

PROTOCOLE 28

Rapport final relatif aux tirants d'air des ponts en liaison avec le transport de conteneurs en trois couches sur le secteur Strasbourg – Bâle (1999-II-22)

Résolution

La Commission Centrale

prend acte du rapport de son Comité technique permanent ci-annexé sur les exigences générales relatives aux tirants d'air des ponts en liaison avec le transport de conteneurs en trois couches sur le secteur Strasbourg – Bâle,

recommande aux délégations de mettre ledit rapport à la disposition des autorités compétentes en tant que base de planification pour la fixation du tirant d'air des nouveaux projets de ponts sur le secteur mentionné.

Annexe au protocole 28

Comité technique permanent

Rapport final

Tirant d'air des ponts en liaison avec le transport de conteneurs en trois couches sur le Rhin supérieur

1. Objet

La CCNR a examiné la question du tirant d'air des ponts en amont de Strasbourg au cours de sa session plénière du printemps 1995 en liaison avec l'adoption des "Exigences minimales et recommandations pour la conception technique des ouvrages sur le Rhin". Certaines délégations ont observé à cette occasion que la hauteur de 7,00 m prévue s'avérait insuffisante pour permettre le transport de conteneurs en trois couches jusqu'à Bâle. La Commission Centrale a pris acte des "Exigences minimales et recommandations" par la résolution 1995-I-29 et en a ainsi approuvé l'application sous réserve que le Comité technique permanent réexamine le tirant d'air minimal requis pour les ponts en amont de Strasbourg.

Le Comité a chargé son Groupe de travail technique permanent d'examiner cette question. Les conclusions de ces travaux sont exposées dans le présent rapport.

2. Procédure et documents de référence

Le Groupe de travail TP/G a appuyé ses travaux sur les documents et études suivants :

- Accord européen sur les Grandes voies Navigables d'importance internationale (AGN) du 19 janvier 1996, doc. TP (00) 3,
- Etude : Hauteur des bateaux-conteneurs sur le Rhin – Pays-Bas, 1996 – Doc. TP/G (98) 4,
- Détermination des hauteurs de chargement des bateaux-conteneurs à l'écluse d'Iffezheim Délégation allemande, 1999 – Doc. TP/G (99) 3,
- Proposition pour une appréciation générale des tirants d'air – Secrétariat, 1999 – Doc. TP/G (99) 6;
- Transport de conteneurs et poids moyen des conteneurs sur le Rhin supérieur – Secrétariat 1998 - Doc. TP/G (98) 6,
- Fonctionnalité des voies de navigation intérieure pour le transport de conteneurs – Association pour la navigation intérieure et les voies d'eau, 1991.

De nombreuses communications des délégations et de la profession internationale de la navigation ont également été prises en compte durant les travaux.

3. Présentation du problème

Pour les ponts situés en amont de Strasbourg (p.k. 295), les "Exigences minimales et recommandations pour la conception technique des ouvrages sur le Rhin" de la Commission Centrale proposent un tirant d'air de 7,00 m par rapport aux plus hautes eaux navigables (PHEN) respectives, ce tirant d'air ne devant pas être inférieur à 7,00 m par rapport à la hauteur d'eau maximale constatée en période de navigation. Toutefois, la hauteur minimale des ponts ne doit pas être inférieure au tirant d'air de ponts déjà construits ou prévus à proximité, afin d'éviter tout obstacle supplémentaire.

L'AGN recommande également un tirant d'air de 7,00 m pour le transport de conteneurs en trois couches, dont 50 % de conteneurs vides.

Les appréciations des experts suisses ainsi que les documents communiqués par la Délégation néerlandaise font apparaître qu'un *tirant d'air de 7,00 m pourrait dans certains cas s'avérer insuffisant pour le transport de conteneurs en trois couches*, d'où la proposition de recommander pour tout nouveau projet de pont un tirant d'air compris entre 7,30 m et 7,80 m. D'autres experts, notamment ceux des délégations française et allemande, estiment toutefois qu'il conviendrait de toujours fixer le tirant d'air *au cas par cas* et en tenant compte de critères *macroéconomiques*.

Compte tenu de l'importance croissante du transport de conteneurs en navigation intérieure et du fait qu'il s'agit, par son potentiel, de l'un des principaux secteurs de la navigation rhénane, il convient d'examiner cette question avec une attention particulière. En effet, un tirant d'air plus important n'impliquera qu'un surcoût relativement réduit, notamment lorsqu'il s'agit de nouvelles constructions, alors qu'il contribuera à long terme au développement du transport de conteneurs sur toutes les voies navigables même si les effets positifs de ces mesures isolées ne sont pas constatés immédiatement.

4. Données de référence

4.1 Dimensions des conteneurs

Les critères déterminants pour l'appréciation du tirant d'air des ponts sont en premier lieu la hauteur des conteneurs, leur longueur et leur poids maximal (pour la détermination de l'enfoncement). La hauteur des conteneurs est comprise entre 8' (2,45 m) à 9 ½' (2,90 m) comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Forme ISO	L (m)	H		Poids max.
20/8'	6,035	2,438 m	8'	20,32 t
20/ 8 ½'	6,035	2,591 m	8 ½'	24,00 t
40 /9 ½'	12,190	2,896 m	9 ½'	30,48 t

Les dimensions les plus fréquentes sont celles des conteneurs 8 ½' (2,59 m), les conteneurs dont la hauteur est supérieure sont dits "conteneurs high-cube" (HC). La hauteur maximale pouvant actuellement être transportée par les modes de transport en concurrence (par exemple dans la plupart des tunnels) est d'environ 2,90 m.

4.2 Etudes menées par la CEE/ONU

Des études de la CEE/ONU (Doc. TRANS/WP.24/R37ad 1) basées sur les travaux effectués en 1982 par un Groupe de travail de l'AIPCN ont permis d'établir que la hauteur totale d'un bateau-conteneurs de 110 m x 11,40 m transportant quatre rangées de conteneurs en trois couches atteint 8,47 m. La hauteur par rapport à l'eau d'un bateau transportant trois couches de conteneurs (h) est fonction du degré de chargement (b) des conteneurs (40') en % suivant la formule :

$$h = 7,550 - 0,0186 \times b \text{ (b en \%)}$$

d'où le tableau suivant :

b (%)	Hauteur par rapport à l'eau h	
	Conteneurs 40'	Conteneurs 20'
0	7,55 m	7,50 m
20	7,18 m	6,90 m
40	6,81 m	6,30 m
50	6,62 m	6,01 m
60	6,39 m	5,70 m

Il est recommandé d'ajouter à ces chiffres une marge de sécurité de 0,30 m. Le Groupe de travail de l'AIPCN avait indiqué à l'époque ne disposer que de peu d'enseignements pratiques susceptibles d'être pris en compte.

4.3 Relevés effectués aux Pays-Bas

En 1996, la hauteur de 135 bateaux faisant route a été relevée aux Pays-Bas sur une période de 16 jours au p.k. 867 (Millingen) ; 89 de ces bateaux transportaient trois couches de conteneurs. Dans ce secteur, la navigation de conteneurs n'est soumise à aucune restriction due au tirant d'air des ponts. L'analyse de ces relevés a permis de déterminer la valeur moyenne suivante pour tous les bateaux transportant trois couches de conteneurs (écart type entre parenthèses) :

montants et avalants 6,72 m (0,58 m)

A cet égard, il est intéressant de faire la distinction entre les bâtiments conçus pour transporter 3 couches de conteneurs au maximum et ceux susceptibles de transporter quatre couches de conteneurs. Avec la possibilité de charger trois couches de conteneurs au maximum, la hauteur est de

6,90 m (0,55)

Avec la possibilité de charger quatre couches de conteneurs au maximum, la hauteur est de

6,61 m (0,57)

L'enfoncement indiqué pour les bateaux faisant route (déjaugage) est d'env. 0,20 m. Les valeurs doivent être majorées en conséquence pour les bateaux stationnés.

4.4 Relevés effectués à l'écluse d'Iffezheim

La hauteur effective de 570 bateaux-conteneurs chargés en triple couche et immobilisés dans le sas de l'écluse d'Iffezheim a été relevée de février à mai 1998 et d'août à novembre 1998 en distinguant navigation montante et avalante ; parallèlement, les conducteurs ont été invités à indiquer quelle est selon eux la hauteur de chargement de leur bateau. Les résultats de ces relevés peuvent être résumés comme suit (écart type entre parenthèses)

Hauteur de chargement (relevée)	Montants	6,87 m (0,37 m)
	Avalants	6,83 m (0,32 m)
Hauteur de chargement (indiquée)	Montants	6,95 m (0,47 m)
	Avalants	7,06 m (0,33 m)

4.5 Poids moyen des conteneurs

Les relevés effectués aux Pays-Bas ont également permis de déterminer un poids moyen pour tous les conteneurs, conteneurs vides inclus, de 9,6 t par EVP. Pour les conteneurs chargés, ce poids était de 10,7 t par EVP en navigation montante et de 13,4 t par EVP en navigation avalante.

Pour le secteur du Rhin supérieur, le poids moyen de tous les conteneurs a été déterminé sur la base des statistiques relatives au trafic à l'écluse d'Iffezheim de la Direction de l'eau et de la navigation sud-ouest. Les résultats obtenus sont les suivants (écart type entre parenthèses) :

	1996	1997	1998
Montants	12,4 (0,70)	10,6 (0,86)	10,9 (0,75)
Avalants	13,5 (0,96)	15,2 (0,54)	14,9 (0,63)

Sur la base des mêmes statistiques, le poids moyen des chargements de conteneurs en tonnes-marchandises relevé pour chaque bateau à l'écluse d'Iffezheim est le suivant :

	1996	1997	1998
Montants	761	751	746
Avalants	841	911	991

4.6 Hauteur des chargements de conteneurs

La hauteur du conteneur standard ISO est de 8 ½' (2,591 m). Toutefois, le nombre des conteneurs "High-cube" (HC) transportés tend à augmenter ; la hauteur des conteneurs HC est de 9 ½' (2,896 m). Ceci peut augmenter encore la hauteur de chargement (au maximum d'env. 3 x 0,305 m = 0,915 m) pour trois couches). Aux Pays-Bas, la part des conteneurs HC était d'environ 7 % en 1996.

La hauteur de chargement des bateaux dont la troisième couche de conteneurs est incomplète est plus élevée. Ainsi, dans le cas extrême d'un bateau transportant deux couches de conteneurs remplis à 50 % et un seul conteneur supplémentaire en troisième couche la hauteur atteint 7,03 m. Toutefois, de tels cas particuliers ne peuvent être pris en compte pour des raisons économiques lorsqu'il s'agit de fixer le tirant d'air des ponts.

4.7 Tirant d'air disponible.

Le tirant d'air des ponts sur le Rhin supérieur en amont de Strasbourg a été communiqué par les délégations française et allemande pour 8 ponts dans le secteur des écluses et 6 autres ponts routiers et ferroviaires. Il ressort du tableau ci-dessous que le tirant d'air dépend du débit et qu'il peut varier dans la fourchette de valeurs indiquée.

Pont	- p.k. ...	Tirant d'air en m pour			
		Retenue hydrostatique	1000 m ³ /s	2100 m ³ /s	PHEN
		Tirant d'air supérieur disponible durant (en moyenne)			
		*)	50 % de l'année	97 % de l'année	99 % de l'année
Pont de Palmrain Weil	171,33	7,25 *)	7,30 *)	7,35 *)	7,40 *)
Ecluses de Kembs	179,28	8,54	7,93	--	7,48
Ecluses d'Ottmarsheim	193,83	8,47	7,88	--	7,48
Pont A 36 Ottmarsheim	194,30	--	--	--	7,83
Pont Chalampé	199,26	7,81	7,46	--	7,06
Ecluses de Fessenheim	210,69	8,55	8,10	--	7,56
Ecluses de Vogelgrün	224,73	8,85	8,50	--	8,00
Ecluses de Marckolsheim	240,06	9,30	9,13	8,24	7,70
Ecluses de Rhinau	256,33	8,80	8,54	8,20	7,67
Ecluses de Gerstheim	272,42	9,23	9,08	8,21	7,50
Pont Altenheim-Eschau	282,80	7,30 **)	7,28 **)	**)	7,25 **)
Ecluse de Strasbourg	287,55	10,62	9,72	8,57	7,70
Pont de l'Europe	293,48	9,07	8,47	7,87	6,79
Pont ferroviaire	293,69	8,95	8,55	7,85	6,75

*) Les données annuelles indiquées ne s'appliquent pas pour le tirant d'air des ponts étant donné que celui-ci dépend du débit au barrage de Märkt. L'arête inférieure du pont est arquée et offre un tirant d'air d'environ 7,80 m sur une largeur de 80 mètres.

***) L'arête inférieure du pont est arquée et offre un tirant d'air d'environ 7,80 m sur une largeur de 100 mètres.

5. Appréciation des données de référence pour la détermination d'un tirant d'air acceptable

En vue de la détermination d'un tirant d'air acceptable, l'appréciation des données relevées peut être faite suivant des principes stochastiques qui, sur la base d'une répartition donnée des probabilités applicables à la hauteur du bateau, à la hauteur d'eau et à la vitesse, permettent de déterminer le degré de probabilité avec lequel un bateau transportant des conteneurs rencontrera des difficultés lors du passage sous un pont dans ces conditions et quelle devra être la marge de sécurité à prévoir. Cette méthode est détaillée dans l'annexe B.

6. Conséquences et conclusions

6.1 Général

L'étude menée ainsi que l'examen des résultats font apparaître qu'un tirant d'air de 7,00 m est en règle générale insuffisant pour permettre le transport de conteneurs en trois couches, notamment compte tenu du développement important généralement annoncé pour la navigation-conteneurs. Le tirant d'air minimum nécessaire sur le terrain, à savoir

$$7,00 + x \text{ m}$$

varie toutefois en fonction du contexte et doit être rapporté au cas examiné. La valeur "x" peut uniquement être déterminée en cas le besoin, sur la base des paramètres suivants :

- enfoncement,
 - degré de chargement,
 - marge de sécurité (= le cas échéant sur la base du degré de probabilité),
 - nature du pont et type de construction,
- en veillant à éviter pour toutes les situations envisageables l'apparition d'un nouvel obstacle.

6.2 Secteur du Rhin supérieur Strasbourg - Bâle

Sur le Rhin supérieur, les hauteurs d'eau varient en fonction du débit. Les hauteurs minimales indiquées en période de PHEN étant constatées durant seulement env. 3 jours par an, celles-ci ne constituent pas une entrave. Un tirant d'air de 7,46 m est également assuré durant près de la moitié de l'année au pont de Chalampé. Lors de la planification de nouveaux ponts ainsi que lors de transformations, il conviendrait néanmoins de fixer de manière spécifique le tirant d'air nécessaire en tenant compte du transport de conteneurs en trois couches ainsi que de l'ensemble des débits jusqu'à la marque de crue II.

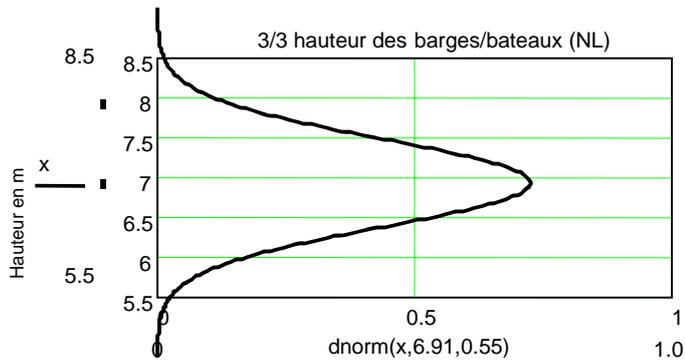
Annexes au rapport

A Répartition de la hauteur des bateaux

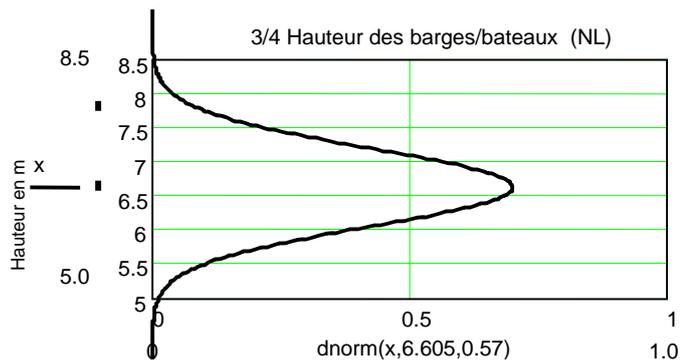
La hauteur relevée des bateaux transportant trois couches de conteneurs fait apparaître la répartition normale suivante :

Relevés effectués à Millingen

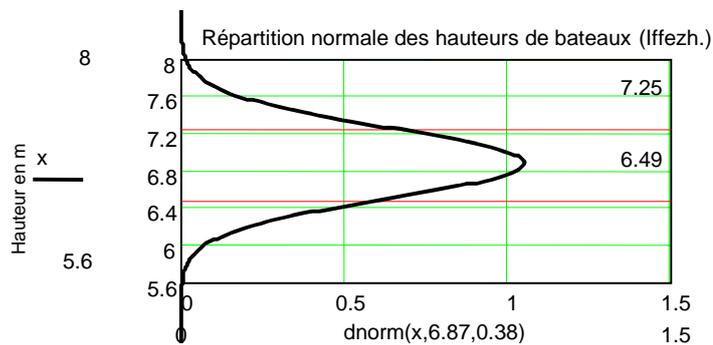
a) bateaux pouvant transporter trois couches de conteneurs au maximum :



b) bateaux pouvant transporter quatre couches de conteneurs au maximum :



Relevés effectués à Iffezheim :



B. Appréciation des données de référence pour la détermination d'un tirant d'air acceptable

1. Procédure

Le tirant d'air d'un pont peut être déterminé au moyen des paramètres suivants

- H_L - hauteur de chargement du bateau-conteneurs mesurée à l'arrêt
- q - Enfoncement du bateau au cours du voyage (déjaugage)
- S - Marge de sécurité retenue
- H_P - Tirant d'air disponible.

Le rapport suivant est applicable :

$$H_P = H_L - q + S$$

Le rapport peut être déterminé par addition ou soustraction de paramètres isolés. Toutefois, de nombreuses valeurs concernant ces paramètres ne sont pas fixes mais varient de manière naturelle et aléatoire ou ne peuvent être déterminées avec exactitude. Ces effets être pris en compte par des ajouts forfaitaires aux valeurs relevées. Des indications plus précises sont possibles lorsque, parallèlement aux valeurs moyennes, les écarts type correspondants sont également connus, permettant de fournir des données statistiques de probabilité.

Les paramètres suivent une règle d'erreur qui peut être approchée par une répartition normale. Les paramètres approchent une valeur moyenne, la dispersion étant représentée par la courbe en cloche dite "courbe de Gauss" et le degré de dispersion étant caractérisé par l'indication de l'écart type. A titre d'exemple, pour un bateau d'une hauteur de 6,50 m et un degré de précision de l'information exprimé par un écart type de 0,30 m, la hauteur réelle est la suivante :

- 6,20 m à 6,80 m : avec une probabilité de 68,26 %
- 5,90 m à 7,10 m : avec une probabilité de 95,44 %.

Le critère déterminant est la probabilité / fréquence d'une occurrence

Ceci permet d'éviter de prendre en compte des valeurs extrêmes dont le niveau de probabilité est faible, c'est-à-dire qui seront très rarement constatées et qui impliqueraient des exigences injustifiables sur le plan macroéconomique.

Si les écarts type des valeurs des différents paramètres sont connus et si on considère que la dispersion de ces valeurs respecte le principe de la répartition normale, l'écart type total peut être déterminé suivant la loi dite de "propagation des erreurs" de la statistique.

Le tirant d'air effectif des ponts est connu pour le secteur Strasbourg – Bâle, Cf. point 4.6.

Pour le critère concernant le tirant d'air du pont, ces données permettent de déterminer une marge de sécurité S

$$S = H_P - H_L + q$$

En tenant compte de l'écart type, on calcule la probabilité avec laquelle un tirant d'air donné offre une marge de sécurité, c'est-à-dire que la valeur S est supérieure à 0 :

$$\Phi (S > 0)$$

2. Appréciation des données de référence

Cette appréciation est basée sur le tirant d'air le plus faible du pont de Chalampé.

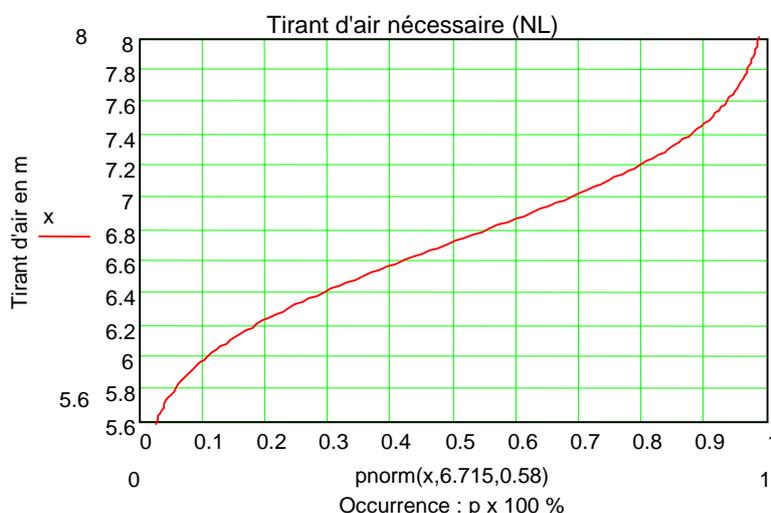
Relevés aux Pays-Bas :

- a) en période de PHEN (env. 3 jours)
 $H_L + q = 6,72$ m avec $s = 0,58$ m et $S = 0,44$ m
 $\Phi (0,44/0,58) = 77,3$ %

Ainsi, la probabilité de disposer en période de PHEN d'un tirant d'air sur le Rhin supérieur, au pont de Chalampé, qui soit suffisant pour permettre le passage d'un bateau-conteneurs à trois couches sera de 77,3 %. Tableau général pour

- a - les résultats de l'ensemble des relevés
- b- les résultats des relevés concernant les bateaux pouvant transporter trois couches de conteneurs au maximum (3/3)
- c- les résultats des relevés concernant les bateaux pouvant transporter quatre couches de conteneurs au maximum (3/4)

Tirant d'air du pont en m	Probabilité d'une hauteur suffisante		
	toutes valeurs	b-3/3	c-3/4
6,8	55,8 %	42,1 %	63,4 %
7,0	70,0 %	56,5 %	76,6 %
7,2	79,8 %	70,1 %	85,2 %
7,4	88,1 %	81,4 %	91,8 %
7,6	93,6 %	89,5 %	96,0 %



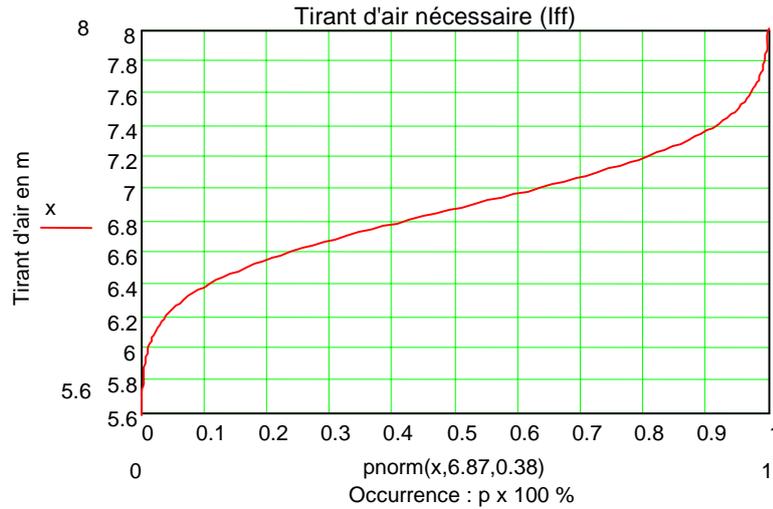
Relevés à l'écluse d'Iffezheim

L'enfoncement du bateau (déjaugage) en fonction de sa vitesse et de la hauteur d'eau disponible est estimé aussi pour le Rhin supérieur à :
 $q = 0,20$ m pour un écart type de $S_q = 0,05$ m

- a) en période de PHEN (env. 3 jours)
 Navigation montante $H_L = 6,87$ m, $s_{HL} = 0,37$ m ; $\Sigma s = 0,38$ m ; $S = 0,49$ m
 $\Phi (0,49/0,38) = 90,15$ %

Ainsi, la probabilité de disposer en période de PHEN d'un tirant d'air sur le Rhin supérieur, au pont de Chalampé, qui soit suffisant pour permettre le passage d'un bateau-conteneurs à trois couches sera de 90,2 %. Tableau général

Tirant d'air	Probabilité d'une hauteur suffisante
7,0	63,4 %
7,2	80,7 %
7,4	91,9 %
7,6	97,3 %



- b) pour un débit de $1100 \text{ m}^3/\text{sec}$ (env. 185 jours)
 Navigation montante $H_L = 6,87\text{m}$, $s_{HL} = 0,37 \text{ m}$; $\Sigma s = 0,38\text{m}$; $S = 0,79\text{m}$
 $\Phi(0,79/0,38) = 98,5 \%$

Ainsi, la probabilité de disposer durant env. 185 jours d'un tirant d'air au pont de Chalampé qui soit suffisant pour permettre le passage d'un bateau-conteneurs à trois couches sera de 98,5 %.

Calcul des hauteurs des bateaux

L'étude néerlandaise propose une méthode de calcul permettant de déterminer la hauteur des bateaux. Celle-ci permet d'effectuer un calcul pour chaque bateau lorsque toutes les données nécessaires sont disponibles. Elle permet aussi de tirer des conclusions générales basées sur des valeurs moyennes et peut fournir des indications plus détaillées lorsque, outre les valeurs moyennes, les écarts-types sont également connus, permettant de déterminer des occurrences statistiques.

Selon cette méthode, pour un bateau-type (longueur 94,7 m ; largeur 11,4 m ; tirant d'eau 2,8 m) faisant route vers Bâle avec trois couches de conteneurs et une cargaison moyenne en 1997 de 751 tonnes (moyenne défavorable) avec un écart-type de 102,08 t, l'enfoncement lié à la cargaison est de 0,82 m (0,11 m) pour un enfoncement total de 1,62 m, soit une hauteur totale du bateau de 6,62 m (0,11 m). Ces données ne prennent pas en compte le déjaugage.
