

Traversée des détroits au Danemark: Storebaelt

Autor(en): **Boskovitz, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **122 (1996)**

Heft 22

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78871>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Traversée des détroits au Danemark: Storebaelt

Par Pierre Boskovitz,
rédacteur

Le Danemark et la Suisse sont des pays comparables par leur superficie et le nombre de leurs habitants. Et si la Suisse est un pays de montagnes et de vallées, alors que le Danemark est une terre d'îles et de détroits, ces particularités du relief constituent autant d'obstacles à surmonter pour assurer la circulation des voyageurs et des marchandises sur l'ensemble du territoire. Ainsi la Suisse s'est attachée à l'aménagement des cols et au percement de tunnels à travers les Alpes, tandis que le Danemark a complété ses réseaux par des services de ferries et la construction de ponts pour relier ses îles. Or les transports modernes, tant routiers que ferroviaires, posent de nouvelles exigences avec des vitesses et des volumes de trafic en augmentation. Malgré les lenteurs et les difficultés, un réseau autoroutier et un réseau ferré à grande vitesse se mettent en place à l'échelle du continent européen et imposent des grands travaux d'infrastructure. En Suisse, il faut percer de nouveaux tunnels. Au Danemark, cette évolution ne peut plus s'accommoder de transbordements par ferries mais nécessite l'établissement de liens fixes à travers les détroits, mêmes s'ils sont larges de plus de dix kilomètres.

La Suisse par sa situation au cœur même du continent, et le Danemark comme « charnière » entre la mer du Nord et la Baltique et comme « pont » vers la Scandinavie, constituent tous deux un lieu de passage obligé et, pour l'un comme pour l'autre, les échanges internationaux sont d'importance vitale. De ce point de vue, l'intérêt des grands travaux en cours au Danemark ou entre ce dernier et ses voisins, ne se limite pas aux pays directement concernés.

Par ailleurs, diverses entreprises européennes associées dans des consortiums participent à ces grands travaux qui constituent également de nouvelles avancées dans l'art de construire.

Ce sont sans doute ces analogies qui ont amené le groupe d'experts suisse responsable des Nouvelles lignes ferroviaires alpines (NLFA) à visiter le chantier du Storebaelt en 1994.

Danemark: un peu de géographie

Le royaume du Danemark comprend le Danemark proprement dit, ainsi que les territoires autonomes des îles Féroé – un archipel de dix-huit îles situé dans l'Atlantique Nord entre l'Ecosse et l'Islande, à 1500 km de Copenhague (62° lat. Nord, 1399 km²) – et du Groenland – la plus grande île du monde (2 175 600 km²), à 84 % recouverte d'une calotte de glace dont l'épaisseur atteint 3 km.

Entre la Baltique et la mer du Nord, le Danemark métropolitain couvre une superficie de 43 000 km² pour une population de 5,2 millions d'habitants. Son territoire comprend la presqu'île du Jutland (Jylland) et quatre cent six îles dont nonante seulement sont habitées. Les îles principales sont le Seeland

(Sjælland), la Fionie (Fyn), les îles jumelles de Lolland et Falster, Aerø, Als, Anholt, Laesø, Langeland, Mors, Møn, Samsø et Sejerø, ainsi que Bornholm à plus de 200 km à l'est de Copenhague, la capitale, elle-même située sur l'île de Seeland.

Le relief, culminant à 170 m, n'a, jusqu'ici, pas nécessité le percement de grands tunnels de façade ou de base. Cependant, le territoire étant fortement fractionné, la longueur des côtes atteint 7300 km (soit plus d'un sixième de la circonférence de la terre) et les voies de communication terrestres doivent être complétées par des services de ferries et des ouvrages d'art.

La plus importante coupure des réseaux routier et ferroviaire est le Storebaelt, ce détroit de quelque 18 km qui sépare la Fionie du Seeland et divise la population du Danemark en deux parties à peu près égales. En même temps, le Storebaelt constitue une voie maritime très fréquentée.

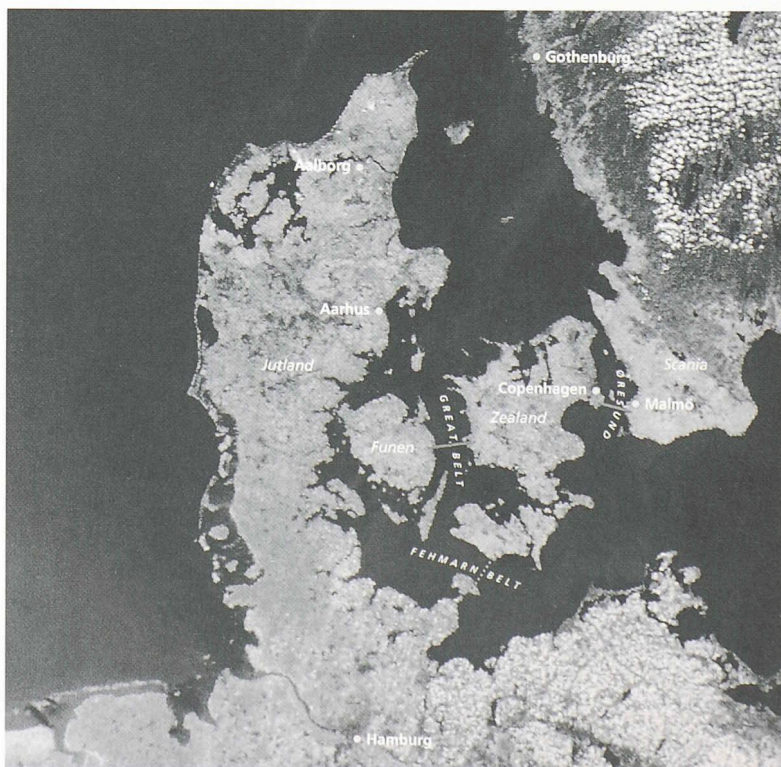


Fig. 1. - Le Danemark: ses îles et ses détroits

(Photo satellite: Institut météorologique danois)

Tableau 1. - Transports par route et par rail

1993	voyageurs		marchandises	
	(millions)	(millions de voyageurs-km)	(millions de tonnes)	(millions de tonnes-km)
par route		72 049		9 260
par rail	151,5	4 800	4,915	1 155,3
dont:				
trafic national			2,115	502,3
trafic international			2,8	653

Transports¹

Au Danemark, comme partout dans le monde, l'usage des voitures privées est en augmentation, ce qui s'explique par la qualité du réseau routier, l'augmentation du prix des transports publics et la diminution de celui des carburants. Cette motorisation en hausse demeure toutefois tempérée par les impôts et taxes dont elle fait l'objet, ainsi que par le développement des transports publics, surtout depuis les années 1980.

Un Danois adulte parcourt en moyenne 12 700 km par année, dont 7 100 comme conducteur d'une voiture privée, 2 400 comme passager d'un tel véhicule, 2 100 en bus ou train et 600 à vélo ! Cela représente quelque 35 km par jour et par personne, dont 75 % sont parcourus en voiture privée et dont le train ne couvre que 9 %, tandis que 5 % de cette distance est parcourue à vélo.

¹ D'après : « Danmarks Statistik: Transportstatistik 1995 », Copenhague, 1995 (contient, en général, des données de 1993)

Tableau 2. - Transports routiers

longueur du réseau	71 100 km
dont routes principales	4 552 km
dont autoroutes	737 km
véhicules automobiles	1,95 million
voitures de tourisme	1 618 000
motorisation	374 voitures/1000 habitants
véhicules-kilomètres	36 000 millions (1989)

Tableau 3. - Transports ferroviaires

longueur du réseau	2 881 km
voyageurs	151,5 millions
	4 800 millions de voyageurs-km
marchandises	4,915 millions de tonnes
	1 155,3 millions de tonnes-km

Transport de marchandises

La route domine dans le trafic interne (94 %) alors que le transport maritime est prépondérant dans le trafic international (71 %). Quant au trafic de marchandises par voie ferrée, il est modeste sur le plan interne (2 %) mais se développe sur le plan international.

Transports routiers

Réseau routier

Le réseau routier mesure 71 100 km, soit 1,65 km par km² ou encore 37 km pour 1000 véhicules. Si la longueur du réseau n'a augmenté que de 1,5 % en dix ans, le nombre de véhicules a en revanche connu une augmentation de 15 % pendant la même période.

Les 737 km d'autoroute font partie des 4 552 km de routes principales, constituant 6,4 % de l'ensemble du réseau. La densité calculée pour cette catégorie de routes est de 105,9 km/1000 km². Le Danemark dépense 4,2 milliards de couronnes danoises (environ 840 millions de francs) par an pour l'entretien et le développement de ce réseau routier (sans compter les nouvelles traversées des détroits).

Parc automobile

Au 1^{er} janvier 1994, le Danemark comptait 1,95 million de véhicules routiers en circulation, soit 374 pour 1000 habitants. Le nombre de voitures de tourisme s'élève à 1 618 000, soit à 83 % du parc automobile englobant également les autocars et les camions.

Transports ferroviaires

Les dépenses publiques pour le développement des chemins de fer s'élèvent à 1,1 milliard de couronnes (220 millions de francs) par

an et comprennent surtout l'achat de matériel roulant.

Réseau ferré

La longueur du réseau est de 2 881 km (1993) dont 70 % est à voie unique. L'électrification des lignes est en cours, et la longueur électrifiée a doublé en dix ans pour atteindre 11 % du réseau. La densité de ce réseau est de 67 km/1000 km² dont plus de 80 % appartiennent aux DSB (Chemins de fer d'Etat danois), les 20 % restants étant répartis entre treize entreprises publiques locales. Les trains danois parcourent 64 millions de km par année.

Transports maritimes

Les transports maritimes sont un secteur de l'économie danoise en pleine croissance. La flotte danoise compte plus de 2000 bateaux dont 165 ferries et bateaux de voyageurs. Les 614 navires de la marine marchande totalisent 4,87 millions de tonneaux de jauge brute et transportent 27,38 millions de tonnes de marchandises par an.

Importance des détroits

Les principaux détroits sont :

- le Petit-Belt (Lillebaelt) : entre le Jutland et la Fionie
- le Grand-Belt (Storebaelt) : entre la Fionie et le Seeland
- l'Øresund : entre le Seeland danois et la Scanie suédoise
- le Femer-Belt : entre Lolland, au Danemark, et l'île de Fehmarn, en Allemagne.

Les transbordeurs pour véhicules routiers et pour trains jouent un rôle primordial dans les transports internes et internationaux. Entre le Danemark et l'étranger, ferries et navires transportent 36,283 millions de passagers et 4,296 millions de voitures de tourisme par année. En dix ans (1983-1993), le trafic marchandises à travers le Storebaelt a augmenté de 1,4 million de tonnes, tandis que le transport de marchandises par ferries (route et rail) passait de 12,9 millions de tonnes en 1984 à 18,3 millions de tonnes en 1993.

Tableau 4. - Trafic des ferries à travers les détroits

1993	voyageurs		voitures	marchandises	
	nombre	millions de voyageurs-km		tonnes	millions de tonnes-km
ensemble des détroits		2576		27 361 000	1620
trafic interne	20 834 000	568	5 228 000	9 058 000	317
- Storebaelt	10 363 000	237	2 407 000	5 600 000	132
trafic international	36 283 000	2008	4 296 000	18 303 000	1303
- Øresund (DK/S)	16 365 000	219	1 651 000		169
- Femerbaelt (DK/D)	11 606 000	344	1 488 000		168

Mais l'Øresund et le Storebaelt sont aussi des routes maritimes d'importance: pas moins de 26 000 navires ont passé par le premier, 17 400 par le second en 1993.

Ouvrages d'art

Le tableau 5 montre le nombre d'ouvrages d'art que compte le Danemark en fonction de leur ancienneté. Il est peu surprenant de constater la forte augmentation du nombre de ces ouvrages depuis le milieu du siècle, encore plus prononcée en ce qui concerne les ouvrages importants.

Parmi ceux-ci, mentionnons seulement:

- le Storstrømsbrø: ancien pont de trafic mixte route-rail pour la traversée du Storstrømmen entre le Seeland et Falster, ouvert à la circulation en 1937
- le Faroerbrø: nouveau pont autoroutier entre le Seeland et l'île de Falster, inauguré en 1985. L'ouvrage mesure 3,3 km de long et comprend un pont haubané en béton armé dont la travée centrale est de 290 m. La passe de navigation est de 26 m de haut².

² Voir: H.R. MÜLLER: « Paralleldrahtkabel für die Brücke Farø-Falster, Dänemark » in SI+A 103(1985)43: 1053-1057

Depuis les années soixante, les transports connaissent un fort développement et le transbordement par ferries ne peut plus suffire au rythme du trafic moderne, qu'il soit ferroviaire ou autoroutier. D'autre part, les progrès du génie civil autorisent de nouvelles audaces: de vastes projets d'aménagement sont proposés et l'on se lance dans la traversée des détroits - au Danemark comme au Japon et ailleurs - pour assurer une continuité aux réseaux autoroutier et ferroviaire.

Au Danemark, trois grandes traversées de détroits sont actuellement en construction ou à l'étude:

- 1) le Storebaelt qui constitue l'objet de notre article,
- 2) l'Øresund sur lequel nous avons l'intention de revenir ultérieurement,
- 3) le Femerbaelt: une liaison d'environ 20 km avec l'île de Fehmarn en Allemagne est en discussion. L'axe est très sollicité, mais la Suède préférera peut-être une liaison directe avec l'Allemagne.

Le coût des deux premiers projets est estimé à 8 milliards de dollars américains (1995). Au-delà de leur particularités respectives et par souci d'écologie, ces ouvrages, une fois terminés, ne devront pas constituer une gêne pour les courants maritimes.

Storebaelt

Pour traverser le détroit du Storebaelt, ou Grand-Belt (ou encore la Grande-Ceinture), voyageurs et marchandises doivent encore emprunter les ferries croisant un trafic important le long de cette route maritime.

La traversée fixe de ce détroit, à la fois routière et ferroviaire, sur une longueur de 18 km, est un gigantesque projet, de ponts et de tunnels, entre la Fionie et le Seeland, pour relier Copenhague (sur l'île du Seeland) au continent, la Fionie étant déjà reliée à la presqu'île du Jutland par des ponts sur le Lillebaelt. La longueur de cette succession d'ouvrages mesurera plus du double de celle du Bay Bridge de San Francisco (6,8 km, terminé en 1936) et dépassera de plus de la moitié celle du Seto Ohashi, une des trois traversées de la mer intérieure du Japon, qui ne mesure pourtant pas moins de 9,9 km (terminé en 1988).

La succession d'ouvrages donnera passage au trafic autoroutier sur deux voies et une voie d'arrêt d'urgence dans chaque direction et au trafic ferroviaire à double voie. La rampe pour ce dernier est limitée à 16 ‰, et les trains roulant à 160 km/h effectueront la traversée en sept minutes dont trois seulement en tunnel. Par la route, la vitesse étant limitée à 110 km/h sur les autoroutes, la traversée durera une dizaine de minutes. La rampe maximale, ici, est plus élevée, soit 2,11 ‰.

Coûts

Le coût de l'aménagement dans son ensemble est estimé à 27 milliards de couronnes danoises (1995), soit à 5,4 milliards de francs suisses.

Le trafic actuel, encore assuré par ferries, est de 7000 voitures, 12 000 voyageurs par train et 16 000 tonnes de marchandises par jour. Selon les prévisions de trafic, après l'ouverture de la traversée fixe, la partie route devrait être amortie en quatorze ans. Pour ce qui est de la partie rail, elle

Tableau 5. - Nombre des ouvrages d'art (surtout des ponts) à fin 1993

année de construction	avant 1900	1900-1949	1950-1969	1970-1979	1980-1993	total
ponts et tunnels dont ouvrages importants (grands ou spéciaux)	39	208	696	627	434	2004
	-	8	9	20	12	49

Tableau 6. - Trafic journalier à travers le Storebaelt

	1993	1998(*)	2010(*)
voitures	7 600	16 200	18 100
voyageurs par train	11 780	26 000	29 000
marchandises (t) (par rail et route)	15 600	27 600	31 100

(*) prévisions

devrait être remboursée en trente ans par les DSB.

Composantes du projet

La liaison à travers le Storebaelt passe par la petite île de Sprogø au milieu du détroit et fait appel à trois ouvrages: deux ponts et un tunnel. Le Pont de l'Ouest (1) relie Knudshoved sur l'île de Fionie à Sprogø (2) alors qu'entre cette dernière et Halsskov, sur l'île du Seeland, la route et le rail se trouvent séparés: la première passe par le Pont de l'Est (3), le second par le Tunnel de l'Est (4).

1 - Pont de l'Ouest

Long de 6,6 km, le Pont de l'Ouest est le plus long pont à trafic mixte d'Europe. En fait, il s'agit de deux structures parallèles et rapprochées, constituées chacune de six poutres-caissons continus à hauteur variable, en béton. La partie route comporte un tablier large de 24,1 m pour une hauteur de section variant de 3 à 7 m; la partie rail a un tablier de 12,3 m de large, dont la section varie entre 5 et 9 m en hauteur. Les six poutres continues ont huit à neuf travées intermédiaires (en tout 51) mesurant 110 m et deux travées (en tout 12) de 82 m à leurs extrémités. Elles reposent sur un appui fixe à leur milieu et sur des appuis glissants en plaques de téflon sur les autres piles. Les joints de dilatation (pour le pont routier) sont une combinaison d'éléments en acier et en caoutchouc ce qui permet une répartition du mouvement important qui excède le mètre.

Pour des raisons esthétiques, le tracé du pont décrit des arcs de cercle d'un rayon de 20 km dans le plan et de 500 km en élévation. Ainsi, le niveau du tablier est de 10 à 12 m plus bas aux extrémités de l'ouvrage qu'à son milieu, au droit

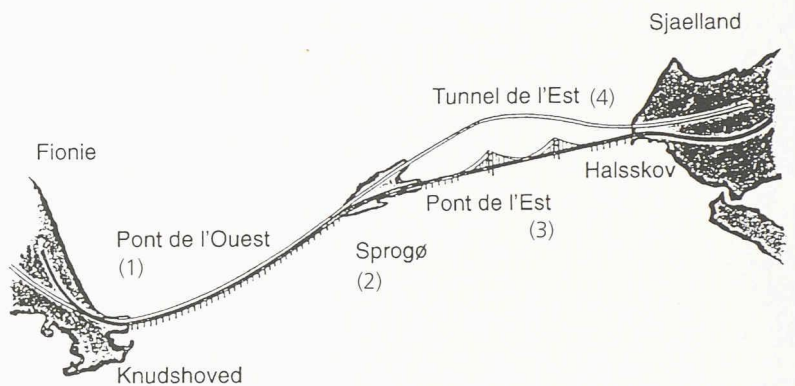


Fig. 2. - Traversée du Storebaelt en deux ponts et un tunnel: situation (Dessin Schwing, Herne et Stetter, Memmingen)

des passes de navigation, hautes de 18 m. Dans le chenal occidental (entre la Fionie et l'île de Sprogø), la navigation commerciale est en effet très réduite alors que la navigation de plaisance est importante.

Les eaux y étant relativement profondes, les piles les plus hautes s'appuient sur un fond à 30 m sous le niveau de la mer. En fait, les deux structures, ferroviaire et routière, reposent sur des piles distinctes qui partagent cependant des caissons de fondation communs, qui sont eux-mêmes posés sur un lit de pierres de 1,50 m d'épaisseur, préparé à l'aide d'une plate-forme spéciale après dragage du site.

Outre les charges permanentes et celles dues au trafic, le dimen-

sionnement du pont devait considérer plusieurs cas de charges spéciaux. Pour évaluer l'impact de la glace, les données concernant l'épaisseur de cette dernière sont disponibles pour les 75 dernières années, alors que pour la température de l'air, les statistiques remontent à 115 ans. Le pont doit également résister à une collision éventuelle avec un navire de 2000 t de port en lourd.

Caissons de fondation, piles et poutres-caissons ont été préfabriqués sur un site gagné sur la mer près de Nyborg, dans des conditions strictement contrôlées. Les poutres longues de 110,4 m ont été assemblées à partir de cinq sections. Les éléments préfabriqués ont été mis en place avec une précision remarquable, à l'aide



Fig. 3. - Pont de l'Ouest: ouvrage à trafic mixte sur 6,6 km (Photo: A/S Storebaeltforbindelsen)

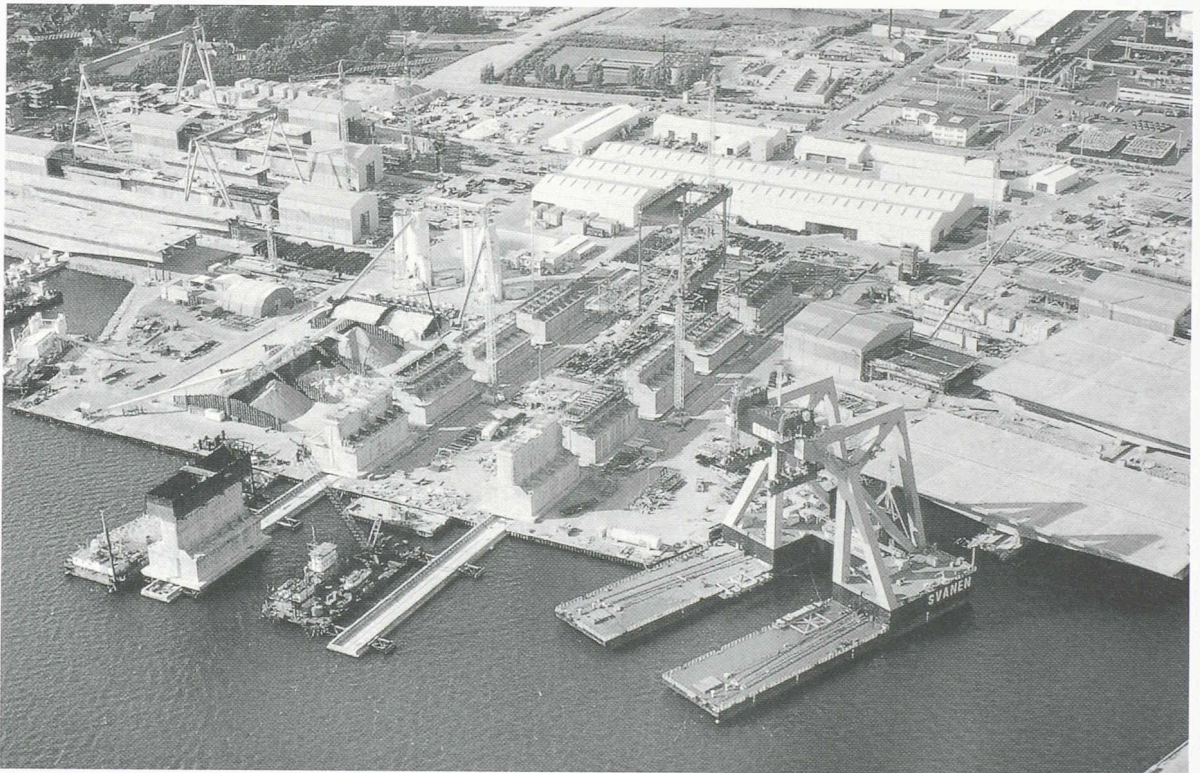


Fig. 4. - Site de préfabrication des éléments du Pont de l'Ouest à Lindholm avec la grue flottante « Svanen » au premier plan
(Photo: AVS Storebaeltsforbindelsen)

d'une grue flottante nommée « Svanen » (cygne). Cet engin, de type catamaran, mesure 94 m de long, 65 m de large et 65 m de haut, il pèse 6700 t et peut soulever 7123 t.

500 000 m³ de béton et 88 000 t d'acier d'armature ont été mis en œuvre.

2 – L'île de Sprogø

Le paisible et idyllique îlot portant un phare au sommet d'une butte a vu sa superficie quadruplée pour devenir une plate-forme de trafic entre les trois ouvrages qui composent la traversée. La rampe du Pont de l'Est s'y élève même jusqu'à une hauteur de 25 m. Pour ces terrassements importants, l'on a utilisé les matériaux dragués dans le chenal de l'Est afin de compenser l'obstacle opposé par les ouvrages d'art aux courants marins. Les différentes fractions de ces matériaux ont été séparées par voie hydraulique et la composition du remblai contrôlée pour assurer sa stabilité.

3 – Pont de l'Est

Ce pont autoroutier mesure 6,8 km de long et est constitué d'une succession d'ouvrages comprenant deux viaducs d'approche et un monumental pont suspendu.

Viaducs d'approche

Les deux ouvrages, longs respectivement de 1,6 et de 2,5 km, comptent en tout vingt-trois travées (193, 147, 144 et 62 m) et dix-neuf piles.



Fig. 5. - L'île de Sprogø

(Photo: AVS Storebaeltsforbindelsen)

Pont suspendu

Le pont suspendu est long de 2,7 km avec une portée centrale de 1624 m et deux portées latérales de 535 m chacune. Une fois achevé, il sera le deuxième plus long pont suspendu (après le pont Akashi Kaikyo au Japon, également en construction, dont la portée libre est de 1990 m).

Les études préliminaires avaient pour but de déterminer la longueur minimale nécessaire de la travée centrale afin que le niveau de sécurité de la navigation ne se trouve pas diminué par l'implantation de l'ouvrage. Des simulations avec la collaboration de pilotes expérimentés, réalisées pour différents types de structures et différentes largeurs envisagées, allant de 900 à 1800 m, ont abouti à la fixation de cette dimension à 1600 m au moins. Par la suite, des expériences effectuées dans une soufflerie construite *ad hoc*, sur un modèle réduit à l'échelle de 1:200, mesurant néanmoins 13,50 m, ont permis d'étudier le comportement au vent du futur ouvrage. Conclusion: le Pont de l'Est pourra résister à des vents soufflant à la vitesse de 260 km/h, soit le double de la vitesse maximale jamais enregistrée sur le Storebaelt.

Pylônes et blocs d'ancrage

Les deux pylônes en béton s'élancent jusqu'à une hauteur de 254 m au-dessus de la mer – soit 26 m de plus que ceux du célèbre Golden Gate Bridge – afin de pouvoir doter les câbles porteurs d'une flèche plus importante que d'habitude (rapport de 1:9 entre flèche et portée au lieu de 1:10 ou même 1:12) tout en ménageant une passe de navigation libre de 65 m de hauteur étant donné l'important trafic entre la mer Baltique et la mer du Nord où passent navires et même plates-formes de forage. Au droit des pylônes, la profondeur de l'eau est de 25 m. La base des pylônes, bétonnée à l'abri de caissons préfabriqués en cale sèche, repose sur



Fig. 6. - Pont de l'Est en construction

(Photo: A/S Storebaeltsforbindelsen)

un lit de pierres et émerge jusqu'à une hauteur de 21 m au-dessus du niveau de la mer. C'est ici que prennent naissance les deux mâts, bétonnés à l'aide de coffrages glissants, qui sont encore reliés à mi-hauteur et au sommet.

Les câbles porteurs sont ancrés dans deux blocs de béton, dont la forme a été étudiée pour leur conférer l'aspect le plus aéré possible: constitués chacun de deux triangles dressés parallèlement sur un socle commun, ils émergent de l'eau jusqu'à 63 m au-dessus du niveau de la mer. Comme pour les pylônes, les caissons ont été préfabriqués en cale sèche puis amenés par voie de mer jusqu'à leur emplacement, où ils ont été posés sur un lit de pierre. La partie supérieure a été coulée sur place.

Environ 40% des infrastructures en béton ont été préfabriquées à Kalundborg, à 70 km du site, puis remorquées et mises en place à l'aide de grues.

Afin d'éviter que les pylônes ne penchent vers le milieu de l'ouvrage après la mise en place du tablier, un hauban provisoire tendu à 900 t entre les pylônes et les blocs d'ancrage leur imprime une contre-flèche de 1,24 m. Les câbles se trouvent ainsi dans une position surélevée par rapport à leur position finale, cette surélé-

vation atteignant 10 m au milieu de l'ouvrage.

Tablier

Le tablier du Pont de l'Est a un profil aérodynamique de 4 m d'épaisseur et est constitué d'une seule poutre-caisson continue en acier soudé. Il est suspendu aux câbles porteurs par des suspentes verticales.

Il est intéressant de mentionner les étapes de préfabrication et d'assemblage du tablier. La fabrication des éléments commence à l'usine à Livourne; d'Italie, ils sont ensuite transportés au Portugal pour y être assemblés en sections, qui sont alors acheminées à Aalborg, au nord du Danemark, où elles sont assemblées pour former des unités plus importantes, de 48 m de longueur. Enfin, mises en place, celles-ci sont soudées pour constituer une poutre continue sur toute la longueur du pont.

Le tablier remplit aussi une fonction de raidisseur. Au centre de la travée, il est solidarisé avec les câbles porteurs. Les mouvements très importants mais lents de dilatation longitudinale, de l'ordre de 1 m, sont absorbés au droit des blocs d'ancrage par des joints, tandis que des mouvements plus rapides, dus au trafic, sont freinés par des amortisseurs hydrauliques placés à cet endroit.

Au droit des pylônes, le tablier, passant entre les deux mâts, ne transmet à ces derniers que des forces latérales horizontales alors que son mouvement longitudinal et vertical demeure libre.

Le tablier des viaducs d'approche est semblable à celui du pont suspendu mais présente une épaisseur de 6,7 m. Il est assemblé à partir d'éléments mesurant 193 m de long, qui correspondent aux portées de l'ouvrage. Au moment de l'assemblage par soudure de deux éléments, le bout libre de l'élément ajouté est provisoirement surélevé de 4 m. Une fois en place, la poutre continue est ainsi précontrainte. Les deux viaducs n'ont de joints de dilatation qu'à leurs extrémités.

Câbles

Les deux câbles porteurs, d'un diamètre de 85 cm, ont une longueur d'environ 3 km. Leur poids est de 3,2 t par mètre. Ils sont composés de 18 648 fils parallèles, répartis en 37 faisceaux comprenant chacun 504 fils de 5,38 mm de diamètre, dont la résistance à la traction est de 3,6 t. L'assemblage des câbles se fait à raison de quatre fils seulement à chaque passage.

Les câbles passent par des selles oscillantes sur les blocs d'ancrage et reposent sur des selles fixes au sommet des pylônes. Ces selles construites en acier, d'un poids de 110 t, devaient donc être hissées à 254 m d'altitude.

Pour la superstructure, 250 000 m³ de béton et 102 000 t d'acier ont été mis en œuvre.

4 - Tunnel de l'Est

Le Tunnel de l'Est est le deuxième plus long ouvrage sous-marin d'Europe après le tunnel sous la Manche (50 km). Il s'agit d'un tunnel ferroviaire à deux tubes comportant chacun une voie. Sa longueur est de 8 km (8024 m) dont 7,4 km sont percés alors que 600 m, aux deux extrémités, ont été réalisés en tranchée, en béton coulé *in situ*, entre les portails du

tunnel et le point de départ des tunneliers.

L'ouvrage traverse des couches d'argile morainique – peu perméables mais aussi peu homogènes – et de marne du paléocène – plus homogènes mais très fissurées –, sans pénétrer dans le calcaire sous-jacent. Passant entre 10 et 40 m seulement sous le fond marin, il est enfoui à 75 m sous le niveau de la mer à son point le plus profond. L'inclinaison maximale est de 15,6‰ et, en plan, le tracé présente une courbe.

Les deux tubes sont distants de 25 m dans leur axe. Les tubes principaux, d'un diamètre intérieur de 7,70 m, sont constitués de 8846 anneaux larges de 1,65 m et composés chacun de sept voussoirs en béton de 40 cm d'épaisseur, boulonnés ensemble. Pas moins de soixante-deux mille voussoirs ont ainsi été préfabriqués à l'usine de Halskov Point.

Trente et une galeries transversales, au diamètre intérieur de 4,50 m, relient les deux tubes principaux à 250 m d'intervalle. Elles doivent permettre l'évacuation des voyageurs en cas d'incident dans un des tubes et abritent certaines installations techniques. Chacune de ces galeries est constituée de vingt-deux anneaux composés de dix-huit segments en fer fonte. Les galeries sont raccordées aux tubes principaux par des « colliers » en béton coulé sur place.

Les tubes ont été percés, à partir de points situés au-dessous du niveau de la mer, par quatre tunneliers de 8,75 m de diamètre et longs de 220 m. Les tunneliers travaillaient sous air comprimé. Pour prévenir la pénétration d'eau et de sols par l'espace compris entre la chemise des tunneliers et les anneaux de voussoirs, celui-ci était colmaté par des brosses et de la graisse injectée dans celles-ci. L'avancement des tunneliers a été facilité par la réduction de la pression de l'eau, réalisée par pompage à l'aide de quelque 45 puits le long du tracé. La jonction des

tubes percés à partir de leurs deux extrémités a été réalisée sous la protection d'un anneau en béton, coulé à l'abri d'une voûte en sol congelé. Le tube de transition, coulé sur place, entre les demi-tubes en anneaux de voussoirs, mesure environ 16 m de long.

Le percement de ce tunnel a été marqué par des accidents. Une soudaine et massive pénétration d'eau de mer dans un des tubes en cours de percement a produit une grave inondation, laquelle a paralysé les travaux et causé un retard de plusieurs mois, sans toutefois faire de victimes. D'autre part, un incendie s'est déclaré dans un des tunneliers.

La nappe phréatique est maintenue, par pompage, en permanence au-dessous des tubes construits en tranchée, de même que sont évacuées les eaux de surface.

Les voussoirs, d'un poids de 7 t ont été fabriqués en usine au rythme de mille par semaine. Leur cage d'armature est soudée à l'automate. Pour résister à la corrosion dans des conditions difficiles durant un siècle au moins, elle est protégée par un traitement de surface. Soumise d'abord à un jet de sable, elle est chauffée à 220°C, puis plongée dans une cuve remplie de poudre d'époxyde fluidifiée par l'injection d'air comprimé. Les particules d'époxyde, fondues sous l'effet de la chaleur au contact avec l'acier, adhèrent à ce dernier et forment une couche protectrice de 200 à 400 microns d'épaisseur. Le béton mis en œuvre est un béton très sec, fortement vibré dans les moules, puis curé à la vapeur et au four. Enfin, les voussoirs sont munis de joints en caoutchouc pour assurer l'étanchéité entre les segments.

Normalement, la ventilation du tunnel est assurée par l'effet de piston des trains mais pour les cas de nécessité, quatre-vingt ventilateurs pouvant fonctionner dans les deux sens, sont installés dans chacun des deux tubes.

Près de 1,8 million de m³ de matériaux ont été excavés, tandis que 205 000 m³ de béton et 19 000 t d'acier d'armature ont été mis en œuvre.

5 – Aménagements complémentaires

L'intégration des ouvrages mentionnés aux réseaux existants aura encore nécessité la réalisation d'aménagements complémentaires, à savoir :

- une station de péage à Halskov;
- 7,3 km d'autoroute avec des

aires de repos et plusieurs ponts;

- 9 km de voie ferrée, avec plusieurs ponts également et
- deux nouvelles gares respectivement à Nyborg (Fionie) et à Korsør (Seeland).

Impact écologique

La sauvegarde de l'environnement a fait l'objet d'une attention particulière. La situation a été soigneusement consignée par des relevés avant le commencement des travaux et les ouvrages devaient être réalisés de telle façon que l'écou-

lement des eaux dans la mer Baltique demeure inchangé après leur achèvement. Pour tenir compte de cette exigence, les projets initiaux – optimisés d'un point de vue économique – ont été modifiés. Le souci de protection de l'environnement est ainsi responsable de 7 à 8 % des coûts.

Calendrier

Les travaux ont commencé en 1988 et l'ouvrage devrait être terminé en 1997 pour la partie ferroviaire et en 1998 pour la traversée routière. Rendez-vous est pris...

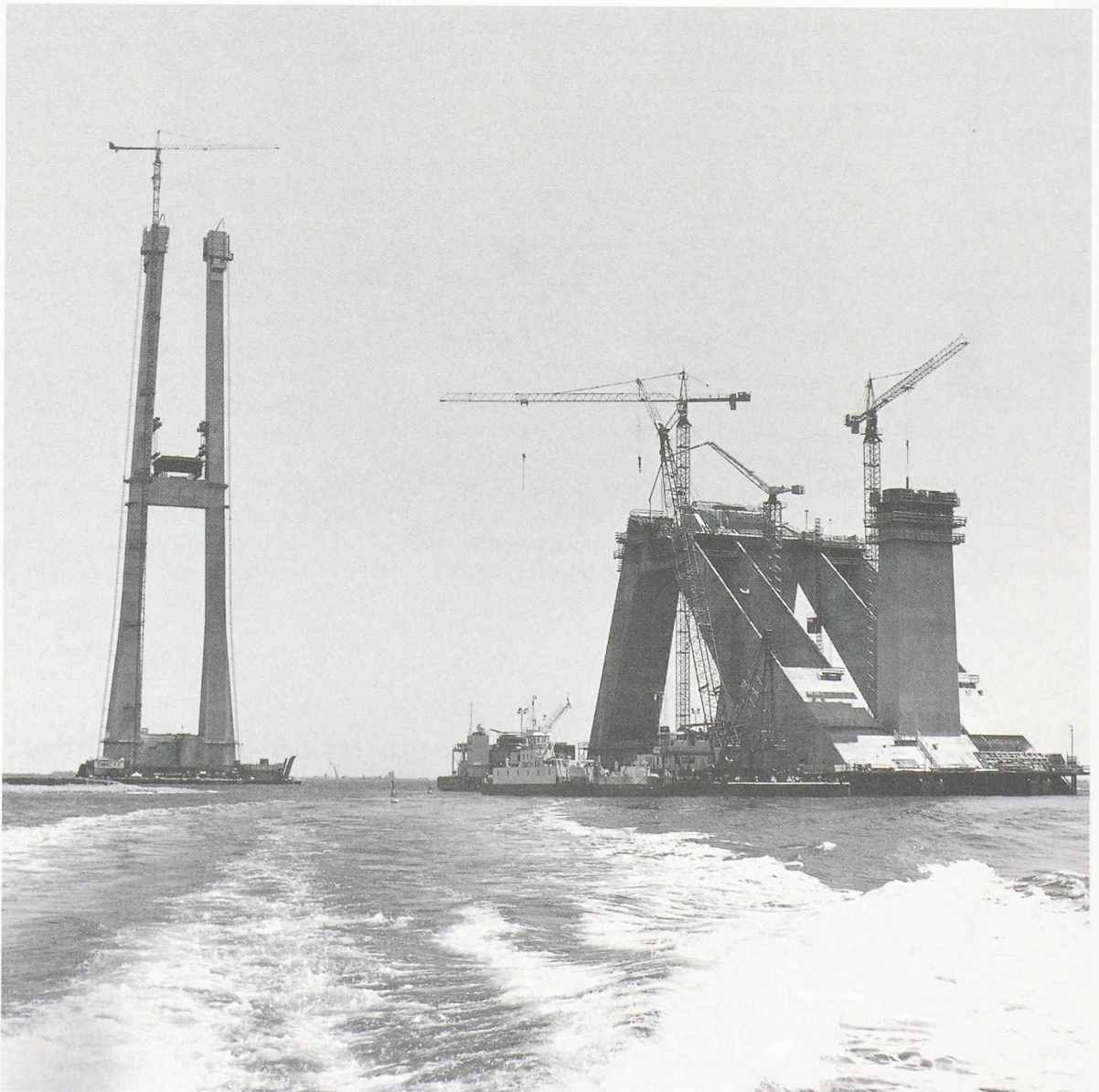


Fig. 7. - Pont de l'Est: pylône et bloc d'ancrage

(Photo Schwing, Herne et Stetter, Memmingen)