

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 118 (1992)
Heft: 21

Artikel: Fondations superficielles, arbres et sols argileux: une équation difficile
Autor: Fontana, Adalbert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77798>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.04.2026

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

Fondations superficielles, arbres et sols argileux

Par Adalbert Fontana,
ingénieur civil EPFL/SIA
Géotechnique
appliquée
P. et C. Dériaz & Cie SA
Rue Blavignac 10
1227 Carouge

Une équation difficile

Cet article rappelle les lois générales liant les phénomènes de retrait et de gonflement aux variations de teneur en eau des argiles; il évoque quelques cas concrets et propose des mesures permettant de limiter les dégâts aux constructions fondées superficiellement.

Retrait des sols argileux

Lorsqu'on dessèche un sol cohérent (saturé ou non), le séchage s'accompagne d'une diminution linéaire de volume (retrait) due à l'évaporation de l'eau interstitielle. On obtient finalement une teneur en eau au-dessous de laquelle le séchage ne provoque plus de retrait. Pour un sol saturé, la transition entre ces deux comportements correspond également au passage du sol à un état non saturé.

Après le passage d'une zone de transition, le volume reste pratiquement constant et le diagramme consiste en un segment de droite parallèle à l'axe des abscisses. Les auteurs s'accordent actuellement à définir la limite de retrait comme la teneur en eau correspondant à l'intersection des deux tronçons linéaires.

Par l'essai, on peut obtenir:

- 1) la limite de retrait correspondant à l'état de saturation total de l'échantillon (WS_{sat}) – selon la définition de Lambe [4]¹ considérée comme valeur de référence;
- 2) la limite de retrait correspondant au degré effectif de saturation de l'échantillon (WS_{ech}).

La différence de teneur en eau entre les limites de retrait obtenues sur un sol intact et remanié caractérise la sensibilité de structure de ce matériau (argiles sensibles, craie lacustre, etc.).

Limites de retrait – mode opératoire

1. Méthode complète

L'essai consiste à mesurer le volume d'une éprouvette de sol durant son séchage. La teneur en eau est déterminée simultanément par pesée de cette éprouvette. Les mesures de volume se font par immersion dans un bain de mercure.

Un procédé permettant une mesure directe des variations de volume sans

recours à la manipulation de mercure est à l'étude [6].

2. Méthode simplifiée

Cette méthode consiste à définir pour un échantillon donné, trois points caractéristiques du diagramme, soit:

- la masse volumique des grains (ρ_s);
- la teneur en eau, la masse volumique sèche et le degré de saturation à l'état naturel (W, ρ_d, S_r);
- après séchage à l'air, la teneur en eau minimum et la masse volumique sèche maximum (W_{min}, ρ_{dmax}).

Pour les deux méthodes, l'intersection des deux droites définit une limite de retrait correspondant à:

- celle de l'échantillon si ce dernier n'est pas saturé (WS_{ech});
- la valeur de saturation ou de référence si ce dernier l'est (WS_{sat}).

Les figures 1 et 2 illustrent les protocoles d'essais de limites de retrait obtenues par ces deux méthodes sur des argiles préconsolidées de retrait de la cuvette genevoise.

Analyse des droites de retrait

Au-dessus de la limite de retrait, la diminution de volume, proportionnelle à $1/\rho_d$, décroît linéairement avec celle de la teneur en eau, que l'échantillon soit saturé ou non. Le prolongement de ce tronçon recoupe l'axe des ordonnées ($W = 0$) en un point correspondant à $1/\rho_s$.

L'équation de cette droite peut s'écrire:

$$\frac{1}{\rho_d} = \frac{V}{M_s} = \frac{W}{\rho_w} \cdot \frac{1}{S_r} + \frac{1}{\rho_s}$$

avec:

ρ_s =	masse volumique de la matière	t/m ³
ρ_d =	masse volumique sèche	t/m ³
ρ_w =	masse volumique de l'eau	t/m ³
W =	teneur en eau	%
S_r =	degré de saturation	%
V =	volume de l'échantillon	m ³
M_s =	masse de la matière	t.

Cet article aborde le phénomène saisonnier du retrait et du gonflement des sols argileux qui cause aux ouvrages fondés superficiellement des dommages, dommages qui sont fortement accentués en présence d'arbres.

Des directives constructives permettant de les limiter sont proposées.

La sécheresse des étés 1976, et plus récemment de 1989, 90 et 91 a en effet entraîné de très nombreux désordres touchant des constructions fondées superficiellement en sol argileux.

La pente de la droite est inversement proportionnelle au degré de saturation de l'échantillon multiplié par la masse volumique de l'eau; elle vaut donc 1 (angle de 45°) en cas de saturation totale de l'échantillon; elle prend des valeurs supérieures à 1 si l'échantillon n'est pas saturé.

La relation entre les limites de retrait d'un échantillon saturé ou non s'exprime comme suit:

$$WS_{ech} = \frac{S_r}{100} \cdot WS_{sat}$$

La composition minéralogique des argiles fixe les valeurs des limites de consistance ou d'Atterberg donc la plage de variation entre les limites de plasticité et de retrait.

Les variations de volume au-dessus de la limite de retrait dépendent de la teneur en eau, et dans une moindre mesure, du degré de saturation.

Pour une diminution de teneur en eau de 1%, on obtient, pour un cube de terrain unitaire de 1 m de côté, les raccourcissements totaux et spécifiques du tableau 1.

Tableau 1. – Cube de terrain de 1 m de côté. Raccourcissements totaux et unitaires pour une diminution de teneur en eau de 1%

Raccourcissement	Degré de saturation S_r			
	100%	95%	90%	
unitaire	[mm]	16,4	16,9	17,1
	[%]	1,6	1,7	1,7
tridimensionnel	[mm]	5,6	5,8	6,0
	[%]	0,6	0,6	0,6

Ces chiffres prennent leur signification quand on les confronte aux références suivantes:

- dans les argiles préconsolidées de retrait, une variation de 1% de teneur en eau correspond à un volume d'eau de 17 l environ;

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

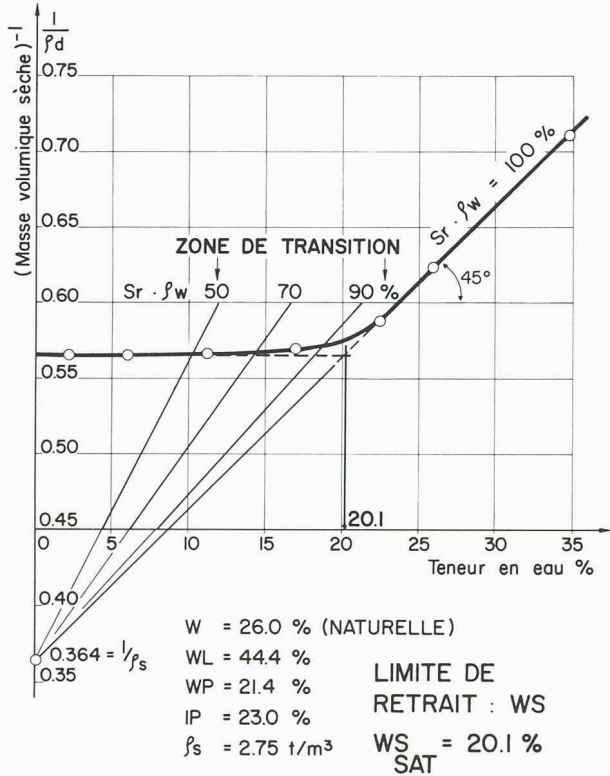


Fig. 1. - Détermination de la limite de retrait. Méthode complète.

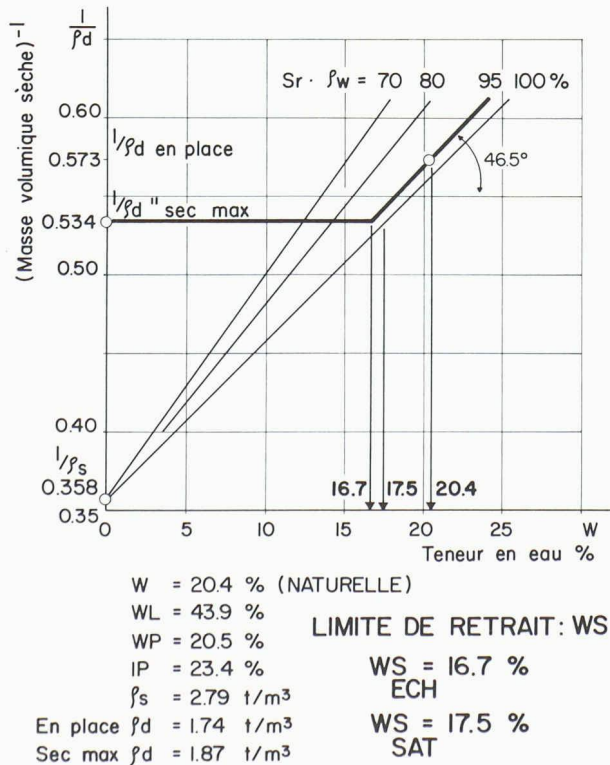


Fig. 2. - Détermination de la limite de retrait. Méthode simplifiée.

- Perpich [5] estime que des arbres adultes évacuent dans l'atmosphère, par une journée ensoleillée, entre 200 et 450 l d'eau;
- dans des argiles quaternaires argileuses et au moyen d'une station de mesures implantée à 3,4 m d'un peuplier haut de 17 m, Biddle [1] obtient en 3 ans les variations de teneur en eau suivantes:

Profondeur [m]	Variation de teneur en eau [%]
1,0	13
1,5	8
2,0	6
2,5	2
3,0	1
3,5	négligeable

Les limites de consistance ou d'Atterberg de ces argiles quaternaires sont comparables à celles de nos sols argileux, tant morainiques que de retrait. Dans les argiles de Londres ou de Gaut, des mesures semblables montrent que l'effet de peupliers hauts de 20 m et 19 m se fait sentir à plus de 3,5 m de profondeur.

La détermination des limites de retrait par la méthode complète et l'analyse de telles mesures établit que dans un sol argileux le phénomène de retrait est réversible et qu'au-dessus de la limite de retrait les variations de volume (retrait et gonflement) s'effectuent sur les droites étudiées.

Limite de retrait de nos retraits

Dans 40% des essais, la détermination des limites de retrait a été effectuée par la méthode complète au mercure, avec un appareil Wykeham Farnance, le reste des valeurs ayant été déterminé par la méthode simplifiée. La majorité des essais (60%) a porté sur les argiles préconsolidées de retrait, la moraine argileuse venant en deuxième position avec le cinquième (20%) des essais.

Le tableau 2 en page suivante récapitule les valeurs obtenues pour ces deux formations.

La limite de retrait peut être estimée à partir des expressions ci-dessous:

Argiles de retrait	$WS_{sat} = WP - 3,5$ ($\pm 2,0$) en %
Moraine argileuse	$WS_{sat} = WP - 3,0$ ($\pm 3,0$) en %
Moyenne des essais	$WS_{sat} = WP - 3,0$ ($\pm 2,0$) en %

Les chiffres donnés entre parenthèses sont ceux de l'écart type.

Les argiles de retrait ont la composition minéralogique suivante: calcite 45%, quartz 25%, minéraux argileux 22%, feldspath et dolomite 8%.

Quant aux minéraux argileux (fraction inférieure à 2 microns), ils sont formés d'illite (50%) et de chlorite (40%) bien cristallisée, avec une faible proportion (10%) d'édifice gonflant interstratifié d'illite-montmorillonite.

Effet des arbres

La relation entre les arbres et la dessiccation de sols argileux jusqu'à 5,0 m de profondeur a été mise en évidence il y a près de quarante ans en Grande-Bretagne [7, 8].

Dans nos terrains, des radicelles tapissant les fissures de retrait des argiles ont été observées jusqu'à 6 m de profondeur.

On doit au BRS (Building Research Station) les relations empiriques consistant à éloigner, en sols argileux, les arbres des fondations superficielles d'une distance égale à une fois la hauteur de l'arbre adulte en cas d'arbre isolé, ou 1,5 fois la hauteur moyenne des arbres adultes en cas de haie ou de groupe.

Ces propositions ont été fortement remises en cause [3], car appliquées à la lettre, elles reviennent à bannir les arbres des zones construites.

Biddle estime qu'une profondeur minimum de fondation de 1,5 m permet la plantation d'arbres de la plupart des essences, à l'exception du peuplier, de l'orme, du chêne et du saule, essences pour lesquelles les relations précédentes restent valables.

Driscoll [2] estime que dans 75% des cas, à l'exception des essences précitées, on pourrait se contenter d'une distance égale à la moitié de la hauteur de l'arbre adulte.

Ces propositions paraissent optimistes au vu des expériences faites dans nos régions.

Etude de quelques cas

Les phénomènes de retrait et de gonflement affectent chaque année les sols argileux et ils se trouvent amplifiés lors d'étés secs à fort déficit pluviométrique, comme ce fut le cas en

Tableau 2. – Valeurs d'identification et limites de retrait de deux sols argileux

Géologie			Retrait wurmien		Moraine wurmienne	
			argileuse LR	préconsolidée MG	argileuse LR	compacte MG
Phase						
Moyenne selon						
Teneur en eau	<i>W</i>	%	21,2 (2,6)	22,5 (2,5)	14,6 (2,0)	14,8 (2,2)
Masse volumique apparente	ρ	tm ⁻³	2,07 (0,04)	2,06 (0,05)	2,24 (0,04)	2,21 (0,07)
Masse volumique sèche	ρ_d	tm ⁻³	1,71 (0,08)	1,68 (0,07)	1,95 (0,06)	1,95 (0,10)
Masse volumique de la matière	ρ_s	tm ⁻³	2,78 (0,03)	2,79 (0,02)	2,76 (0,01)	2,76 (0,02)
Indice de vide	<i>eo</i>	–	0,629	0,663 (0,065)	0,412	0,410 (0,076)
Degré de saturation	<i>S_r</i>	%	93	95	98 (2)	99
Limites d'Atterberg						
Limite de liquidité	<i>WL</i>	%	43,2 (3,5)	38,4 (3,5)	32,0 (2,4)	30,7 (3,7)
Limite de plasticité	<i>WP</i>	%	21,2 (1,7)	19,5	16,2 (0,9)	16,2
Limite de retrait (sol saturé)	<i>WS_{sat}</i>	%	17,7 (1,6)		13,3 (3,0)	
Indice de plasticité	<i>IP</i>	%	22,0	18,9 (3,0)	15,8 (1,8)	14,5 (2,6)
Consistance	<i>qp</i>	kPa		330 (90)		320 (110)

LR: moyenne des valeurs obtenues dans la détermination des limites de retrait
 MG: moyenne genevoise
 (2,6): écart type

1976 et dès 1989, de même qu'en présence d'arbres.
 Les quelques cas concrets esquissés ci-après illustreront notre propos.

Villa sur le plateau des Bougeries

Construction avec sous-sol partiel, joutée d'une annexe sur vide sanitaire. Pas de chantier, ni d'arbres de haute futaie à proximité. Respiration saisonnière des argiles de fondation. De mai à septembre 1991, tassements mesurés de:

- 0 à 5 mm pour la villa;
- 2 à 13 mm pour l'annexe.

De septembre à décembre 91, gonflements mesurés de 0 à 11 mm réduisant les tassements à:

- 0 à 3 mm pour la villa;
- 0 à 2 mm pour l'annexe.

Chapelle dans le Mandement

Tassements et gonflements d'argiles préconsolidées. Mouvements mesurés d'août 1975 à novembre 1976:

- 2 mm à +4 mm (total 6 mm) pour l'église;
- 17 mm à +15 mm (total 32 mm) pour le mur du cimetière.

Quartier de Varembe

Petits immeubles fondés superficiellement.

Tassements de mars à septembre 1976: 29-50 mm.

Gonflements de septembre 1976 à mars 1977: 34-47 mm.

Mouvements saisonniers liés à la météo de cette époque.

Quartier de Pinchat

Mouvements de l'angle d'une villa liés à la présence d'un gros chêne. Amplitude annuelle estimée à 8 mm. Stabilisation des mouvements une fois le chêne abattu.

Quartier de Malagnou

Pignon d'un immeuble locatif fondé sur semelles à -4,5 m. Six peupliers dépassant la toiture sont situés à 6 m de la façade.

Tassements du pignon de 1977 à 1988: 15 à 25 mm.

Elagage des peupliers et arrosage superficiel dès l'été 1988 réduisant les tassements aux valeurs actuelles de 8 à 9 mm (gonflements de 7 à 16 mm). Cet exemple est intéressant, il évoque la profondeur d'action des peupliers et la possibilité de compenser les tassements par un arrosage au moyen d'un simple tube plastique troué, posé à même le sol.

Quartier de Pinchat

Villa avec sous-sol, construite en 1963, complétée en 1964 par une annexe sur vide sanitaire. Présence de 10 pins à 4 m de la façade NE.

Tassements différentiels entre zones avec et sans sous-sol de cette façade:

- en janvier 1973 de 40 mm;
- en novembre 1989 de 80 mm.

Cet exemple souligne l'importance d'être fondé au même niveau pour obtenir un comportement «homogène» des fondations.

Quartier de la Praille

Bâtiment industriel fondé sur semelles à 1,20 m de profondeur. En été 1989, soit vingt ans après la construction, apparition de désordres liés à des tassements de la façade, estimés entre 30 et 50 mm et localisés au droit de deux groupes de peupliers. Confortation par micro-pieux et ancrages.

Quartier de la Servette

Petit immeuble de deux étages sur sous-sol semi-enterré. Deux chênes et deux érables devant la façade rue (fig. 3). Fissures horizontales de 15 à 40 mm de large avec rejet de 40 mm de la façade rue et d'un pignon (fig. 4) entraînant une redistribution des charges et de nombreuses fissures intérieures.

Dans l'attente d'une solution définitive, clavage des fissures par des coins d'acier.

Quartier des Semailles

Bâtiment locatif de 7 étages sur rez fondé sur radier général continu. Ouverture progressive en toiture d'un joint de 80 mm environ provoquant le 13 août 1990 la rupture de la ferblanterie, le blocage de stores et l'évacuation temporaire de l'immeuble. Phénomène lié à la présence de 3 peupliers et d'un pin devant le pignon (fig. 5) et la sécheresse de cet été.

Propositions

En présence de sols argileux, les règles de construction suivantes peuvent être énoncées:

- se fonder suffisamment bas; 1,25 m au minimum, de préférence 1,50 m;
- éviter les décrochements entre les fondations;
- en présence d'essences reconnues comme avides d'eau (peupliers, ormes, chênes, saules), respecter les règles empiriques énoncées précédemment, soit se tenir à des distances des arbres adultes égales à une fois (arbre isolé) ou une fois et demie (haie, groupe) leur hauteur;
- si ces distances ne peuvent être respectées, ne pas hésiter à reporter les charges en profondeur par pieux, puits, tranchées, etc., soit au-dessous de la zone d'action des radicelles (jusqu'à 5 m et plus);
- prendre garde au gonflement ultérieur du terrain en cas d'abattage.

On peut également envisager de réintroduire les eaux de toiture dans le terrain par le biais de tranchées absorbantes équipées d'une surverse. Ce mode de faire entraîne une diminution souhaitable des débits de pointe dans les collecteurs mais l'interaction potentielle de cette eau avec les sous-sols des bâtiments doit être vérifiée.

Conclusions

Cet article rappelle les lois liant les variations de volume des sols argileux à celles de leur teneur en eau.

Dans ces dépôts, les mouvements annuels de surface (respiration du terrain) dépassent couramment le centimètre. Des valeurs supérieures à 40 mm ont déjà été mesurées.

Des mouvements différentiels de 80 mm, liés à la présence d'arbres de haute futaie ont déjà été observés. Ces mouvements proviennent du fait que la teneur en eau naturelle des argiles préconsolidées et de la moraine argileuse est supérieure à leur limite de retrait.

Cette dernière peut être estimée à partir de la limite de plasticité WP en posant:

$$WS_{\text{sat}} = WP - 3,5 (\pm 2).$$



Fig. 3. - Façade rue et mur pignon coupés par une fissure horizontale

(Photo Conus)

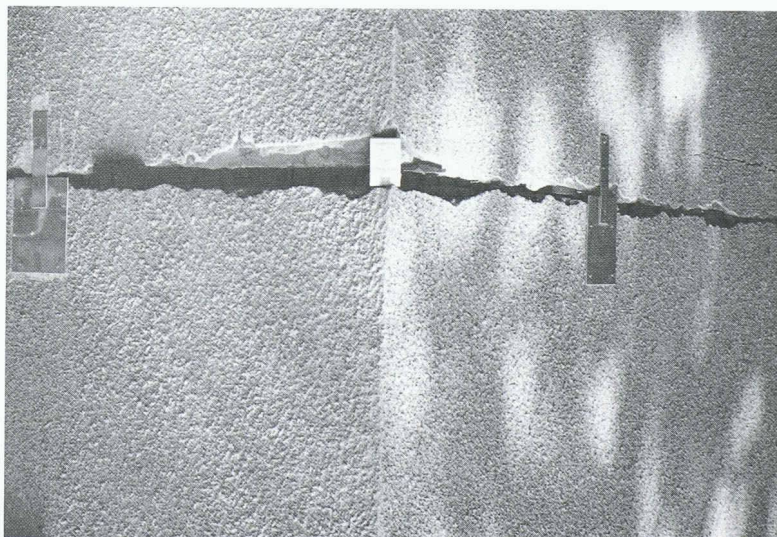


Fig. 4. - Detail de la fissure à l'angle du bâtiment

(Photo Conus)



Fig. 5. - Bâtiment locatif avec son mur pignon devant lequel poussent trois peupliers et un pin

(Photo Conus)

Des directives permettant de traiter l'équation «fondations superficielles – arbres et sols argileux» sont proposées.

Elles sont à adapter à chaque cas traité.

Remerciements

Les exemples cités ont été le plus souvent analysés avec des bureaux d'ingénieurs de structure. Nous tenons, en les citant, à les remercier de leur confiance et de l'excellent climat de collaboration qui s'est établi lors de ces études. Il s'agit des bureaux

Bigar et Urner, Bourquin et Stencek SA, Buffo, Epars et Devaud SA, Jorand et Roget SA, Liechti Serex et Mouchet, Dubois et Boissonnard SA.

Bibliographie

- [1] BIDDLE G.: «Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils», *Géotechnique*, volume XXXIII (1983) p. 107-126.
- [2] DRISCOLL R.: «The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain», *Géotechnique*, volume XXXIII (1983) p. 93-105.

[3] FLORA T.: «Treeless Towns?», *Journal Inst. Landsc. Arch.* 121, 1978, p. 10-12.

[4] LAMBE T.W.: «Soil testing for engineers», John Wiley and Sons, New York, 1951.

[5] PERPICH W., LUKAS R., BAKER C.: «Dessication of soil by trees related to foundation settlement», *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 2 (1965) p. 22-39.

[6] PHILIPPONNAT G.: «Retrait-gonflement des argiles. Proposition de méthodologie», *Revue française de géotechnique* N° 57, octobre 1991, p. 5-22.

[7] WARD W.H.: «The effect of fast growing trees and shrubs on shallow foundations», *Journal Inst. Landsc. Arch.*, 11, 1947, p. 7-16.

[8] WARD W.H.: «Soil movement and weather», Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech., Zurich, 4, 1953, p. 477-482.

Par Jean-Pierre Weibel,
rédacteur en chef

Notes de lecture

La diversité biologique et nous

C'est là un sujet dont on a abondamment parlé à l'occasion du sommet de Rio de Janeiro consacré à la protection de l'environnement. Si on l'aborde sous un angle paraissant pragmatique, on est tenté de parler d'un faux problème et d'un souci écologique poussé à l'absurde. Apparemment, il suffirait d'assez peu d'espèces animales et végétales pour nous faire vivre: pourquoi conserver toutes les autres, au prix de grands sacrifices, si cela se trouve? Du reste, les espèces déjà disparues ne nous manquent que sous un aspect anecdotique, diront certains¹.

L'éradication de nombre d'animaux et de plantes n'est aujourd'hui pas un risque, mais un fait, dont la conséquence première pour nous est un appauvrissement, un affadissement de notre cadre et de notre mode de vie – pour ne pas parler de la méconnaissance de l'histoire du monde dans lequel nous vivons. Certes, la nature elle-même a détruit beaucoup de ses enfants, notamment parmi les animaux qui peuplaient la planète dans les ères géologiques qui nous ont précédés; cela n'autorise personne à y ajouter ses propres déprédations. Or, aujourd'hui déjà, des organismes vivants, qui ont été nos contemporains, ont disparu du fait de l'homme avant même que ce dernier ait appris leur existence.

La nature constitue un système global, complexe. En supprimer certaines composantes peut mettre en danger l'équilibre du tout. Les causes de cet appauvrissement génétique sont multiples, allant de la sélection rigoureuse à l'exploitation effrénée, en passant par la pollution, les innombrables atteintes à l'environnement et l'imbécillité la plus pure.

La Terre est jusqu'ici la seule planète que nous connaissons où existe la vie. Cette exception nous gênerait-elle? A ceux qui ne comprendraient pas le lien direct entre cette vie et la diversité biologique, on recommandera vivement le petit ouvrage que la Société pour la protection de l'environnement consacre à ce thème, sous la plume de Claude Au-

roi, dans la collection Dossiers de l'environnement. Curieusement, on est au regret de constater que même des gens intelligents n'ont pas encore compris pourquoi le maintien de la diversité biologique touche chacun d'entre nous, aussi bien que les générations futures. Voilà donc un cadeau à offrir aux grands esprits partiellement aveuglés par des critères purement économiques.

AUROI CLAUDE: «La diversité biologique». Un vol. broché 15 x 21 cm, 128 pages. Editions Georg, Genève, 1992. Prix: Fr. 24.–

¹C'est ainsi que la race des vaches fribourgeoises, dont on aurait pensé qu'elle appartenait à tout jamais à notre patrimoine, est déjà éteinte, remplacée par la race française frisonne, d'un meilleur rapport.

En Suisse aussi: l'énergie, c'est la vie

Le sous-titre des *Cahiers de l'électricité – Revue suisse de l'énergie* – a de quoi titiller certains. Pourtant, le N° 17 de septembre constitue une lecture obligée pour quiconque désire s'informer vite et bien sur l'avenir énergétique de notre pays. Ce thème a été abordé les 21 et 22 mai dernier lors des Rencontres suisses de l'énergie, organisées par l'OFEL. Sous le titre «Energie: la Suisse en 2010», les *Cahiers de l'électricité* rendent compte de cette manifestation où se sont exprimés des spécialistes tant de l'économie que de la politique énergétique, en-dehors de tout dogmatisme. Parmi les auteurs, on trouve notamment le conseiller fédéral Adolf Ogi, le cheikh Yamani et le directeur suppléant de l'Office fédéral de l'énergie Alec Jean Baer, aux côtés de responsables de l'approvisionnement de notre pays en pétrole, en électricité et en gaz naturel. A lire et à conserver!

«Energie: la Suisse en 2010.» *Les cahiers de l'électricité*, N° 17, septembre 1992, 44 pages, OFEL, case postale 307, 1000 Lausanne 9. Prix: Fr. 8.–.