The background of the book cover is a detailed illustration of a stone path. The path is composed of various sizes of smooth, light-colored stones, with larger, rounded boulders interspersed among smaller pebbles. A pencil and a ruler are placed diagonally across the path, with the pencil pointing towards the top left and the ruler extending from the bottom left towards the top right. The pencil is positioned over the ruler. The overall style is that of a fine-line drawing or a detailed illustration.

**sols  
caillouteux  
et** Raymond Gras  
**production  
végétale**

MIEUX COMPRENDRE

 **INRA**  
EDITIONS





**sols caillouteux  
et  
production végétale**

**Raymond Gras**

## Mieux comprendre

*Ouvrages parus dans la même collection :*

### **Biologie de la lactation**

Jack MARTINET, Louis-Marie HOUDEBINE

1993, 587 p.

### **Amélioration des espèces végétales cultivées.**

#### **Objectifs et critères de sélection**

A. GALLAIS, H. BANNEROT

1992, 768 p.

### **L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes**

Frantz RAPILLY

1991, 318 p.

### **Principes d'amélioration génétique des animaux domestiques**

Francis MINVIELLE

1990, 211 p.

### **Cytogénétique des mammifères et élevage**

Paul C. POPESCU

1989, 114 p.

### **Les oligo-éléments en agriculture et élevage**

Yves COÏC, Marcel COPPENET

1989, 114 p.

### **Eléments de virologie végétale**

Pierre CORNUET

1987, 208 p.

# Introduction

Les sols dépourvus de cailloux sont recherchés pour la production agricole, parce que les opérations culturales y sont plus faciles : travail du sol, préparation du lit de semence, récolte, notamment des tubercules et des racines, etc. Pour toutes ces raisons et aussi à cause de plus grandes facilités d'étude, les recherches ont concerné essentiellement les sols sans éléments grossiers. Cependant, en proportion importante les sols du globe sont caillouteux et une partie des surfaces correspondantes est utilisée pour la production végétale. Les recherches sur ces sols ont souvent transposé à leur fraction non caillouteuse, ce qui était fait pour les sols sans cailloux. Ceci eut été parfaitement licite, si on n'avait pas omis délibérément dans certaines études les cailloux eux-mêmes qui ne sont pas toujours aussi inertes qu'on le pense et surtout les conséquences qu'ils peuvent avoir sur les propriétés du sol en place dont ils sont un des constituants. C'est pourquoi une mise au point sur l'état actuel des connaissances concernant le sol caillouteux *considéré comme un tout*, était nécessaire. L'analyse des effets possibles des cailloux qu'on a tenté de réaliser n'est pas complète, parce que certains points n'ont fait l'objet d'aucune étude pour les raisons déjà évoquées.

Un sol caillouteux est constitué de deux phases, la terre fine et les éléments grossiers, séparées par la limite dimensionnelle de 2 mm communément admise ; ces deux phases peuvent être considérées comme homogènes à un niveau d'analyse approprié. A un niveau d'analyse plus approfondi, la terre fine peut être scindée en trois phases, solide, liquide et gazeuse, les deux fluides occupant les vides laissés par la matière solide. La proportion de liquide et de gaz dans la porosité peut varier au cours du temps.

Les cailloux sont souvent dépourvus de porosité. C'est le cas par exemple des roches éruptives non altérées (granite, basalte,..) et de certaines roches sédimentaires. Les propriétés physiques de ces cailloux ne se modifient donc pas dans le temps, du moins sur des intervalles pas trop longs pour que l'altération n'intervienne pas de façon appréciable. Il en résulte que les modifications provoquées par ces cailloux dans un sol en place (propriétés thermiques par exemple) ne varient pas dans le temps.

D'autres éléments sont poreux, comme certains grès ou des roches qui, normalement non poreuses, peuvent le devenir à la suite de l'altération. Le matériau qui

en résulte a des propriétés intermédiaires entre celles de la roche mère et celles du sol qui en est issu. Le cailloux est, à l'instar de la terre fine, constitué aussi de phases solide, liquide et gazeuse. Le sol comprend encore deux composants mais les propriétés de chacun d'entre eux ne sont pas constantes. Le sol devient un système particulièrement complexe, puisque les propriétés physiques des cailloux ne sont pas invariantes. Par exemple, des cailloux poreux n'ont pas la même capacité calorifique selon qu'ils sont secs ou humides. Ceci retentira sur la capacité calorifique du sol en place qui dépend aussi de celle de la terre fine, elle-même sujette à variation.

On peut maintenant énumérer les principaux éléments qui interviennent sur les propriétés d'un sol caillouteux en place :

- proportion relative de terre fine et de cailloux,
- propriétés de la terre fine,
- propriétés des cailloux et notamment existence éventuelle d'une porosité,
- actions (et interactions éventuelles) des propriétés des cailloux et de la terre sur les propriétés du sol en place.

Nous allons esquisser maintenant les grandes lignes de cet ouvrage. Avant toute chose, il faut préciser l'importance de l'effet global des cailloux sur la production végétale, c'est pourquoi les rares données disponibles sur ce sujet ont été rassemblées. La caractérisation des sols caillouteux sera ensuite traitée : teneurs en cailloux (massique, volumique), mesures correspondantes et leur précision – diverses masses volumiques – description *in situ* et au laboratoire.

Les conséquences des cailloux sur les cultures peuvent être directes ou indirectes. Par effets directs nous désignons tout ce qui relève du contact entre les cailloux et les pièces travaillantes des instruments aratoires et entre les cailloux et la plante (lésions, modifications de la morphologie de certains organes...). Nous placerons aussi dans les effets directs la dilution de la terre fine qui tombe facilement sous le sens.

Les effets sont dits indirects lorsqu'ils interviennent sur la culture par l'intermédiaire des modifications apportées au sol lui-même par les cailloux. Par exemple, des changements dans les propriétés thermiques du sol ont un effet sur la croissance de la plante par le biais de la température du sol. Ceci nous conduit à analyser successivement les modifications provoquées par les cailloux sur la structure de la terre fine, sa température et enfin la rétention d'eau et sa dynamique.

Contrairement à certaines classifications, désignant par cailloux seulement les éléments grossiers correspondant à un intervalle de dimensions, nous appellerons indistinctement caillou ou pierre ou élément grossier, tout fragment non terreux de dimension supérieure à 2 mm, pour faciliter l'expression. Enfin, l'analyse qui suit peut être transposée à tous les éléments grossiers du sol et notamment à ceux issus de sa pédogénèse (concrétions, fragments d'aliols, etc.) et éventuellement à tout milieu poreux contenant des inclusions dont les propriétés sont différentes de celles du milieu lui-même.

Nous remercions les chercheurs de la Station de Science du sol de Montpellier qui nous ont suggéré des améliorations, et en particulier Monsieur CALLOT, qui a bien voulu de plus lire le manuscrit.

Nous ne saurions oublier les secrétaires de la Station d'Agronomie d'Antibes qui dans des circonstances difficiles ont dactylographié ce texte souvent ingrat.





# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Influence globale des cailloux sur la production végétale</b> .....	9
<i>Caractérisation des sols caillouteux</i>	
<b>1. Description d'un sol caillouteux</b> .....	17
Description quantitative.....	17
Teneurs massique et volumique en cailloux .....	17
Masses volumiques du sol, de la terre fine et des cailloux.....	18
Masses volumiques apparentes partielles de la terre fine et des cailloux..	19
Relations entre les masses volumiques .....	19
Dimensions des cailloux.....	20
Description qualitative.....	21
<b>2. Mesures des caractéristiques des sols caillouteux : taux de cailloux, masses volumiques</b> .....	23
Mode d'appréciation des cas où la teneur en cailloux peut être considérée comme négligeable.....	23
Incidence de la teneur en cailloux sur la masse volumique apparente de terre fine.....	24
Mesure des masses volumiques apparentes partielles de terre fine en sol peu caillouteux.....	24
Mesure des distances entre cailloux .....	26
Mesures concernant les sols caillouteux.....	29
Séparation de la terre fine et des cailloux.....	29
Méthodes de mesure du volume apparent du prélèvement .....	30
Mesure du volume de prélèvement et dimensions des cailloux .....	31
Variabilité des mesures.....	39
Mesure au laboratoire des caractéristiques des cailloux .....	42
Masse volumique apparente.....	43
Masse volumique réelle.....	43
Porosités .....	44

*Incidences des cailloux sur la production végétale*

<b>3. Incidences directes des cailloux sur la culture des plantes .....</b>	<b>49</b>
Effets mécaniques.....	49
Préparation du sol .....	49
Croissance, développement des plantes et récolte.....	50
Conséquences de la présence des cailloux sur la culture des différentes catégories de plantes.....	51
Dilution de la terre fine .....	51
Calcul de la dilution.....	51
Influence sur la nutrition minérale .....	52
Influence sur les apports d'amendements.....	53
Influence sur la quantité d'eau disponible.....	53
<b>4. Cailloux et structure de la terre fine.....</b>	<b>55</b>
<b>5. Cailloux et température du sol .....</b>	<b>61</b>
Constatations <i>in situ</i> et résultats d'essais .....	63
Conductivité thermique d'un sol en place .....	63
Chaleur spécifique d'un sol en place.....	64
Diffusivité d'un sol en place .....	64
Température du sol .....	65
Interprétation des effets des cailloux sur la température.....	67
Caractéristiques thermiques des cailloux et de la terre .....	67
Effets des cailloux non poreux sur la température du sol .....	71
Effets des cailloux poreux sur la température du sol.....	71
Calcul des caractéristiques thermiques des sols caillouteux .....	73
Chaleur spécifique.....	73
Conductivité thermique .....	74
Conclusion .....	80
<b>6. Cailloux et écoulement de l'eau.....</b>	<b>83</b>
Effets possibles des cailloux sur l'écoulement de l'eau.....	83
Analyses théoriques de l'influence des cailloux sur la perméabilité d'un sol saturé.....	85
Résistance hydraulique et teneur en cailloux .....	85
Variation linéaire de la perméabilité avec la teneur en cailloux .....	88
Variation hyperbolique de la perméabilité avec la teneur en cailloux...	88
Comparaisons entre les formules donnant le rapport $K^*/K_o$ .....	89
Cinétique d'humectation d'un sol sec en présence d'éléments grossiers...	91
Expérience avec éléments grossiers non poreux.....	93
Expérience avec éléments grossiers poreux .....	96
Constatations et mesures faites <i>in situ</i> .....	101

Etudes expérimentales en conditions saturantes.....	102
Etude sur modèle de l'influence d'un élément grossier sur la perméabilité.....	102
Reconstitution en laboratoire de sols caillouteux.....	108
Ecoulement de l'eau en conditions non saturantes.....	113
Cailloux non poreux.....	113
Cailloux poreux.....	117
Conclusion.....	117
<b>7. Transferts d'eau réciproques entre la terre fine et les cailloux poreux. Leur rôle dans la réserve en eau du sol.....</b>	<b>121</b>
Constatations sur la teneur en eau des cailloux.....	122
Transferts d'eau de la terre humide aux cailloux.....	125
Humectation directe par l'eau.....	126
Humectation par l'intermédiaire de la terre humide.....	131
Transferts d'eau du caillou au sol en voie de dessèchement.....	136
Effet d'un élément grossier non poreux sur l'écoulement de l'eau dans un sol.....	136
Dessèchement d'un sol caillouteux par la plante.....	138
Extraction d'eau d'un sol caillouteux par pression pneumatique.....	140
Mise en évidence d'un transfert d'eau sous forme liquide du caillou vers la terre.....	145
Les conditions de transferts d'eau entre les cailloux et la terre fine.....	147
Succion exercée par les pores de deux matériaux poreux différents.....	149
Contact entre les cailloux et la terre fine.....	152
Histeresis.....	153
Absorption directe de l'eau des cailloux par les racines.....	153
Contribution des cailloux à la réserve en eau du sol.....	154
Les humidités «caractéristiques» des cailloux.....	154
Mesure de l'humidité des cailloux en équilibre avec la terre fine à la capacité au champ.....	155
Mesure de l'humidité des cailloux en équilibre avec la terre fine au point de flétrissement.....	155
Calcul de la capacité de réserve en eau d'un sol caillouteux.....	156
<b>Conclusion.....</b>	<b>159</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>167</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>171</b>



# Influence globale des cailloux sur la production végétale

Les effets directs négatifs des cailloux sur la réalisation de la culture (travail du sol, lésions de plantes) donnent à penser que les conséquences de la présence de cailloux dans un sol sur la production végétale elle-même sont toujours néfastes. Cette façon de voir néglige les effets indirects éventuellement positifs et de ce fait l'effet global des pierres sur les cultures peut être positif ou négatif comme nous allons le voir.

Pour préciser l'influence globale des éléments grossiers sur la production, on est généralement tributaire d'études faites *in situ*. Les données les plus nombreuses comparent les productions obtenues pour une culture sur un sol caillouteux et sur un sol de référence non caillouteux. Choisir un tel sol est délicat, car il devrait être situé dans le même milieu physique, avoir les mêmes caractéristiques pour la terre fine, la matière organique... afin que la comparaison soit homologue. Dans ces conditions, on conçoit que peu de comparaisons soient réellement valables de tous ces points de vue.

HIDLEBAUGH (1984), utilisant les données disponibles dans les documents du Département de l'Agriculture des Etats-Unis et de son Service de conservation des sols, a comparé, dans de bonnes conditions, des sols contenant des pierres à des sols qui en étaient dépourvus, pour la production de cultures annuelles, de prairies et d'arbres forestiers (tabl. 1).

**Tableau 1 – Influence de fragments de roche sur la production.** Effectif des cultures (HILDEBAUGH, 1984).

	Diminution de rendement	Pas d'effet	Augmentation de rendement
cultures annuelles	16	9	1
pâturages	8	12	0
arbres forestiers	0	30	4



On constate que la présence de pierres peut abaisser le rendement, ne pas l'influencer ou le relever, avec toutefois une différence marquée suivant les cultures. Pour les arbres forestiers, il n'y a pas d'effet négatif, ce qui n'est pas le cas pour les pâturages et surtout pour les cultures annuelles. Il est vraisemblable que pour celles-ci, la présence de cailloux gêne l'installation de la culture et provoque des lésions sur la plante. Du fait de leur pérennité, les plantes prairiales ont plus de temps pour surmonter ces inconvénients.

En dehors des travaux de HIDLBAUGH, il existe quelques comparaisons, certainement de moindre qualité pour ce qui est de leur homologie. Elles proviennent de travaux de ASHBY *et al.* (1982), BOUGLER *et al.* (1965), GRAS (1962), LARSEN (1930), LUTZ et CHANDLER (1946), MAGDUF *et al.* (1971), PEARSON et MARSH (1935). Une mention particulière doit être attribuée aux travaux de SAINI (1970) : il a installé, sur trois sortes de sols dont les teneurs en cailloux varient de 4 à 9 % en volume, des essais simples comprenant une parcelle témoin (sol à l'état naturel) et une parcelle contigüe dont tous les cailloux plus grands que 2,5 cm sont enlevés de la couche labourée. Les teneurs massiques extrêmes seraient de 8 et 17 % avec des masses volumiques de  $2,7 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$  pour les cailloux et  $1,3 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$  pour la terre. En deux ans, la production de pomme de terre passe de 28 025 kg/ha pour le témoin à 25 260 kg/ha pour la parcelle épierrée, la diminution de rendement étant de 9,8 % par rapport au témoin. En ajoutant ces résultats à ceux de HIDLBAUGH, on obtient le tableau 2.

**Tableau 2 – Influence de fragments de roche sur la production.** Ensemble des données disponibles. Effectif des cultures.

	Diminution de rendement	Pas d'effet	Augmentation de rendement
cultures annuelles	17	9	5*
pâturages	8	13	2
arbres fruitiers et forestiers	2	30	14

\* les 3 localisations des essais de SAINI (1970) sont prises en compte.

Les tendances indiquées dans le tableau 1 ne sont guère modifiées, en grande partie à cause du petit nombre de comparaisons ajoutées à celles de HIDLBAUGH. Les résultats précédents sont à considérer avec prudence à cause des difficultés déjà soulignées pour obtenir des termes de comparaison strictement homologues. Cependant, on peut formuler cette conclusion à minima : les cailloux n'ont pas toujours une influence défavorable sur les cultures annuelles, les prairies, les arbres fruitiers et forestiers ; c'est dans cette dernière catégorie que les effets négatifs sont les moins fréquents.

Dans le même ordre d'idée, on dispose d'une comparaison entre une teneur en éléments grossiers faible (ou nulle) et une teneur moyenne : augmentation de pro-

duction de soja et de maïs sur sol de terril de mine non fertilisé, lorsque la quantité de cailloux croît – invariance sur sol fertilisé (ASHBY *et al.*, 1984). Lorsqu'on compare des teneurs moyennes et élevées en cailloux, il y a diminution de production pour les teneurs élevées : maïs (NIELSEN *et al.*, 1980), pêchers non irrigués (DEFFONTAINES et GRAS, 1968).

Les comparaisons entre deux teneurs moyennes en cailloux différentes donnent ces résultats :

- maïs (ASHBY *et al.*, 1984) : diminution de production dans un site lorsque la teneur volumique en cailloux passe de 38 à 52 %, augmentation dans un autre site lorsque la teneur passe de 37 à 41 % ;
- arbres forestiers (PHILO *et al.*, 1982) : amélioration de croissance lorsque la teneur en cailloux passe de de 36 à 44 %, avec cependant un sous-solage lorsqu'il y a 44 % de cailloux.

Dans quelques situations, on ne décèle pas d'effets des pierres, malgré une gamme assez étendue de variation de leur quantité : pêcher irrigué (DEFFONTAINES et GRAS, 1968), cerisier (BOUGLER *et al.*, 1965). SMITH *et al.* (1976) signalent que la productivité n'est pas sérieusement réduite dans des sols issus de terrils de mine avec des teneurs massiques en cailloux de 75 %.

Les résultats les plus intéressants sont ceux qui permettent de relier la production de la culture à la teneur en cailloux mais ils sont très peu nombreux. Pour la pomme de terre, des résultats sans ambiguïté sont fournis par un autre essai réalisé au champ par SAINI et Mc LEAN (1967). Ils comparent dans un dispositif statistique (3 répétitions) 4 teneurs en cailloux de diamètre supérieur à 2,5 cm. La production sur 3 ans augmente significativement lorsque la teneur volumique en cailloux passe de 0 à 12 %, puis diminue lorsque cette teneur passe à 24 %, le rendement correspondant étant cependant supérieur à ceux des teneurs 0 et 6 % (fig. 1 a). L'analyse statistique montre que la relation production-teneur en cailloux est curviligne (composante quadratique) mais une tendance générale croissante (composante linéaire) existe. La quantité d'éléments grossiers n'a pas d'influence sur la proportion commercialisable de la production totale, ni sur la masse volumique des tubercules.

Pour des pommiers irrigués, MAGIER et RAVINA (1984) constatent un effet positif des pierres, jusqu'à une teneur volumique de l'ordre de 30 %, ensuite il y aurait un effet négatif (fig. 1 b).

On constate donc que la quantité de cailloux peut jouer un grand rôle sur la production, mais le fait important est que du moins pour certaines situations, l'effet global des cailloux se traduit par une courbe à maximum. En d'autres termes, les éléments grossiers auraient globalement une influence positive jusqu'à un certain seuil, au-delà de celui-ci, cette influence serait négative entraînant évidemment à la limite une production nulle pour une teneur volumique de 100 %. L'existence de ce maximum suppose l'intervention d'au-moins deux mécanismes agissant en sens inverse, l'un ayant une action positive tendant vers une limite (fig. 2).

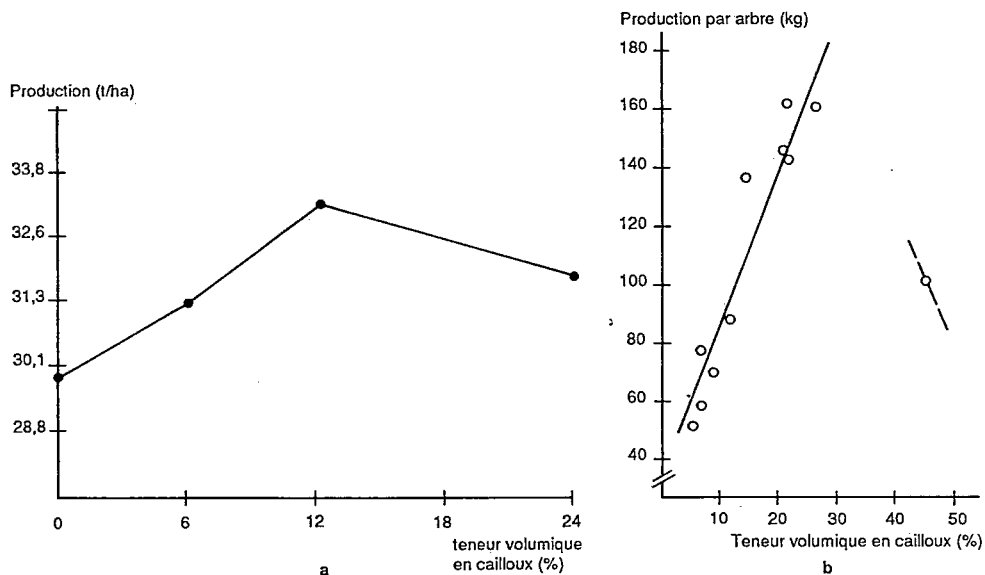


Figure 1 - Influence de la teneur volumique en cailloux sur la production. Pomme de terre (a) (SAINI et Mc LEAN, 1967). Pomme (b) (MAGIER et RAVINA, 1984).

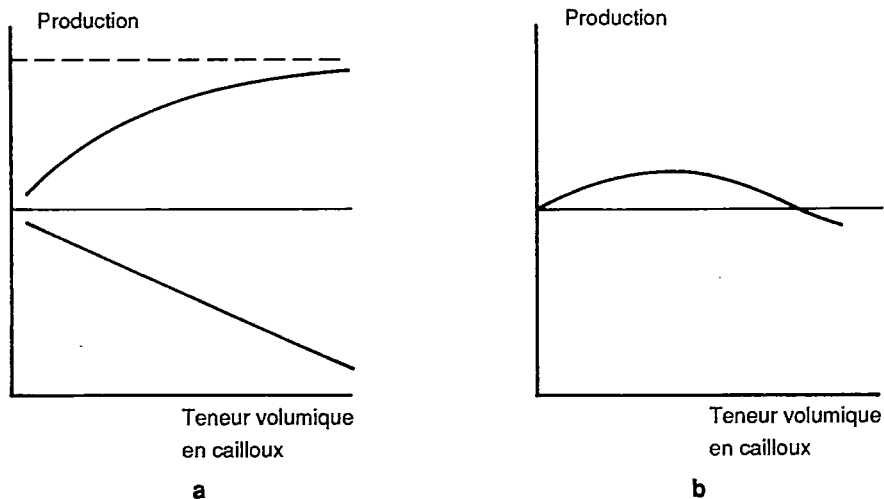


Figure 2 - Existence d'un optimum de production dans le cas théorique de deux variables dépendant de la teneur volumique en cailloux et ayant des effets inverses. a : effet de chacune des variables sur la production (valeur de référence production sans cailloux), b : effet résultant des 2 actions précédentes.

En anticipant sur ce qu'on verra par la suite, un effet linéaire négatif pourrait être celui de la dilution de la terre fine par les cailloux et un effet positif avec limite, l'action de cailloux sur la structure de la terre fine.

Soulignons aussi que des cultures fournissant une production de qualité poussent sur des sols caillouteux. C'est le cas par exemple des terres de Groie qui portent à côté de cultures à rendement élevé les vignobles de Cognac. Citons aussi les terrasses de la vallée du Rhône pour les vergers et les vignobles de Côtes du Rhône, les sols de Graves pour des vignobles de Bordeaux. En Provence les plantes à parfum poussent souvent sur des sols caillouteux. Actuellement on n'est pas en mesure de préciser la part des éléments grossiers dans l'élaboration de la qualité. Enfin, signalons que par ailleurs, une influence positive des éléments grossiers sur la précocité d'une culture est citée par HALL (1947).

L'action des cailloux sur la production végétale peut provenir de modifications de plusieurs caractéristiques du sol dont la résultante est selon les situations un effet global nul, positif ou négatif. Pour interpréter ces résultats très différents, il importe donc d'examiner toutes les conséquences que les cailloux peuvent avoir sur les propriétés du sol.





# Caractérisation des sols caillouteux

