

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 110 (1984)

Heft: 3

Artikel: Quelques aspects pratiques du calcul probabiliste en géotechnique

Autor: Oboni, Franco / Martinenghi, Tullio

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-75270>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Quelques aspects pratiques du calcul probabiliste en géotechnique

par Franco Oboni et Tullio Martinenghi, Lausanne

Etant donné l'intérêt grandissant suscité par l'application des méthodes probabilistes en géotechnique, et le malaise qu'on peut ressentir vis-à-vis d'une approche nouvelle, il paraît important de montrer, à partir d'exemples simples, les avantages de ces méthodes. Le texte traite le cas d'un talus triangulaire glissant sur un plan; l'effet de la dispersion des paramètres de résistance c et φ et de leur corrélation ρ est montré. Un abaque permettant de comparer les résultats du calcul déterministe (F_s) et probabiliste (pf) est fourni.

1. Les méthodes probabilistes

Les principales sources d'incertitude intervenant dans le choix et le dimensionnement des ouvrages relevant de la géotechnique sont dues:

- aux actions transmises par les structures (charges)
- à la résistance du sol (insuffisance des reconnaissances, imprécision des mesures, hétérogénéité, anisotropie...), et aux conditions hydrauliques.

Les méthodes probabilistes sont les seules à permettre de prendre en compte ces incertitudes et peuvent être classifiées en deux familles:

- les méthodes hybrides ou semi-probabilistes
- les méthodes purement probabilistes.

A la première appartiennent les méthodes classiques de la mécanique des sols, rendues probabilistes [1], [5]¹. Dans ces méthodes, après avoir introduit les paramètres de résistance mécanique des sols comme variables aléatoires, on cherche à définir la distribution du facteur de sécurité F_s et on définit la probabilité de rupture, pf , comme la probabilité pour que $F_s \leq 1$ (fig. 1).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Une solution alternative [4], [8] consiste à définir pf comme la probabilité que les efforts ou sollicitations D dépassent les résistances C (fig. 2).

La deuxième famille regroupe les méthodes faisant intervenir le concept probabiliste au niveau de la mécanique [3], [6].

Dans les paragraphes qui suivent seront traités des exemples relatifs à la première famille qui, du point de vue pratique, présentent l'avantage de permettre l'utilisation des méthodes traditionnelles de l'ingénieur.

2. Prise en compte des incertitudes

Pour éviter de compliquer inutilement les calculs, il est intéressant de sélectionner

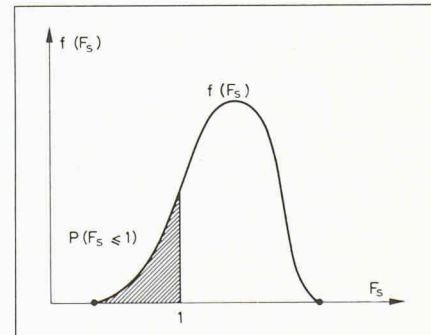


Fig. 1. — Calcul de la probabilité de rupture. $pf = p [F_s \leq 1]$ (1)

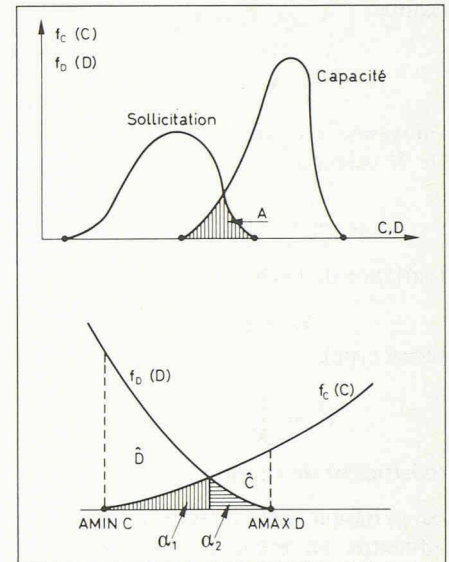


Fig. 2. — Modèle résistance-sollicitation (Capacity-Demand model)

$$pf = p [C \leq D] \tag{2}$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 \leq pf \leq \alpha_1 + \alpha_2 \tag{3}$$

pour C et D indépendants

$$pf = \int_{-\infty}^{+\infty} F_C(C) f_D(D) dD \tag{4}$$

Freudenthal, Garrelts, Shinozuka, 1966.

ner les paramètres présentant les plus grosses incertitudes. Il est habituel, dans ce but, de négliger la variabilité des efforts transmis par les structures (p. ex. les réactions d'appui). On considère donc uniquement les paramètres géotechniques comme:

- la résistance à la compression simple q_u ,
- la cohésion c ,
- le frottement φ ,
- le poids volumique apparent γ et
- la position de la nappe phréatique.

Des études statistiques menées sur des massifs de sols considérés comme homogènes, permettent d'éliminer γ , vu sa faible variabilité.

Dans le tableau 1 sont indiqués, pour quelques matériaux et selon différents auteurs, les coefficients de variation $V\%$ des paramètres mécaniques.

TABLEAU 1: Variabilité des caractéristiques géotechniques pour différents sols

Matériaux	Poids volumique apparent $V\gamma$	Angle de frottement interne $V\varphi$	Cohésion Vc	Résistance à la compression simple Vq_u	Sources
Sable lâche Sable dense Sable graveleux Gravier		14% 18% 5,3% 6%			Singh (1972) Singh (1972) Schultze (1972) Harr (1977)
Argile plasticité faible Argile plasticité moyenne Argile plasticité élevée	1,9% 6,8% 2,5%			37 = 51% 30 = 40%	Hammitt (1966) Hammitt (1966) Hammitt (1966) Lumb (1972) Ladd et al. (1972)
Argile limoneuse molle naturellement consolidée	1,8%	13,6%	114%	57,3%	Recordon (1977)
Argile limoneuse et graveleuse compacte (moraine de fond)	3,1%	13%	77%		Recordon (1977)

Rappel:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i \quad (5)$$

(moyenne ou espérance mathématique de N valeurs).

$$S_x^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

(variance de l'échantillon de taille N).

$$S_x = \sqrt{S_x^2} \quad (7)$$

(écart type).

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (8)$$

(coefficient de variation).

En se basant sur la littérature, on pourra admettre, en première approximation, $V_\varphi = 10\%$ et $V_c = 50\%$ pour évaluer les performances d'une structure au stade d'avant-projet.

Le calcul probabiliste peut donc être appliqué même si une analyse statistique des caractéristiques du massif n'est pas économiquement possible.

3. Application aux calculs de stabilité d'un massif homogène limité par un plan de glissement

Cet exemple d'application, volontairement simple (fig. 3), se prête bien à montrer l'influence des incertitudes sur les différents paramètres de la stabilité.

Données géométriques:

$$H [m], \alpha, \beta [^\circ]$$

Données géotechniques:

$$c [kN \cdot m^{-2}], V_c [\%]$$

$$\varphi [^\circ], V_\varphi [\%]$$

$$\gamma [kN \cdot m^{-3}]$$

Données hydrauliques:
pas de nappe phréatique.

3.1 Calcul déterministe

$$F_s = \frac{c \cdot L}{W \cdot \sin \alpha} + \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \alpha} \quad (9)$$

avec:

$$W = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \left(\frac{1}{\text{tg} \alpha} - \frac{1}{\text{tg} \beta} \right) \quad (10)$$

$$L = \frac{H}{\sin \alpha} \quad (11)$$

en posant:

$$a = \frac{L}{W \cdot \sin \alpha} \quad (12)$$

$$b = \frac{1}{\text{tg} \alpha} \quad (13)$$

$$p = \text{tg} \varphi \quad (14)$$

on trouve:

$$F_s = a \cdot c + b \cdot p \quad (15)$$

3.2 Calcul probabiliste

Les variables aléatoires sont:

c et $p = \text{tg} \varphi$.

Dans le cas d'une relation du type

$$y = \alpha_1 \cdot x_1 + \alpha_2 \cdot x_2 \quad (16)$$

on trouve:

$$\bar{y} = \alpha_1 \cdot \bar{x}_1 + \alpha_2 \cdot \bar{x}_2 \quad (17)$$

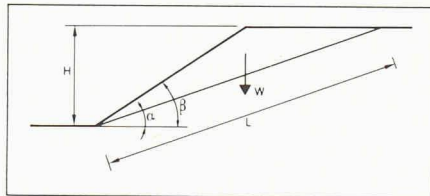


Fig. 3. — Géométrie de l'exemple.

et

$$S_y^2 = \alpha_1^2 \cdot S_{x_1}^2 + \alpha_2^2 \cdot S_{x_2}^2 + 2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \rho_{x_1, x_2} \cdot S_{x_1} \cdot S_{x_2} \quad (18)$$

où

ρ_{x_1, x_2} = corrélation entre x_1, x_2

en appliquant (17) on trouve

$$\bar{F}_s = a \cdot \bar{c} + b \cdot \bar{p} \quad (19)$$

$$S_{F_s}^2 = a^2 \cdot S_c^2 + b^2 \cdot S_p^2 + 2 \cdot a \cdot b \cdot \rho_{cp} \cdot S_c \cdot S_p \quad (20)$$

$$S_{F_s} = \sqrt{S_{F_s}^2} \quad (21)$$

En connaissant la moyenne et l'écart type du facteur de sécurité F_s , et en admettant qu'il suive une distribution normale (ou de Gauss), on peut calculer $pf = p [F_s \leq 1]$ à l'aide du tableau 2 (tiré de Harr, 1977). L'hypothèse concernant la distribution de F_s n'est acceptable que si

$$\bar{F}_s - 3 \cdot S_{F_s} > 0 \quad (22)$$

Dans tous les autres cas l'utilisation d'une distribution empirique (p. ex. Bêta [4]) est recommandée.

3.3 Application numérique sans corrélation

Données:

$$H = 5 \text{ m}$$

$$\alpha = 21,8^\circ (2/5)$$

$$\beta = 33,7^\circ (2/3)$$

$$\gamma = 20,0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\bar{\varphi} = 15^\circ, V_\varphi = 10\%$$

$$\bar{p} = \text{tg} \varphi = 0,268$$

$$\bar{c} = 5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}, V_c = 50\%, \rho_{cp} = 0$$

Calculs:

$$L = 13,46 \text{ m}$$

$$W = 250 \text{ kN}$$

$$a = 0,144$$

$$b = 2,5$$

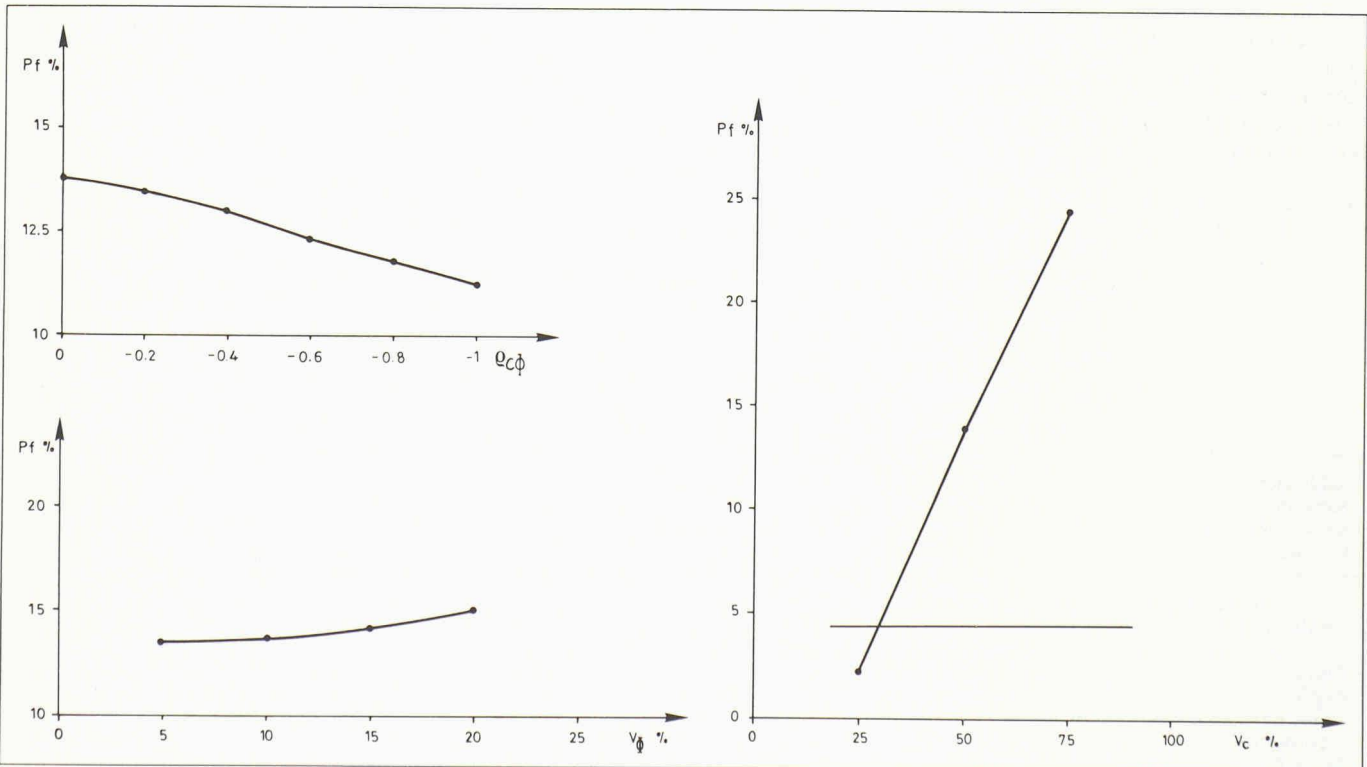
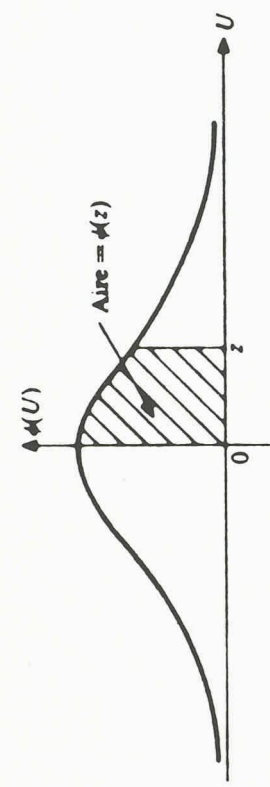


Fig. 4. — Variation de pf en fonction de la corrélation ρ entre c et φ ; (a), en fonction de $V_c\%$ (b) et en fonction de $V_\varphi\%$ (c).

TABLEAU 2: Table d'intégrales de la distribution normale



z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	003 969	1007 978	011 966	015 953	019 939	023 922	027 903	031 881	035 856
.1	039 828	043 795	047 758	051 717	055 670	059 618	063 559	067 495	071 424	075 345
.2	079 260	083 166	087 064	090 954	094 835	098 706	102 568	106 420	110 251	114 092
.3	117 911	121 720	125 516	129 300	133 072	136 831	140 576	144 309	148 027	151 732
.4	155 422	159 097	162 757	166 402	170 031	173 645	177 242	180 822	184 386	187 933
.5	191 462	194 974	198 466	201 944	205 401	208 840	212 260	215 661	219 043	222 405
.6	225 747	229 069	232 371	235 653	234 914	242 154	245 373	248 571	251 748	254 903
.7	258 036	261 148	264 238	257 305	270 350	273 373	276 373	279 350	282 305	285 236
.8	288 145	291 030	293 892	296 731	299 546	302 337	305 105	307 850	310 570	313 267
.9	315 940	318 589	321 214	323 814	326 391	328 944	331 472	333 977	336 457	338 913
1.0	341 345	343 752	346 136	348 495	350 830	353 141	355 428	357 690	359 929	362 143
1.1	364 334	366 500	368 643	370 762	372 857	374 928	376 976	379 000	381 000	382 977
1.2	384 930	386 861	388 768	390 651	392 512	394 350	396 165	397 958	399 727	401 475
1.3	403 200	404 902	406 582	408 241	409 877	411 492	413 085	414 657	416 207	417 736
1.4	419 243	420 730	422 196	423 641	425 066	426 471	427 855	429 219	430 563	431 888
1.5	433 193	434 476	435 745	436 992	438 220	439 429	440 620	441 792	442 947	444 083
1.6	445 201	446 301	447 384	448 449	449 497	450 529	451 543	452 540	453 521	454 486
1.7	455 435	456 367	457 284	458 185	459 070	459 941	460 796	461 636	462 462	463 273
1.8	464 070	464 852	465 620	466 375	467 116	467 843	468 557	469 258	469 946	470 621
1.9	471 283	471 933	472 571	473 197	473 810	474 412	475 002	475 581	476 148	476 705
2.0	477 250	477 784	478 308	478 822	479 325	479 818	480 301	480 774	481 237	481 691
2.1	482 136	482 571	482 997	483 414	483 823	484 222	484 614	484 997	485 371	485 738
2.2	486 097	486 447	486 791	487 126	487 455	487 776	488 089	488 396	488 696	488 989
2.3	489 276	489 556	489 830	490 097	490 358	490 613	490 863	491 106	491 344	491 576
2.4	491 802	492 024	492 240	492 451	492 656	492 857	493 053	493 244	493 431	493 613
2.5	493 790	493 963	494 132	494 297	494 457	494 614	494 766	494 915	495 060	495 201
2.6	495 339	495 473	495 604	495 731	495 855	495 975	496 093	496 207	496 319	496 427
2.7	496 533	496 636	496 736	496 833	496 928	497 020	497 110	497 197	497 282	497 365
2.8	497 445	497 523	497 599	497 673	497 744	497 814	497 882	497 948	498 012	498 074
2.9	498 134	498 193	498 250	498 305	498 359	498 411	498 462	498 511	498 559	498 605
3.0	498 650	498 694	498 736	498 777	498 817	498 856	498 893	498 930	498 965	498 999
3.1	499 032	499 065	499 096	499 126	499 155	499 184	499 211	499 238	499 264	499 289
3.2	499 313	499 336	499 359	499 381	499 402	499 423	499 443	499 462	499 481	499 499
3.3	499 517	499 534	499 550	499 566	499 581	499 596	499 610	499 624	499 638	499 651
3.4	499 663	499 675	499 687	499 698	499 709	499 720	499 730	499 740	499 749	499 758
3.5	499 767	499 776	499 784	499 792	499 800	499 807	499 815	499 822	499 828	499 835
3.6	499 841	499 847	499 853	499 858	499 864	499 869	499 874	499 879	499 883	499 888
3.7	499 892	499 896	499 900	499 904	499 908	499 912	499 915	499 918	499 922	499 925
3.8	499 928	499 931	499 933	499 936	499 938	499 941	499 943	499 946	499 948	499 950
3.9	499 952	499 954	499 956	499 958	499 959	499 961	499 963	499 964	499 966	499 967

donc:

$$\begin{aligned} \bar{F}_S &= 0,144 \cdot 5 + 2,5 \cdot 0,268 = 1,39 \\ S_{F_S}^2 &= 0,128 \\ S_{F_S} &= 0,358 \end{aligned}$$

en utilisant le tableau 2:

$$z = \frac{\bar{F}_S - 1}{S_{F_S}} = \frac{1,39 - 1}{0,358} \cong 1,09$$

$$\psi_{(z)} \cong 0,362$$

$$pf = 0,5 - 0,362 = 0,138$$

$$pf\% = 13,8\%$$

3.4 Etude paramétrique

En utilisant les données de base de l'exemple précédent, il est possible d'étudier la variation de *pf* en fonction de la corrélation $\rho(c\varphi)$ (fig. 4a) et des dispersions sur la cohésion (fig. 4b) et le frottement (fig. 4c). L'influence de chaque paramètre est étudiée en gardant les deux autres constants, ainsi:

4a: $\rho(c\varphi)$ varie $V_c = 50\%$ $V_{\varphi} = 10\%$

4b: $\rho(c\varphi) = 0$ V_c varie $V_{\varphi} = 10\%$

4c: $\rho(c\varphi) = 0$ $V_c = 50\%$ V_{φ} varie

4. Construction d'un abaque F_S - pf

Pour des cas simples comme celui présenté au paragraphe précédent il est

possible de compiler des abaques utiles pour le dimensionnement (fig. 5). L'intérêt de ce type d'abaque réside en outre dans le fait de permettre une comparaison aisée entre un indicateur de sécurité classique, F_S , et un nouveau, beaucoup plus sensible, la probabilité de rupture *pf*.

5. Conclusions

Après une brève présentation des méthodes probabilistes et des incertitudes intervenant dans les calculs géotechniques, une application au calcul de stabilité d'un massif homogène, limité par un

Bibliographie

- [1] ALONSO, E. E., *Risk analysis of slopes and its application to slopes in canadian sensitive clays*. Géotechnique 26, n° 3, 453-472, 1976.
- [2] BOURDEAU, P. L., RECORDON, E., *Dimensionnement des chaussées souples*. Séminaire sur les méthodes probabilistes en géotechnique, EPFL-Ecublens, 1983.
- [3] CHOWDHURY, R. N., ATHANASIOU-GRIVAS, D., *Probabilistic model of progressive failure of slopes*. J. of Geotechnical Eng. Div. ASCE, Vol. 108, n° GT6, pp. 803-819, June, 1982.
- [4] HARR, M. E., *Mécanique des milieux formés de particules*. Presses polytechniques romandes, 1977.
- [5] LOCHER, H. G., *Probabilistische Methoden bei Stabilitätsproblemen in der Geotechnik*, Schweizer Ing. und Architektur, n° 16, 429-434, 1983.
- [6] OBONI, F., BOURDEAU, P. L., *Determination of the critical slip surface in stability problems*. Proc. ICASP-4, Vol. 2, Florence, Italy, 1983.
- [7] RECORDON, E., DESPOND, J. M., *Dispersion des caractéristiques des sols considérés comme homogènes*. IX ICSMFE, Session spéciale n° 6, Tokyo, 1977.
- [8] RECORDON, E., *Dimensionnement des fondations superficielles*. Séminaire sur les méthodes probabilistes en géotechnique, EPFL-Ecublens, 1983.
- [9] SHULTZE, E., *Frequency distributions and correlation of soil properties*. Proc. ICASP 1, Hong-Kong University Press, Hong-Kong, 1972.

plan de glissement et sans nappe phréatique, a été présentée.

En gardant les caractéristiques moyennes c, φ constantes une analyse paramétrique a été effectuée sur:

- la corrélation $\rho (c\varphi)$
- le coefficient de variation V_c de la cohésion
- le coefficient de variation V_φ du frottement.

Enfin, à titre d'exemple, un abaque de dimensionnement a été présenté.

L'étude paramétrique a mis en évidence la faible influence sur la probabilité de rupture, pour l'exemple considéré, de la variation de $\rho (c\varphi)$ et de V_φ en opposition avec les gros changements de pf en fonction de V_c . Ces résultats montrent que la pente d'un talus dans un massif cohésif devrait être dimensionnée, du point de vue déterministe, avec un coefficient de sécurité plus grand que celui utilisé pour un massif granulaire. Le facteur de sécurité a été admis distribué normalement pour des raisons pratiques de calcul. Tous les calculs, à l'exception de l'abaque, ont été exécutés à l'aide d'une machine à calculer de poche.

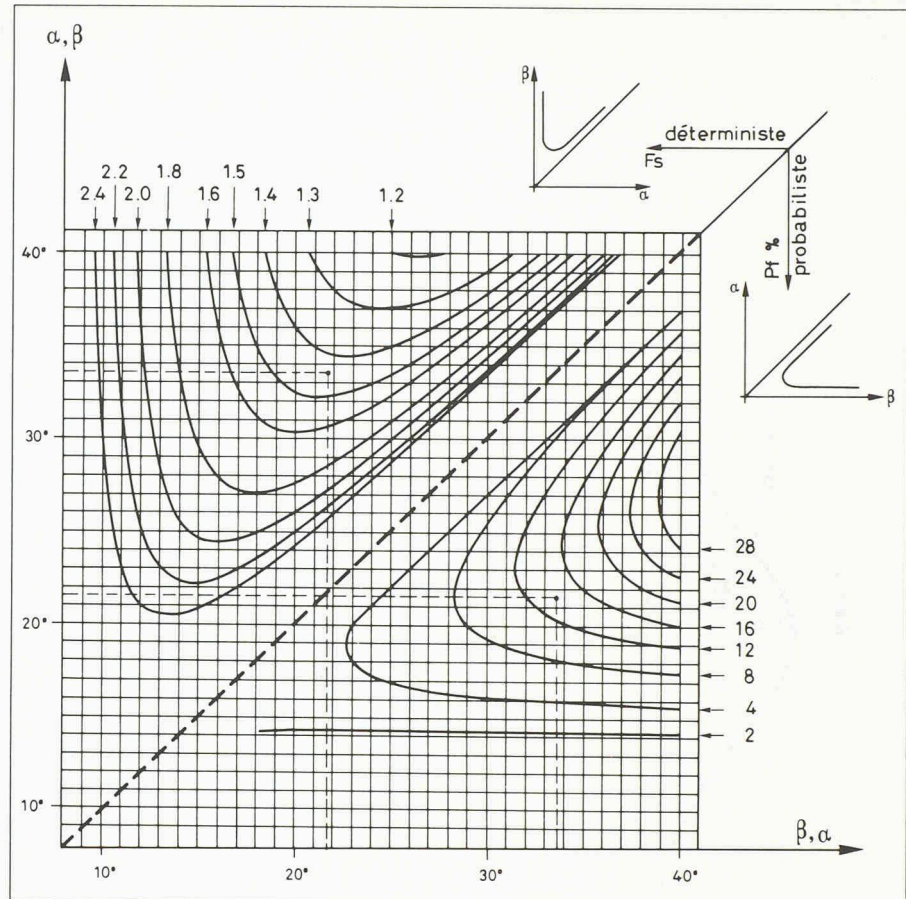


Fig. 5. — Abaque pour la comparaison entre F_s et pf pour le cas étudié ($\rho (c\varphi) = 0$)

En pointillé: solution pour le cas $\alpha = 21,8^\circ, \beta = 33,7^\circ$

$F_s = 1,42$ (erreur = +2,15% par rapport à 1,39)

$pf = 14\%$ (erreur = +1,45% par rapport à 13,8%).

N.B. — Pour des raisons d'économie, les courbes d'isovaleurs ont été obtenues par interpolation à partir d'un semis de points. L'erreur pouvant en résulter ne dépasse pas 5% de la valeur cherchée.

Adresse des auteurs:

Franco Oboni, ing. civ. dipl. EPFL
Tullio Martinenghi, ing. civ. dipl. EPFL
EPFL-Laboratoire de mécanique des sols
1015 Lausanne-Ecublens

Industrie et technique

Comment en finir avec les barrières de vapeur et rester crédible ?

IAS, N° 26/83 du 22 décembre 1983.

Monsieur le Rédacteur en chef, En introduisant l'article susmentionné de M. Barde, vous incitez vos lecteurs à vous soumettre leur avis «divergent ou pas».

Ayant lu avec attention l'intéressante contribution de M. Barde, je me permets de vous livrer les remarques ci-dessous:

1. Pour nous autres thermiciens, la barrière de vapeur a pour but essentiel la préservation des qualités thermiques de l'isolation, laquelle ne devrait pas

être «mouillée» par des condensations, venant soit par migration de vapeur d'eau, soit par transfert de vapeur par l'air d'inétanchéité.

2. Le «calcul» des barrières de vapeur, tel qu'il est généralement présenté, vérifie que l'eau «formée» en hiver dans les murs puisse être entièrement évacuée l'été. Cela est essentiellement un problème de bonne tenue ou de conservation des matériaux (physicien du bâtiment).
3. Il ne faut pas perdre de vue cependant que la condition nécessaire, mais non suffisante, pour qu'une barrière de vapeur soit efficace, est qu'elle soit étanche à l'air.
4. Cette étanchéité doit être vérifiée dans les deux sens: vers l'extérieur, en

hiver (condensation dans l'isolation); vers l'intérieur, en hiver (infiltrations d'air) et en été (apport d'humidité de l'extérieur, avec même, dans certains cas, des condensations à l'intérieur).

5. En résumé, je donnerais la définition suivante pour la barrière de vapeur: La barrière de vapeur a pour but d'empêcher la pénétration d'humidité, tant par diffusion de vapeur d'eau que par passage d'air. Elle doit donc être étanche aussi bien à l'air qu'à la vapeur d'eau.

En vous remerciant de votre attention, et souhaitant avoir répondu à votre appel, je vous prie de croire, Monsieur le Rédacteur en chef, à mes sentiments les plus cordiaux.

Samuel Rieben
Chemin Bord d'Aire, 1213 Onex

Surdimensionnons les chaudières

...mais pas les brûleurs

La plupart des gens s'accordent pour dire qu'il est nécessaire de dimensionner les chaudières au plus juste, d'éviter de les surdimensionner, si l'on tient à obtenir des installations à haut rendement. Or cette affirmation est parfaitement fautive.

Une chaudière n'est en effet rien d'autre qu'un échangeur de cha-

leur: elle permet de transférer la chaleur contenue dans les gaz de combustion à l'eau de chauffage; or chacun sait que plus un échangeur est surdimensionné, meilleur est son rendement. Contrairement à ce que pensent beaucoup de personnes, la chaudière ne produit pas de chaleur: elle ne fait que l'échanger, la production n'incombant qu'au brûleur qui, lui, devra être dimensionné et litré correctement.

Je connais plusieurs cas où le malheureux slogan «il faut di-

mensionner les chaudières au plus juste» a été appliqué. Quels ont été les résultats? tout simplement l'impossibilité d'obtenir une température des gaz de fumée correcte, l'échangeur de chaleur se faisant par trop mal. Ainsi, par exemple, pour une chaudière basse température, destinée à fonctionner avec une température de fumée de 120°C, on n'a pas réussi à descendre en dessous de 200°C! Dans un tel cas il aurait été nécessaire de choisir le modèle de chaudière de taille

supérieure.

En résumé, pour obtenir de bons rendements dans une installation, il faudrait adopter le slogan suivant:

«Surdimensionnons les chaudières, dimensionnons correctement les brûleurs et sous-dimensionnons le litrage de ces derniers... autant que possible!»

Lucien Keller,
Bureau d'études
Keller-Burnier,
1171 Lavigny