

De 1878 à 2006 – Travaux hyperbares en tunnels

par Jean-Claude Le Péchon

Ingénieur Conseil, 94, rue de Buzenval, 75020 Paris, France. E-mail : hyperbar@club-internet.fr

Reçu le 9 mai 2006

RÉSUMÉ

Pour évaluer l'impact des recherches de Paul Bert sur les travaux hyperbares au sec l'état de l'industrie en 1878 est présenté. Il s'agit essentiellement de l'utilisation des machines de Triger pour l'exploitation de la houille sous la nappe phréatique ou pour établir les piles de pont dans les rivières ou à proximité. Les résultats obtenus par Paul Bert et applicables à ce type de travaux sont listés. Les principales étapes de développement survenu entre 1878 et 2006 sont présentées de même que l'évolution des procédures de décompression. L'amélioration des conditions de travail des tubistes résultant de l'apparition des tunneliers vers 1985 a été très importante, puisqu'il n'y a plus de creusement sous pression, mais seulement des inspections ou des réparations occasionnelles à effectuer

en hyperbarie. Les performances récentes en travaux hyperbares au sec sont expliquées. Les techniques actuelles ont permis, depuis 2000, des interventions à de fortes pressions, soit en incursion avec des mélanges respiratoires ternaires, soit avec la technique de saturation. Les perspectives dans ce domaine sont évaluées, elle ouvrent des voies soit vers l'accès à de très fortes pressions (13 bars possible en 2006) soit vers le remplacement complet des hyperbaristes dans les tunneliers du futur. De toutes ces descriptions il apparaît que Paul Bert avait indiqué clairement la direction à suivre pour améliorer la sécurité et les conditions de travail des tubistes et qu'aucune de ses recommandations n'était erronée, beaucoup restent d'application journalières.

SUMMARY From 1878 to 2006 – Working in hyperbaric conditions during tunnelling

To review the impact of Paul Bert's researches on hyperbaric work in tunnelling, the status of the industry in 1878 is described. Mostly based on the application of Triger's machine it was used to mine coal below the water table or to dig foundations for bridges in rivers or close to rivers. The results and conclusions obtained by Paul Bert which are applicable in that particular field are listed. The major steps of research or remarkable achievements in construction between 1878 and 2006 are presented as well as the evolution of decompression tables. Improvement in safety and conditions of caisson workers has been continuous until the technical revolution resulting from the introduction and the development of tunnelling boring machines (TBM) in the late 80's.

TBM technology has resulted in major changes in tunnel construction. Hyperbaric interventions have also changed completely since human operators no longer work in pressurized conditions. Only occasional inspections and repairs are carried out under pressure. Present performance in hyperbaric conditions are reported, and high pressures reached in the 2000's using saturation technology are described. The future of hyperbaric works is also discussed whether for very high pressure, or complete replacement of caisson workers in TBMs. These descriptions show that Paul Bert provides us with very clear directions to improve safety in hyperbaric conditions and that none of his recommendations were mistaken, most being still relevant.

L'INDUSTRIE DES TRAVAUX HYPERBARES EN 1878

Note technique : *Toutes les mesures de pression utilisées ici sont des bars mesurés au manomètre donc des bars relatifs.*

La machine de Triger

Dès l'invention de moyens de comprimer de l'air avec un débit significatif, l'idée d'assécher le fond d'une

cloche à plonger par application d'air comprimé, proposée semble-t-il en premier par Denis Papin, a été mise en pratique dans un tube par Triger (1845) pour l'extraction de houille et le creusement d'embases pour les piles de pont (Fig. 1). La description de ces techniques et les sites d'application forment tout un chapitre du livre de référence publié par Paul Bert en 1878, «La pression barométrique». Ce livre constitue un document historique de tout premier intérêt sur les conditions de travail des ouvriers à la fin du 19^{ème} siècle et la considération que l'on portait à l'époque à la prévention, à la sécurité et aux

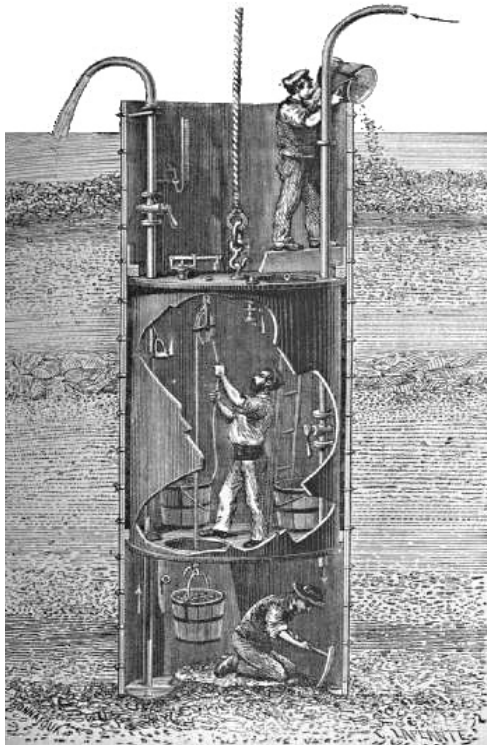


FIG. 1. – Machine de Triger.

accidents du travail... mais il est aussi un modèle de cahier journal de recherche ainsi qu'un exemple pour la conduite de discussion scientifique des résultats antérieurs et des points acquis par une expérimentation rigoureuse.

Les pressions atteintes pour les ouvriers travaillant dans ces machines sont impressionnantes et restent, même à l'heure actuelle, parmi les plus fortes pressions rencontrées sur des chantiers de travaux publics. Par exemple : extraction de houille jusqu'à 4,15 bars par postes de 4 heures 2 fois par jour... ! ou encore : piles de pont creusées jusqu'à 4 bars à Bayonne. Les pressions autour de 3 bars sont monnaie courante entre 1850 et 1878.

Curieusement Paul Bert ne décrit pas de creusement horizontal pour des tunnels autres que miniers, apparemment cette technique n'est intervenue à grande échelle que vers 1880, ceci est peut-être dû à l'absence de besoins de tunnels (autoroutes-métros-trains et autres parkings...) à cette époque.

Conséquences épidémiologiques sur les ouvriers

Les conséquences épidémiologiques pour les personnes exposées (et pas uniquement les ouvriers) sont catastrophiques, les accidents sont permanents, depuis l'explosion des hublots et autre « caissons » hyperbares, jusqu'aux accidents « physiologiques » directement liés à la vie sous pression dont personne avant Paul Bert n'avait fait une analyse exacte ni surtout expérimentale.

Pol et Watelle (1854) avaient rédigé un impressionnant rapport détaillé sur les conséquences au cours du creusement des mines. Ils avaient réuni, mais sans expérimentation, des observations suffisamment précises et nombreuses pour que Paul Bert puisse en les utilisant conforter les résultats de ses propres expériences.

Par exemple ils citent un chantier où, sur 64 ouvriers exposés au travail hyperbare à 4,25 bars (mine de charbon de Douchy dans le Nord), « 47 ont supporté plus ou moins bien les travaux ; 25 ont dû être réformés ; 2 sont morts... » en fait 14 ont éprouvé des accidents légers, 16 des accidents plus ou moins graves et 2 sont morts. Le régime de travail était de 2 interventions de 4 heures chaque jour, avec une décompression d'environ une demi-heure à chaque fois !!! Il n'est évidemment donné aucune information sur le devenir des « réformés ». Paul Bert cite aussi les arrêts des cours de justice appelées à se prononcer sur des dommages et intérêt pour les victimes du « mal des caissons » ; dans ces arrêts le doute introduit par l'idée, soutenue à l'époque par l'Académie de Médecine, que « c'est le froid induit par la baisse de pression qui provoque les symptômes et qu'il faut donc décompresser vite pour ne pas rester exposé au froid... » a conduit systématiquement à l'acquiescement des compagnies mises en causes...

Dans un contexte extrêmement polémique, Paul Bert a démontré et expliqué la majorité des maladies rencontrées, il a intégré toutes les formes de dysbarismes rencontrées aussi bien en altitude, en aérostat, en plongée que lors des travaux des tubistes et proposé des améliorations significatives des procédures. Malheureusement il a fallu beaucoup de temps avant que celles-ci ne deviennent pratique courante sur les chantiers de travaux de génie civil (Fig. 2 et 3). Sur les chantiers à l'étranger les problèmes étaient les mêmes et Paul Bert s'est intéressé au Pont de Brooklyn de New York dont les difficultés ont été décrites récemment par Butler (2004). D'autres avaient aussi proposé des explications farfelues qui résistaient à la démonstration expérimentale rigoureuse, et que Paul Bert s'est appliqué à démolir, y compris devant les institutions scientifiques les plus éminentes.

LES RÉPONSES DE PAUL BERT

Les recherches et les polémiques

Devant tant d'absurdités, d'incompréhension et tant d'accidents induits par ces travaux en caisson, P. Bert a intégré, sur des bases expérimentales rigoureuses et exemplaires, tous les facteurs liés aux changements de pression en distinguant clairement les effets mécaniques, toxiques et de dissolution des gaz que ce soit en altitude (mal des montagnes, vols en ballons) travaux subaquatiques ou en caisson.

Ce qui lui a permis, avec la même autorité et la même détermination d'affirmer ses idées devant les Académies des Sciences et de Médecine, comme il l'a fait aussi pour la laïcité et l'éducation dans ses mandats électifs (Corriol, 1997).

La compression

Paul Bert a bien identifié l'origine des douleurs auriculaires et des accidents barotraumatiques et indiqué qu'il était préférable de se moucher plutôt que de déglutir... C'est toujours le même discours dans les formations actuelles des hyperbaristes !

Il a indiqué que la vitesse de compression n'avait pas d'incidence sur la vie sous pression, ce qui est toujours vrai dans la gamme de vitesse et de pression concernée.

Le séjour sous pression

Il a établi que la vie sous air comprimé pour les durées impliquées par les travaux de l'époque ne posait en soit aucun problème.

La déformation de la voix et l'impossibilité de siffler ont été correctement attribuées à la densité accrue du gaz.

La permanence de la qualité de l'air comprimé dans l'enceinte pressurisée grâce à une ventilation suffisante a été intégrée à son étude sur le confinement et il a bien noté que dans le confinement hyperbare l'hypoxie n'était pas à redouter, mais seulement l'accumulation du gaz carbonique dont il faut évaluer l'effet en pression partielle... ce point reste toujours difficile à faire comprendre aux chefs de sas en formation dans nos activités hyperbares actuelles.

À la suite des observations rapportées par les opérateurs sur les chantiers, il a aussi évoqué le risque d'intoxication par les gaz qui peuvent être contenus dans le terrain et qui contaminent l'ambiance hyperbare. Nous avons dû résoudre ce type de problème dans des chantiers récents, notamment des pollutions industrielles au kérosène dans les zones creusées (Le Péchon, 2002a).

Ses travaux sur la toxicité de l'oxygène et qui sont depuis décrits dans le monde entier comme « l'effet Paul Bert », ne concerne que peu les travailleurs en air comprimé, mais la toxicité générale de l'oxygène sur toutes les cellules vivantes est prise en compte dans ses recommandations, même si pour les durées rencontrées et en air comprimé il n'y a pas d'effet direct. Ce n'est que lors de la mise en pratique de la décompression à l'oxygène pur que des précautions doivent être prises pour éviter l'effet Paul Bert (Le Péchon, 2004).

La décompression

Évidemment c'est le chapitre essentiel sur lequel Paul Bert a établi des bases nouvelles pour le retour à la pression atmosphérique.

Il a compris que ce sont des bulles d'azote dissous pendant le séjour hyperbare qui, reprenant leur forme gazeuse lors de la baisse de pression, causent d'une part des embolies et d'autre part des conséquences sanguines et générales.

Il en a déduit qu'il fallait décompresser doucement pour laisser le temps à cet azote de ressortir par la voie pulmonaire, que la respiration d'oxygène pur après le retour à la pression normale favoriserait l'élimination de

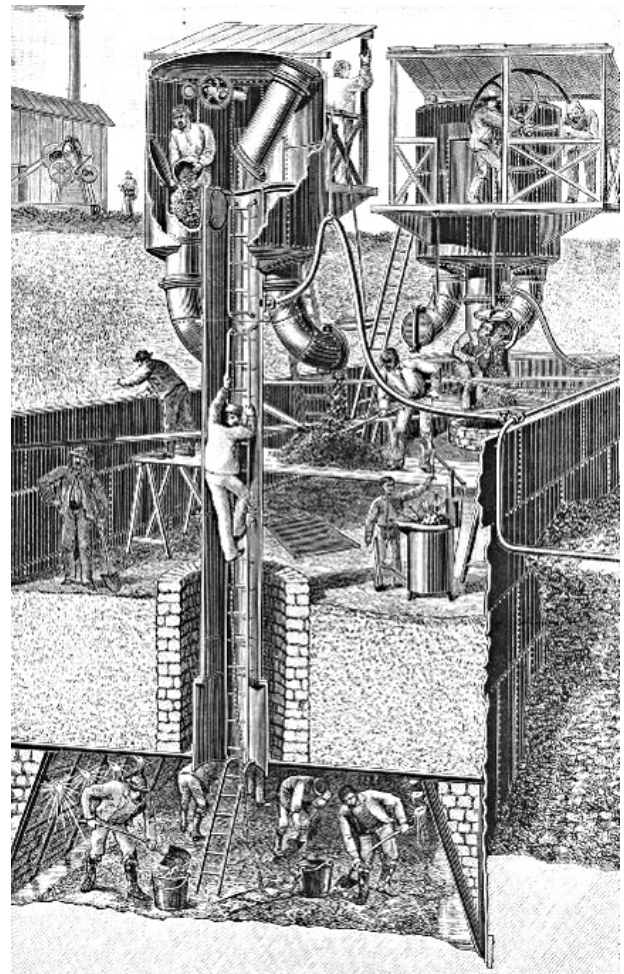


FIG. 2. – Fondation de la Tour Eiffel.

cet azote, et que la recompression était le moyen de traiter les victimes... Tout y est, ou presque.

Le seul point qu'il n'a pas envisagé est l'importance de la durée d'exposition sur la quantité d'azote finale à éliminer. Il en résulte une proposition de décompression lente, dont la durée ou la vitesse sont indépendantes de la durée du séjour hyperbare mais liées à la pression atteinte. Cela provient sans doute du fait que les symptômes observés étaient très aléatoires et que les durées d'exposition, elles, étaient assez relativement uniformes de l'ordre de 4 heures deux fois par jour. Ces deux faits ont sans doute masqué à cet observateur rigoureux le rôle essentiel du temps.

DE 1878 À 2006 – LES ÉTAPES PRINCIPALES

Haldane

Sur demande de l'Amirauté Britannique et après un appel d'offre, Haldane a été chargé d'étudier la question de la décompression des scaphandriers et des tubistes. Il

a remis en 1908 un rapport (Boycott *et al.*, 1908) qui a fait date. Non seulement il a tenu compte de la durée d'exposition mais il a produit un modèle mathématique de l'absorption et de l'élimination de l'azote qui est toujours utilisé actuellement pour de nombreux calculs de tables de décompression (Bennett & Elliott, 1993 ; Broussole, 1992) que l'on qualifie « d'Haldanien ». De plus sur le fondement d'expériences rigoureuses sur des chèvres, il a quantifié les variables de son modèle et publié une table de décompression avec des paliers destinée aux scaphandriers et aux tubistes.

Cette table a permis une amélioration considérable de la sécurité de ces travaux immergés ou en air comprimé et a été utilisée pendant des dizaines d'années avant de devoir être révisée.

Bornstein (A et A) et le tunnel sous l'Elbe

À l'occasion des travaux de creusement en air comprimé d'un tunnel sous l'Elbe à Hambourg, Arthur Bornstein, et sa femme Adèle (Faesecke, 1998 et 2001) se sont vus chargé de l'hygiène industrielle et ont immédiatement été confrontés aux victimes du mal des caissons. Ils ont recommandé et fait appliquer les tables de Haldane, étudié la décompression à l'oxygène dont l'utilisation les a amenés à revenir sur les conséquences de l'effet Paul Bert, et ils ont introduit la recompression thérapeutique avec respiration d'oxygène pur. Leurs travaux publiés exclusivement en allemand n'ont pas eu la portée de ceux écrits en anglais ou en français, mais n'en sont pas moins une étape importante dans l'amélioration des conditions de travail des tubistes.

Les grands chantiers et la nécrose osseuse

Sans qu'il soit utile ici de les citer systématiquement, la période qui suit et jusque vers 1980 a vu de très nombreuses réalisations sous air comprimé, et petit à petit les principes d'une décompression contrôlée ont pris racine dans l'industrie, et les accidents de décompression sont devenus moins nombreux laissant apparaître un nouveau mal, qui n'avait pas été cité du temps de Paul Bert parce que le suivi à long terme des personnes exposées n'existait pas : la nécrose osseuse.

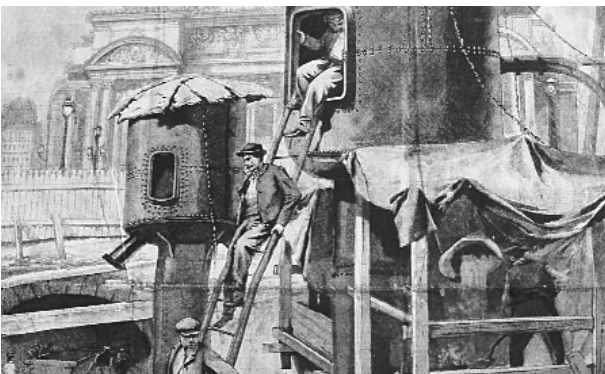


FIG. 3. – Sortie du sas, Place de l'Opéra, 1905.

Plusieurs années après les travaux en caisson, avec ou sans accidents de décompression identifiés, une majorité des travailleurs a été atteinte de dégénérescence osseuse au niveau des grosses articulations. Cette dégénérescence a été décrite comme nécrose osseuse dysbarique ou aseptique, par opposition à des nécroses osseuses résultant d'autres pathologies (McCallum, 1974).

Cette pathologie va devenir la préoccupation essentielle et les britanniques vont ouvrir un registre des personnes travaillant en air comprimé pour en assurer un suivi radiologique et une évaluation épidémiologique (McCallum, 1974). Les scaphandriers et les aviateurs sont aussi victimes de cette pathologie résultant des décompressions trop rapides, même sans symptômes d'accident de décompression.

Dans les années 70, les discussions sur l'utilisation de la décompression à l'oxygène et de la recompression d'urgence avec oxygène hyperbare sont toujours en cours. Ainsi, chaque état américain développe sa propre table alors que pour un chantier à Blackpool (UK), Hempleman propose des tables (1968) que l'on appellera par la suite « Tables de Blackpool » et qui resteront en vigueur dans les pays du Commonwealth jusqu'en 2001 (CIRIA, 1982 ; Health and safety executive, 1996 rev. 2001). Ces tables ont apporté une amélioration significative bien que les temps se soient avérés beaucoup plus longs que nécessaire pour les interventions de courtes durées et pas assez longs pour les interventions prolongées, qui sont les plus fréquentes.

La respiration d'oxygène pendant la décompression a été arrêtée brutalement à la suite d'un incendie au Japon qui a fait une dizaine de victimes (Nashimoto, 1967). En outre la pratique du « decanting » qui consiste à sortir du sas avant la fin de la décompression pour se recomprimer rapidement dans un autre caisson pour finir la décompression a encore compliqué la situation et créé beaucoup de cas d'accidents de décompression appelés « bends » et de nécrose osseuse (Kindwall, 1993). Cette pratique est courante en plongée subaquatique (Shields & Lee, 1986) mais la recompression doit être faite selon une table spécialement calculée pour et sous respiration d'oxygène. Une étude comparative détaillée de toutes les tables officielles en 1972 a été conduite au DCIEM de Toronto et publiée dans un rapport exhaustif (Koch & Nishi, 1972).

En Allemagne une table de 1994 (Novellierung der Druckluftverordnung, 1994) avec respiration d'oxygène a aussi été mise en place, elle donne des temps relatifs de décompression beaucoup plus courts que ceux préconisés par la procédure française, les statistiques disponibles font penser qu'elles sont malgré tout acceptables et en tous les cas acceptées en Allemagne.

Évolution en France

Les véritables premières règles de sécurité efficaces sont apparues en France en 1974 (décret du 9 juillet 1974 et arrêté d'application) sous l'impulsion de G. Susbielle et P. Cabarrou (1973), à l'occasion du creusement de la ligne RER entre Étoile et Aubert. Des règles techniques et des tables de décompression nouvelles sont intro-

duites. Ces tables en usage jusqu'en 1992 ont apporté une nette amélioration avec la disparition des nécroses osseuses et des accidents de décompression, jusqu'à ce que des pressions supérieures à 2 bars soient nécessaires sur d'autres sites, zone où ces tables avec décompression à l'air se sont avérées elles aussi insuffisantes. La version avec oxygène publiée en même temps n'a jamais été mise en pratique.

En 1990, une révision réglementaire importante est intervenue qui a regroupé dans un même nouveau décret (décret du 28 mars 1990) les mesures de prévention à mettre en place pour tous les travaux hyperbares (Le Péchon, 2002b et c), en plongée ou au sec quelles que soient les professions concernées (Le Péchon & Pasquier 1992). La partie consacrée aux travaux en air comprimé a été préparée par l'industrie et a intégré les formations obligatoires, l'organisation des responsabilités sur les chantiers, les conditions d'aptitude et de surveillance médicale, et procuré un jeu complet de tables de décompression (Le Péchon, 1999), y compris avec respiration d'oxygène. Ces procédures ont été introduites sur tous les nouveaux chantiers français d'abord à l'air, puis dans un deuxième temps avec l'oxygène à la décompression (Le Péchon, 1992). La nécrose osseuse est sortie des préoccupations de la médecine du travail et les accidents de décompression ont presque disparu lors de la décompression à l'air et complètement grâce à la décompression à l'oxygène.

LES TUNNELIERS ACTUELS

Apparition des tunneliers

Les premières machines à creuser les tunnels sous pressions sont très anciennes, mais n'ont commencé à être opérationnelles que vers 1970, et sont apparues en France en 1985 pour le creusement de la ligne sous-fluviale du Métro de Lyon. Pour le chantier de tunnel sous la Manche, la pression était potentiellement de 10 bars sur une courte partie des trajets des 3 tunneliers côté français. Une étude de faisabilité de travaux sous 10 bars a conduit à l'abandon de la solution hyperbare au profit de la congélation en cas de besoin. À partir de 1987, des chantiers de tunnels avec hyperbarie se sont succédés en France pour des pressions majoritairement inférieures à 3 bars.

Les changements majeurs

L'utilisation des tunneliers a amené des changements radicaux dans les travaux hyperbares puisque ces machines creusent mécaniquement sans présence humaine sous pression, les interventions humaines étant strictement limitées aux visites des outils de coupe, à leur changement ou à leur réparation. Les tubistes ne sont plus des terrassiers ou des mineurs, mais des techniciens mécaniciens, découpeurs ou soudeurs et tous sont maintenant formés à l'accès au travail sous pression. Les interventions ne se font par poste qu'exceptionnellement en cas de gros travaux de réparation.

La sécurité des tubistes est maintenant prise en compte à partir des évaluations des risques (décret du 5 novembre 2001) et non seulement le risque (mineur) d'accident de décompression est évalué, mais aussi les risques d'accident du travail en pression ou d'incendie lors des soudages ou découpages ou pendant les décompressions sous respiration d'oxygène. Tout cela exige une préparation minutieuse des travaux car les secours éventuels seraient extrêmement difficiles à mettre en œuvre en hyperbarie.

Les types de tunneliers

Il existe actuellement deux systèmes principaux pour les tunneliers : 1) les machines à attaque ponctuelle pressurisée dans lesquelles l'extraction des matériaux se fait par une vis d'Archimède (réseau de collecte des eaux pluviales à Paris, Toulouse, Bordeaux, Lyon...) (Fig. 4) ou un sas (Orly-Val) et qui sont limitées à des diamètres inférieurs à 8 mètres environ ; 2) les tunneliers à roue dont l'abattage se fait par une roue porte outils, et pour lesquelles l'extraction du terrain abattu est réalisé soit par circulation de bentonite (dits à pression de boue), soit par vis d'Archimède (dits à pression de terre) (Fig. 5).

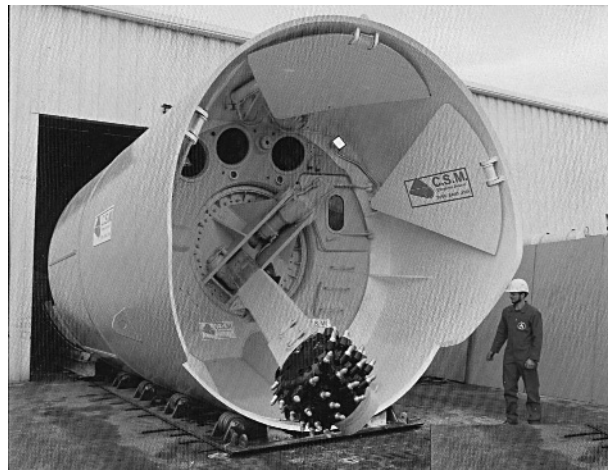


FIG. 4. – TBM, attaque ponctuelle pressurisée.



FIG. 5. – TBM à roue, Métro à Hong Kong.

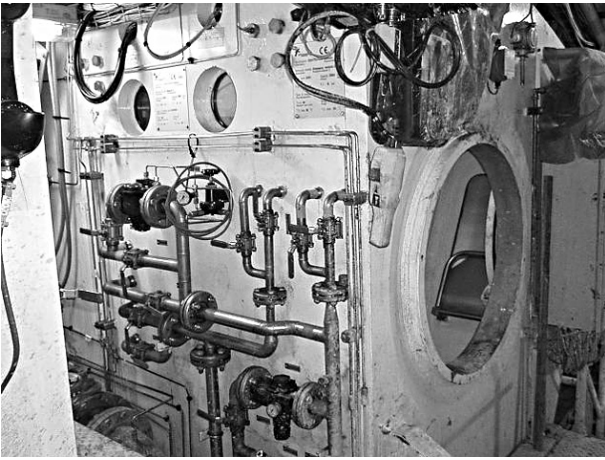


FIG. 6. – Les sas du tunnelier de Groene Hart (diamètre : 15 m).

L'accès à la zone pressurisée se fait toujours par un (ou des) sas fixé(s) sur le bouclier et qui avance(nt) en même temps que la machine construit la galerie. Les caractéristiques techniques minimales de sécurité de ces sas sont maintenant couvertes par une Norme Européenne (CEN 12100).

La vitesse de creusement de ces machines est de l'ordre de 10 à 20 mètres par jour et les diamètres vont de 3 mètres environ jusqu'à 15 mètres pour le plus grand actuel (tunnel de Groene Hart en Hollande pour le TGV-2002) (Fig. 6).

Les interventions hyperbares courantes

Les interventions hyperbares courantes en 2005 sont dans la gamme de 2 à 3 bars, pour des durées qui atteignent seulement 2 à 3 heures une fois par jour (on est loin de l'époque de Paul Bert) avec décompression systématique à l'oxygène et les tables françaises ont été adoptées dans de nombreux pays suite aux chantiers réalisés par les équipes françaises (Australie, Hong Kong, Danemark, Espagne...). Au Royaume Uni la réglementation de 1996 a été révisée en 2001, pour imposer les tables de Blackpool avec respiration d'oxygène, sans autres changements, ce qui a amélioré la situation mais est une très mauvaise solution physiologique et économique puisque l'utilisation de l'oxygène n'apporte pas l'économie de décompression qui y est habituellement conférée.

Les très hautes pressions

La physiologie a montré depuis longtemps que la respiration d'air comprimé posait des problèmes de narcose et de ventilation pulmonaire dès 4 bars environ et pour les travaux hyperbares qui sont souvent intenses, la respiration de mélanges moins narcotiques et plus légers (donc contenant une proportion significative d'hélium) est recommandée dès 3,5 à 4 bars.

Les premiers à avoir réalisé des travaux hyperbares avec respiration de ces mélanges contenant de l'hélium

ont été les japonais pour des piles de pont à Nagoya dans un projet titanesque, où le creusement sous pression était mécanisé, mais pour lequel le démontage final des machines a demandé des travaux sous pression considérables dans la tranche de pression de 5 bars (Hirata *et al.* 1992).

Westerschelde

Dès 1974, mais uniquement pour la zone de pression permettant la respiration d'air comprimé, Behnke (1974) avait proposé, sans suite, de faire vivre les tubistes en saturation dans un habitat à construire dans la galerie, ce qui est impraticable.

Pour le creusement de deux galeries d'autoroute sous le Westerschelde en Hollande, la pression prévue pouvait atteindre 7 bars. Pour ces pressions les mélanges s'imposent, mais les temps de décompression deviennent prohibitifs et la technique de saturation a été mise en œuvre en tunneliers pour la première fois en 2002, pour les réparations des deux tunneliers à la pression maximale de 6,9 bars (Le Péchon *et al.* 2000). Dans les parties moins profondes du projet, des interventions en incursion de courtes durées au mélange ternaire (azote/hélium/oxygène) ont aussi été réalisées (Sterk & Sterk, 2000).

Pour ces interventions en saturation, un train hyperbare (Fig. 7) a été construit pour transporter les équipes d'hyperbaristes de leur habitat pressurisé sur le site (Fig. 8) jusqu'à l'arrière du tunnelier où le caisson, désolidarisé du train, était transporté au travers de la machine puis clampé sur le sas pour permettre un transfert sous pression, le même itinéraire servant au retour vers l'habi-



FIG. 7. – La navette sur le train hyperbare.



FIG. 8. – L'habitat de saturation à Westerschelde.

tat, chaque rotation de 8 heures donnant environ 4 heures de travail dans la tête d'abattage. A la pression maximum, il a même fallu travailler en immersion dans la bentonite sans aucune visibilité... ! Le train a effectué au total du projet et pour les deux machines 340 sorties...

Saint-Petersbourg

Pour le métro de Saint-Petersbourg en 2003, la pression était de 5,8 bars et là encore les interventions ont été réalisées par des scaphandriers, mais au sec, sur respiration de mélanges ternaires en incursion. Une navette hyperbare était disponible pour une évacuation éventuelle sous pression en cas d'accident du travail (Fig. 9).



FIG. 9. – La navette dans la galerie à Saint-Petersbourg.

LES PERSPECTIVES POUR LE FUTUR

Les perspectives pour le futur vont dans deux directions opposées : répondre aux besoins d'hyperbarie même si la pression devient très forte, ou essayer de se passer des hyperbaristes.

Projet en cours avec hyperbaristes et fortes pressions

Des projets en cours en 2006, continuent à prévoir de l'hyperbarie même pour des pressions très élevées :

– En Suède (Hallandsås) un tunnelier est équipé pour pouvoir intervenir jusqu'à 13 bars, en saturation, avec des mélanges hélium-oxygène. Le creusement est en cours, la pression atteint déjà plus de 6 bars, mais l'écoulement d'eau reste acceptable pour un pompage pendant les interventions à pression atmosphérique. Il est probable que cela ne durera pas lorsque la pression va augmenter avec l'avancement du projet... à suivre !

– Aux États Unis (Seattle) un appel d'offre est en cours avec des pressions annoncées de 6 bars, éventuellement jusqu'à 7 bars. Les interventions d'hyperbaristes font partie des procédures à chiffrer.

Le remplacement des tubistes

À plus long terme, comme on l'a vécu pour les travaux d'assistance au forage pétrolier, il est évident que les hyperbaristes, comme les scaphandriers avant eux, ne seront tolérés sur les chantiers que tant qu'ils permettront de résoudre des problèmes pour lesquels il n'y a pas d'autres solutions. Les fabricants de tunneliers et leurs clients sont engagés dans des recherches appliquées sur les moyens de fiabiliser les outils, de changer les outils à partir de la pression atmosphérique, de mieux évaluer les aléas géologiques... Ils vont y arriver, la seule question qui reste est : combien de temps cela va-t-il prendre ?

En attendant les interventions hyperbares dans toute la gamme des pressions offrent encore de belles perspectives de travaux difficiles, constituant des défis techniques et de surcroît passionnants.

CONCLUSIONS

Si l'on reprend les affirmations de Monsieur Paul Bert quant à l'évaluation de la situation des hyperbaristes pour les creusements sous pression, on s'aperçoit qu'il avait pratiquement tout expliqué, qu'il ne s'est trompé nulle part. Même s'il n'a pas pris en compte le facteur temps dans la décompression, il a éliminé tellement d'idées fausses et charlatanesques, qu'on peut déclarer qu'il a été un véritable précurseur dans la prévention de risques industriels des travaux hyperbares et qu'il nous a montré le chemin pour rendre ces techniques, qui ne sont pas sans danger, plus sûres et avec des niveaux de risques aussi bien contrôlés que possible.

Merci Monsieur Paul Bert

BIBLIOGRAPHIE

- Bert P., La Pression Barométrique, Réédition 1979, Éditions du CNRS, Paris, 1878.
- Behnke A. R., New format for pressurised tunnel operations with application to surface-depth diving (300-500 feet). *In* : Proceedings of the 1st Annual Meeting North Pacific Branch of the Undersea Medical Society, Avalon Calif. Univ. Calif. Santa Catalina Mar. Scien. Cent., 1974, pp. 35-36.
- Bennett P. B. & Elliott D. H., The physiology and medicine of diving, 4th Ed. Baillière Tindall, London, 1993, 613 p.
- Broussole B., Physiologie et médecine de la plongée, Ellipses Ed., 1992, 687 p.
- Boycott A. E., Damant G. C. C. & Haldane J. S., Prevention of compressed air illness. *J. Hyg. Lond.*, 1908, 8, 342-443.
- Butler W. P., Caisson disease during the construction of the Aeds and Brooklyn bridges; a review. *Undersea Hyperbaric Med.*, 2004, 31 (4), 445-459.
- Cabarrou P. & Susbielle G., Tables de décompression après travail en air comprimé. *Revue de médecine du travail*, 1973, II (3) 217- 229.
- CEN, Tunneliers – Sas de transfert – Prescriptions de sécurité, AFNOR norme NF EN n° 12110, mai 2003.
- CIRIA, Medical code of practice for work in compressed air, CIRIA report No. 44, first published 1973 3rd ed. 1982.

- Corriol J., Paul Bert : un savant devenu homme politique. *Sem. Hôp. Paris*, 1997, 73 (3-4), 114-121.
- Décret n° 74-657 du 9 juillet 1974 relatif aux mesures particulières de protection et de salubrité applicables dans les chantiers de travaux dans l'air comprimé. J.O. du 26 juillet 1974, pp. 7857-7861.
- Décret n° 90-277 du 28 mars 1990 et arrêtés d'application, Brochure 1636, Travaux en milieu hyperbare. Mesures particulières de prévention, Journal Officiel République Française, Édition 1992.
- Décret n° 2001-1016 du 5 novembre 2001, portant création d'un document relatif à l'évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs.
- Faesecke K. P., Die medizinischen Forschungsarbeiten von A. und A. Bornstein beim bau des ersten Hamburger Elbtunnels 1909-1910, Editions trident, Kiel, 1998, 260 p.
- Faesecke K. P., Early 20th century hyperbaric research in Hamburg – The Works of A. and A. Bornstein. Proceedings EUBS 27th Annual Scientific Meeting Hamburg. Sept. 12-16, 2001, pp. 148-150.
- Health and Safety Executive, A guide to the work in compressed air – Regulations, HSE Books Sudbury Suffolk CO 106FS- (Revised Nov. 2001 for Oxygen decompression), 1996.
- Hirata T, Takano K, Gotoh Y, Nashimoto I & Sterk W., Remotely controlled caisson method and its maintenance. *In* : Jardine F. M. & McCallum R. I., editors. Engineering and Health in Compressed Air Work. London : E & F Spon. 1992, pp. 519-528.
- Kindwall, Compressed air work. *In* : The physiology and medicine of diving. Bennett and Elliott 4th ed. London : Saunders Company Ltd. 1993, pp. 1-18.
- Koch G. H & Nishi R. Y., Decompression procedures for caisson work – A review of various techniques. Downsview Ont. Canada: Defence and civil institute of environmental medicine. Report No. 905. 1972, 25 p.
- Le Péchon J.-C. & Pasquier J.-L., French Regulation 1992 for hyperbaric works. *In* : Engineering and Health in Compressed Air Work, Jardine F. M. & McCallum ed. E & F Spon, London. 1992, pp. 483-492.
- Le Péchon J.-C., Oxygen decompression in tunnelling. *In* : Engineering and Health in Compressed Air Work, Jardine F. M. and McCallum ed. E & F Spon, London. 1992, pp. 529-538.
- Le Péchon J.-C., Les tables de décompression françaises pour tubistes (1992) : améliorations souhaitables, nécessaires, possibles? *In* : Actes Journées d'études Internationales de Paris AFTES, 25-28 octobre 1999. Specific Ed. Caluire France.
- Le Péchon J.-C., Sterk W. & Van Rees Vellinga T. P., Saturation diving for tunnelling operations. *In* : Proceedings of the XXVI Annual Scientific Meeting of EUBS, Malta. 2000, p. 274.
- Le Péchon J.-C., Compressed air work in a kerosene contaminated soil. *In* : Proceedings Second International Conference on Engineering and health in Compressed air work. Oxford, September 2002a, pp. 153-162.
- Le Péchon J.-C., Législation française du travail en conditions hyperbares. *In* : Traité de médecine hyperbare Wattel F. & Mathieu D. Edit, Ellipses, Paris, 2002b, pp. 653-662.
- Le Péchon J.-C. Sécurité en situation hyperbare. *In* : Traité de médecine hyperbare Wattel F. & Mathieu D. Edit, Ellipses, Paris, 2002c, pp. 600-614.
- Le Péchon J.-C., Risques liés à la respiration de mélanges gazeux hyperoxiques. INRS Hygiène et sécurité du travail. Cahier de notes documentaires n° 195, 2004, pp. 89-94.
- McCallum R. I., Osteonecrosis in tunnel and caisson workers, *In* : Beckman E. L. & Elliott D., editors. Proceedings of a Symposium on Dysbarism-Related Osteonecrosis, Galveston Texas, NIOSH, 1974, pp. 3-8.
- Nashimoto I., Prevention of decompression sickness by special procedures. The use of oxygen during decompression of caisson workers. *In* : Decompression of compressed air workers in civil engineering. McCallum ed. Oriol press Ltd Newcastle upon Tyne, 1967.
- Novellierung der Druckluftverordnung (DLV), Aufenthalts- und ausschleusungszeiten für Arbeiten in Druckluft. Bek.des BMA vom 26.Oktober 1994, IIIb2-34572-2.
- Pol B. & Watelle T. J. J., Mémoire sur les effets de la compression de l'air appliquée au creusement des puits à houille. *Annales d'Hygiène publique et de médecine légale (industrielle et sociale)*, 1854, 1, 241-279.
- Shields T. G. & Lee W. B., The incidence of decompression sickness arising from commercial offshore air-diving operations in the UK sector of the north sea during 1982/1983, Dept of Energy Contract TA 93/22/147, Aberdeen, Hyperbaric Medicine Unit R. Gordon's Institute of technology, 1986.
- Sterk W. & Sterk E. J., Trimix in the Westerscheld deep tunneling project, Proceedings of the XXVI Annual scientific meeting of EUBS, Malta, 2000, p. 98.
- Triger M., Mémoire sur un appareil à air comprimé, pour le percement des puits de mine et autres travaux, sous les eaux et dans les sables submergés. *Compt. Rendus Acad. des Sciences*, 1841, XIII, 884-896.