l'acier.

Le premier exemple d'utilisation du béton armé est attribué à Joseph Lambot qui, en 1848, fait flotter une barque en ciment armé d'un quadrillage de barres de fer. Au même moment, Joseph Monier construit avec ce même matériau des caisses à fleurs. Sous l'impulsion de ce dernier, mais aussi de François Coignet et Armand Considère, l'emploi du béton armé s'étend alors rapidement à d'autres utilisations.



En 1906, une circulaire ministérielle fixe les « instructions relatives à l'emploi du béton armé » et codifie ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Un des bateaux de Lambot, conservé au musée de Brignoles.

Mécanique des sols

Il est difficile de situer les débuts de cette science car dès que l'homme a souhaité réaliser une construction, il a dû s'intéresser au sol qui sert de point d'appui. On attribue classiquement les débuts de la mécanique des sols à Vauban (1633-1707) pour les principes de calcul et de construction des murs de soutènement des fortifications. C'est à Coulomb (1736-1806) que l'on doit les premières études scientifiques avec la formulation du critère de rupture des sols. Cette nouvelle science connaît un fort essor à partir du XIX^e, marquée par une compétition franco-anglaise, avec d'un côté une école française très mathématique, dont les acteurs principaux sont Poncelet et Resal et de l'autre une école anglaise plus pragmatique dont les acteurs principaux sont Mc Adam, Rankine et Bishop.

Albert Caquot

■ Sa jeunesse

Albert Irénée Caquot est né le 1er juillet 1881 à Vouziers (Ardennes). Il est le troisième enfant d'une famille d'agriculteurs. Il s'intéresse très tôt aux sciences mathématiques, physiques et chimiques. Il obtient son baccalauréat à 17 ans et intègre l'École Polytechnique un an après, en 1899. Son service militaire réalisé dans une compagnie de sapeurs aérostiers, il passe 3 ans à L'École Nationale des Ponts et Chaussées. En 1905, il devient ingénieur ordinaire du département de l'Aube. Cette même année, il épouse Jeanne Leconte, fille d'un avoué de Vouziers.

■ Un ingénieur polyvalent (1905-1940)

Dès ses premiers travaux, Albert Caquot se fait remarquer, tout d'abord pour ses choix techniques dans la réalisation d'un pont en béton armé, puis pour l'assainissement de la ville de Troyes, en faisant réaliser un drainage du sol et en créant des égouts entre 1907 et 1912. En 1912, il intègre le bureau d'étude parisien créé par Armand Considère – inventeur du béton fretté et membre de la commission qui a élaboré le premier règlement pour le béton armé en 1906.

Le 1^{er} Août 1914, Albert Caquot est mobilisé comme capitaine commandant la 21^e compagnie d'aérostiers. Très rapidement, il essaie de faire évoluer les ballons d'observation de l'armée française et met au point un ballon allongé : le ballon Caquot qui connaît un fort succès international au cours de la guerre. Il est successivement nommé directeur de l'atelier mécanique d'aérostation de Chalais-Meudon, puis directeur de la section technique de l'aéronautique militaire au début de l'année 1918. Sa mission consiste alors à sélectionner les modèles d'avions pour y apporter des améliorations techniques.

Dès la fin du conflit, il retrouve son poste au bureau d'études Pelnard-Considère-Caquot. Il réalise dans un premier temps de nombreuses études sur les matériaux de construction et leur comportement, ainsi qu'en mécanique des sols. A partir de 1922, il enseigne la résistance des matériaux et la physique à L'École des Mines et à l'École des Ponts et Chaussées. Il conçoit également de nombreux ouvrages comme des ponts, des barrages ou des sites portuaires.

Le 18 octobre 1928, le ministère de l'air qui vient d'être créé, le nomme directeur général technique et industriel, poste où il mène une politique de recherche et d'évolutions techniques jusqu'en 1934. A l'approche de la seconde guerre mondiale, en septembre 1938, il prend la présidence des sept sociétés nationales de construction d'avions. En quelques mois, il tente de rattraper le retard pris par l'aviation française. En désaccord avec la politique du gouvernement, il démissionne de son poste après l'armistice.



Albert Caquot montant à bord d'un prototype (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPC, p.100)

Albert Caquot

■ La consécration (1940-1976)

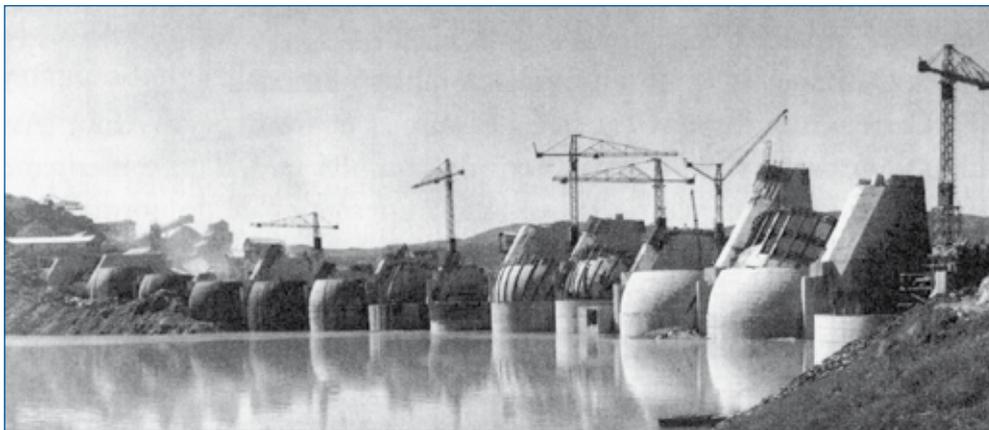
Albert Caquot s'éloigne de son bureau d'études pour s'intéresser à différents sujets : hydrologie urbaine, économies d'énergie et optimisation des matériaux de construction. Après la guerre, il prend la présidence de la commission des matériaux de construction au Commissariat au Plan et se fait apôtre de la normalisation qu'il considère comme l'une des conditions essentielles du progrès technique. Il préside ainsi l'Association Française de Normalisation (AFNOR), puis l'Association Internationale de Normalisation (ISO). Il s'implique également de manière forte dans le développement de l'électricité qui, selon lui, « sauvera la France ». Caquot dresse alors les plans du barrage à contreforts multiples de la Girotte, construit de 1946 à 1948 pour Électricité de France. En raison de la pénurie des matériaux et par là même fautes d'armatures, Caquot conçoit des voûtes multiples en béton, en forme de demi-tores, côte à côte sur une longueur totale de 510 m en crête et une hauteur de 48,5 m.

L'année 1947 est marquée par son jubilé scientifique à l'École Polytechnique. A cette occasion, on lui demande de prendre part à de nombreuses manifestations dans des domaines très divers. Cette même année le Ministre lui demande d'exercer la présidence du comité scientifique de l'Office National d'Études et de Recherche Aéronautique (ONERA). Même à la retraite, il continue de s'investir dans la construc-

tion d'ouvrages exceptionnels pour lesquels il apporte son expérience et son inventivité. Il bat le record mondial de hauteur de chute pour l'écluse de Bollène à Donzère-Mondragon (Drôme) en 1950. Par décret du 21 décembre 1951, il est élevé à la dignité de Grand-Croix de la Légion d'Honneur au titre du Ministère des Travaux Publics.

Il s'éteint le 27 novembre 1976 dans sa 96e année.

Lorsque le président du Conseil Antoine Pinay remet à Albert Caquot les insignes de la dignité de Grand-Croix de la Légion d'honneur, le 29 février 1952, il lui dit : « *On parle volontiers des « grands serviteurs de l'État », ceux que le XVII^e appelait les « Grands Commis ». En vérité, vous êtes beaucoup plus et mieux qu'un serviteur de l'État ; car servir c'est obéir, c'est suivre un sillon déjà tracé. Vous avez, au contraire, ouvert des voies nouvelles. Vous avez été partout un révolutionnaire, non de ceux qui détruisent, mais de ceux qui édifient et dont l'Histoire écrit le nom en lettres d'or. Ces hommes, ce sont les créateurs...* »



Le barrage de la Girotte (1944-1949) en Savoie, en cours de construction (J. Kerisel, Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur, ENPS).

Albert Caquot

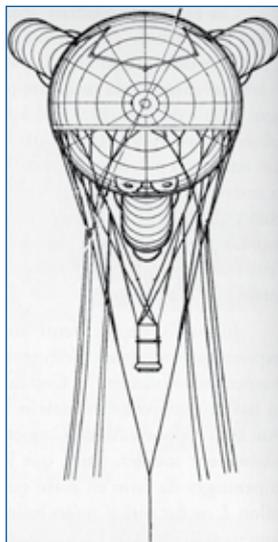
Albert Caquot exerce ses talents dans de multiples domaines. En cette période marquée par les deux guerres mondiales, il alterne entre deux passions : l'aéronautique et le génie civil. Dans le premier domaine, il perfectionne le ballon captif pour des besoins militaires, puis il se tourne ensuite vers l'aviation où son esprit de synthèse et de rigueur lui permettent d'encadrer son développement. Dans le second, de par sa formation d'ingénieur des Ponts et Chaussées, il construit de nombreux ouvrages innovants, en étudiant la résistance des matériaux et la mécanique des sols.

■ Aéronautique : le ballon captif Caquot

Lorsque Caquot intègre la Compagnie des aéroliers en 1914, les ballons utilisés par l'armée sont des ballons sphériques de 750 m³ mis au point par le colonel Renard, en 1881. Caquot constate alors l'inconfort de ce matériel destiné à l'observation terrestre.



The eyes of the Navy. Le ballon Caquot M monté sur un navire de guerre anglais, le cuirassé Glorious (Imperial War Museum, Londres) (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 55).



La géométrie des lobes du ballon Caquot M (musée de l'Air et de l'Espace, Le Bourget) (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p.50).

Le ballon Caquot

Albert Caquot se tourne vers la réalisation d'un ballon plus stable au vent : un ballon allongé de 900 m³ stabilisé par trois lobes arrière. Il est constitué de toiles et de cordes suspendant la nacelle en osier et l'attachant au sol. De par sa forme allongée, il reste stable aux vents de 90 km/h alors que le ballon sphérique ne tient que par vents de 36 km/h. En outre, Caquot remplace le treuil à vapeur par un treuil mécanique associé à un moteur Panhard.



Treuil Caquot à deux moteurs Panhard sur tracteur Latil à quatre roues motrices (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 46).

Une adaptation pour la marine

La marine souhaite utiliser des ballons captifs pour accompagner la flotte en observation aérienne et repérer ainsi les sous-marins. Caquot conçoit un treuil spécifique qui permet d'amortir progressivement la tension dans le câble lors de fortes rafales de vent, évitant ainsi la rupture du câble entre ballon et bateau, tout en améliorant le confort de l'observateur.

Une autre application

Suite à des bombardements de Paris, les ballons sont utilisés pour former des barrages aériens. Ils sont reliés entre eux par un câble supportant des chaînes verticales, véritable piège pour les avions. Ces ballons seront utilisés par tous les alliés, puis par les allemands.



Barrage avec ballons et câbles dans le ciel de Londres (1917 et 1918) (Imperial War Museum, Londres) (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 61).

Albert Caquot

■ Des grands ouvrages de génie civil

Le pont de la Caille (1925-1928)

Cet arc en béton sans armatures longitudinales de 137,5 m de portée, traverse le ravin des Usses profond de 150 m, à 11 km au nord d'Annecy. Ce pont devient alors un record mondial de portée en 1928.



Le cintre du pont de la Caille supportant les coffrages de l'arc (B. Marrey, *Les ponts modernes, 20e siècle*, p. 58)

La profondeur de la gorge étant importante, la disposition d'étaie-ment posé sur le sol est impossible. Caquot décide de suspendre 4 câbles parallèles

entre pylônes dressés sur les rives pour construire un arc de coffrage en bois. Ce cintre en bois de très grande portée, assez flexible, ne pouvant supporter la totalité du poids de l'arc en béton, il est coulé en trois épaisseurs ; chaque couche inférieure contribuant à reprendre le poids des couches supérieures.

Un môle d'escale au Verdon (1931-1932) : un procédé de fondation innovant

A l'embouchure de la Gironde est construit un môle (construction qui s'avance à l'intérieur d'un bassin pour faciliter l'embarquement ou le débarquement des marchandises) en eau profonde de 320 m de longueur. Il est fondé à travers une couche de sable de 7 à 9 m d'épaisseur sur un argile raide.

Caquot imagine d'émulsionner le sable pour descendre des piles colonnes en béton armé. La partie inférieure à la forme d'une cloche à l'intérieur de laquelle sont placés des tubes émulseurs à airs comprimés et des tubes d'évacuation des déblais. En faisant varier le débit d'air comprimé dans les émulseurs, l'inclinaison des piles peut être corrigée. Pour cet ouvrage, Caquot se voit décerner le prix Nizot de la Société des Ingénieurs Civils de France en 1933.

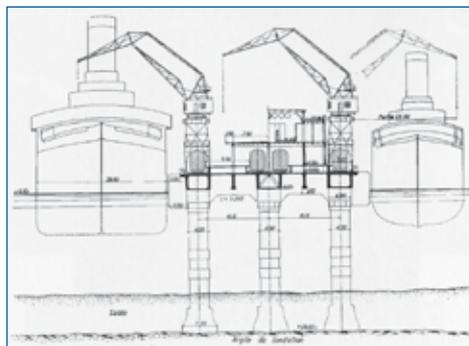
L'usine marémotrice de la Rance (1961-1966)

Agé de 80 ans, Caquot apporte à EDF une solution très ingénieuse pour barrer la Rance à son embouchure et réaliser ainsi la construction de l'usine marémotrice. A de fortes marées



Constructions des enceintes de palplanches à partir de caissons Caquot (Doucet, Dinard) (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 137).

s'ajoutent des courants de plus en plus violents à mesure que l'on ferme la Rance. Cette fermeture est réalisée sous formes d'enceintes circulaires de palplanches remplies de sables, mais qui au-delà d'une certaine vitesse du courant se désagrègent. L'idée de Caquot est de placer des éléments cylindriques hauts et étroits, lestés et de grande embase (9m de diamètre et 20 m de haut), en plein courant. Amenés par flottaison, ils sont basculés sur une forme plane en béton, préalablement coulée sur le fond rocheux. Les éléments sont aussitôt remplis de sable. Ils sont ensuite réunis deux à deux pour former des éléments cylindriques de plus grand diamètre. Le 20 juillet 1963, la Rance est fermée, l'usine peut donc être construite. L'usine terminée, les éléments cylindriques sont démolis et réutilisés pour construire un quai à Saint-Malo.



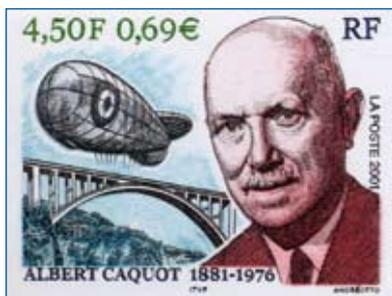
Coupe transversale du môle du Verdon (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 84).

Albert Caquot

■ Réalisations

Quelques ponts

- Pont de la Caille (1925-1928), ravin des Usses, Haute-Savoie, 11km au nord d'Annecy, RN 201
- Pont Lafayette (1927-1928), gare de l'est, Paris.
- Pont sur l'Artuby (1938), Gorges du Verdon, Alpes-de-Haute-Provence.
- Pont à haubans de Donzère-Mondragon (1952), sur le Rhône, Drôme. Il s'agit ici d'une rénovation d'Albert Caquot.



Timbre poste à l'effigie d'Albert Caquot, édité en juin 2001 à l'occasion du 120e anniversaire de sa naissance.

Quelques barrages

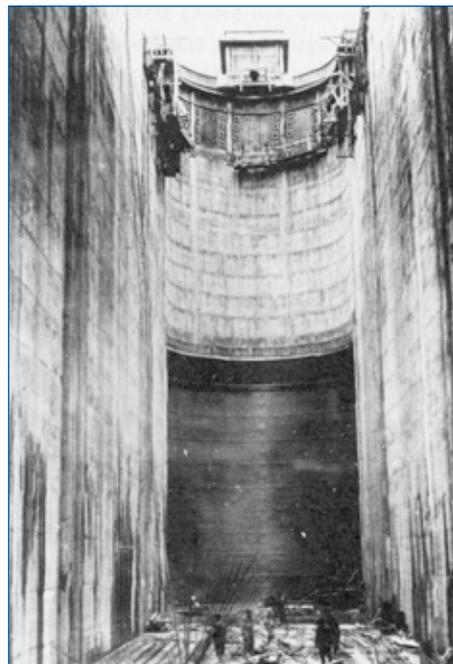
- Barrages de la Roche-qui-boit (1915-1919) et de Vezins (1929-1932), sur la Sélune, fleuve qui se jette dans la baie du Mont Saint Michel, Manche.
- Barrage du Sautet (1935), sur le Drac, 40km au sud-est de Grenoble, Isère.
- Barrage de la Girotte (1944-1949), sur le Donnet, au pied du glacier de Tré-la-Tête, Savoie.

Autres

- Structure interne du « Christ Rédempteur » (1931), Mont Corcovado surplombant la baie de Rio de Janeiro, Brésil.
- Écluse de Bollène, (1950), à Donzère-Mondragon, Drôme.

■ Pour en savoir plus

- A. Caquot, *Écrits d'ingénieurs*, Éd. du Linteau, 1997
- J. Kerisel, *Albert Caquot 1881-1976, savant, soldat et bâtisseur*, Presses de l'École des Ponts et Chaussées, 2001
- B. Marrey, *Les ponts modernes - 20^e siècle*, Picard, 1995
- Cent ans de béton armé, 1849-1949, éditions Sciences et Industrie, 1949.

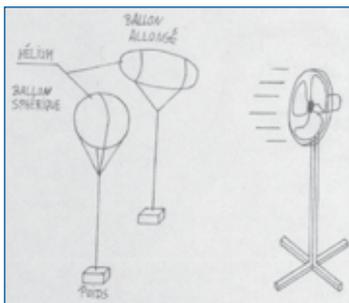


Ecluse de Donzère. Vers la porte aval de l'écluse, abaissée (en noir) (J. Kerisel, *Albert Caquot, savant, soldat et bâtisseur*, ENPS, p. 119).

- **Rédaction** : Marie Feyel
- **Schémas** : Anthony Garandel et Aymeric Canivenc
- **Coordination** : Gérard Villermain-Lécolier
- **Conception graphique** : Emmanuel Côté, Cnam Champagne-Ardenne, sur une idée d'Olivier Delarozière.
- **Musée des arts et métiers**, Service éducatif, 292, rue Saint-Martin - 75003 Paris
Tél. : (1) 40 27 27 52 ou (1) 40 27 26 40
ISBN : 2-908207-33-8

Albert Caquot

■ FORME DES BALLONS D'OBSERVATION

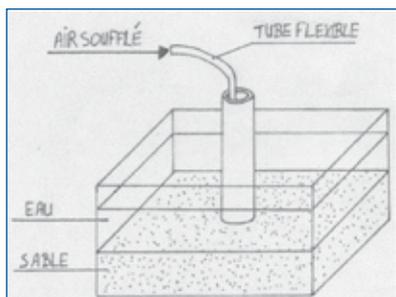


Vous devez disposer :

- d'un ventilateur
- d'un ballon sphérique gonflé à l'hélium auquel est suspendu un poids
- d'un ballon allongé gonflé à l'hélium auquel est suspendu un poids

Sous l'effet du souffle du ventilateur, le ballon allongé est plus stable que le ballon sphérique. On voit ainsi que cette forme a un meilleur aérodynamisme. Cette stabilité est encore améliorée sur les ballons Caquot par des lobes disposés à l'arrière.

■ FONDATION D'UNE COLONNE PAR ÉMULSION DU SOL

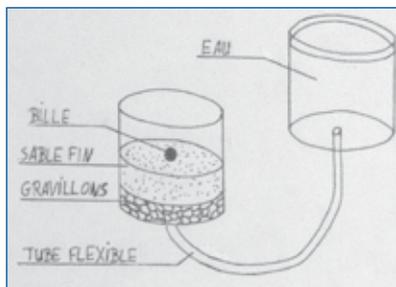


Vous devez disposer :

- d'un récipient transparent rempli de sable et d'eau
- d'un tube rigide
- d'un tube flexible qui puisse être introduit dans le précédent

L'air soufflé à la base émulsionne le sable peu compact. Le tube rigide s'enfonce alors par son propre poids vers le fond. Dans la réalité, plusieurs jets d'air comprimé permettent de maîtriser la descente verticale de la colonne.

■ PHÉNOMÈNE DU RENARD



Cette expérience met en évidence le dangereux phénomène du renard, c'est-à-dire une fissure dans un bassin ou un barrage par où se produit une fuite. Vous devez disposer :

- de deux récipients transparents
- de gravillons, de sable fin et d'eau
- d'un tube flexible
- d'une bille

Lorsque la différence de niveau entre les deux récipients dépasse une certaine hauteur le sable s'agite et la bille s'enfonce. La pression de l'eau diminue la portance du sable.

