

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/327118503>

Epistemological aspects of soil science in the late nineteenth century

Thesis · September 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.28704.02562/1

CITATION

1

READS

249

1 author:



Alexandre Wadoux

The University of Sydney

46 PUBLICATIONS 480 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



YangtzeGeo [View project](#)



Call for papers: Soil Sensing for Estimating Soil Capability and Condition [View project](#)

**Aspects épistémologiques
de la science des sols
(fin XIX^e siècle)**

Mémoire de Master

ALEXANDRE WADOUX

Nantes, 2018

Aspects épistémologiques de la science des sols (fin XIX^e siècle)

par

Alexandre Wadoux

Master 2 Recherche
Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques
Faculté des Sciences et des Techniques
Université de Nantes

Sous la direction de
M. Stéphane TIRARD

*Centre François Viète d'histoire des
sciences et des techniques, Nantes*

Date de soutenance le 03/09/2018
Université de Nantes
Nantes, France

Alexandre Wadoux

Aspects épistémologiques de la science des sols (fin XIX^e siècle)

Mémoire de Master recherche, Université de Nantes, Nantes, France (2018)

Avec référence, avec résumé en Français et Anglais

72 pages sans annexes.

DOI <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28704.02562>

Résumé

La fin du XIX^e siècle voit l'arrivée d'une nouvelle vision à la fois géographique et globale sur les sols. Celle-ci est le fait du travail d'une école de pensée russe en particulier, d'où émerge la notion de sol en tant que corps naturel indépendant et variant. Cette notion se confronte à la vision des agronomes, des chimistes ou des géologues avant de rapidement s'imposer grâce à une diffusion très efficaces des écrits russes et à l'émergence en parallèle de théories similaires en Allemagne et aux États-Unis. Dans ce mémoire, je propose une étude d'épistémologie historique du contexte, des acteurs et des moteurs de ce changement dans la science des sols pour la période 1883-1910.

Pour ce faire, j'identifie le contexte dans lequel se situe la science des sols au début de notre période d'étude. Je définis les travaux antérieurs, les contradictions ainsi que les conditions de l'émergence des théories de l'école russe. Dans un second temps je dresse un inventaire des méthodes employées dans la science des sols. Quelles sont les outils des scientifiques? Je poursuis avec une étude sur les méthodes de raisonnement employées et sur le rôle de l'hypothèse. Enfin, j'analyse et conclus sur le lexique de deux textes, choisis pour représenter deux écoles de pensées divergentes.

Je montre que la science des sols a amorcé sa transformation dans l'école russe dans un premier temps, mais que rapidement l'évolution de la théorie a été reprise par l'apport conjoint des méthodes et du raisonnement hérités de la chimie agricole et de la géologie. Ces dernières sciences, après une courte période d'opposition, ont aussi un temps secondé le développement de la science des sols d'un point de vue conceptuel et méthodologique.

Abstract

The turn of the nineteenth century witnessed the emergence of a new geographical and global vision on soils. This is particularly due to the work of a Russian school of thought, from which the notion of soil was differentiated as an independent and varying natural body. This notion is confronted with the vision of the agronomists, chemists or geologists before to get established thanks to a very effective diffusion of the Russian writings and the parallel emergence of similar theories in Germany and in the United States. In this thesis, I propose a historical and epistemological study of the context, actors and drivers of this change in soil science for the period 1883-1910.

In this respect, I identify the context in which soil science is situated at the beginning of our study period. I define the previous works, and the contradictions in the existing theories as well as the conditions of the emergence of Russian school ideas. In a second part, I draw up an inventory of the methods used in soil science. What are the daily tools of soil scientists? I continue with a focus on the process of reasoning employed and the role of the hypothesis. Finally, I analyse and conclude on the lexicon of two texts, chosen to represent two schools of divergent thoughts.

I show that soil science initiated its transformation in the Russian school at first, but the rapid evolution of the theory originated from the joint contribution of methods and reasoning inherited from agricultural chemistry and geology. These two disciplines, after a short period of opposition, have also helped in developing soil science from a conceptual and methodological point of view.

Index

1	Introduction générale	1
2	État de la question	5
2.1	Un héritage historique	6
2.1.1	Boussingault et l'esprit d'analyse	6
2.1.2	Chimistes et naturalistes anglo-saxons	6
2.1.3	Les Germanophones et l' <i>Allgemeine Bodenkunde</i>	7
2.1.4	L'école russe	9
2.2	Une science qui s'affirme	10
2.2.1	L'essoufflement de l'agrogéologie	10
2.2.2	Énoncer les grandes lois de la nature	11
2.2.3	Inventaire - classement - taxonomie - genèse	12
2.3	Des tendances épistémologiques marquées	13
2.3.1	Un contexte	13
2.3.2	La conviction des rationalistes	14
2.3.3	L'opposition des positivistes	15
2.3.4	La pensée génétique	16
3	Les méthodes dans la science des sols	19
3.1	Un science empirique	20
3.1.1	La comparaison simple et à plusieurs facteurs	20

3.1.2	Les principes de successions	21
3.1.3	Les formes du sol	23
3.2	La place de l'expérimentation	24
3.2.1	Le laboratoire	24
3.2.2	Les bilans	26
3.2.3	Une science pratique	27
3.3	Les échelles	29
3.3.1	Des mécanismes d'échelles	29
3.3.2	Ramener le sol à un état élémentaire pour le comprendre	31
4	Le raisonnement	33
4.1	La démarche	34
4.1.1	La démarche prend place dans un paradigme	34
4.1.2	L'observation et le choix	36
4.1.3	Les interprétations venues des autres disciplines	38
4.2	L'hypothèse	41
4.2.1	Le rôle de l'hypothèse	41
4.2.2	La classification comme hypothèse	43
4.2.3	Déduction ou induction?	44
4.2.4	Réfutation contre vérification	46
4.3	Les logiques de recherche	48
4.3.1	Le réseau et le social	48
4.3.2	La raisonnement en système	50
4.3.3	Un décryptage par omission	51
5	Analyse de textes	55
5.1	Les définitions du sol	56
5.2	Examen quantitatif	58

5.2.1	La méthode	58
5.2.2	Article de Feltz (1887)	58
5.2.3	Premier chapitre de Risler (1894)	60
5.3	Groupes lexicaux et analyse	61
5.3.1	La méthode	61
5.3.2	Article de Feltz (1887)	62
5.3.3	Premier chapitre de Risler (1894)	63
5.4	Comparaison et discussion	64
5.4.1	Un héritage des grandes disciplines	64
5.4.2	Le sens des mots	65
5.4.3	Du langage commun	66
6	Conclusion	67
6.1	Conclusion par chapitre	67
6.2	Conclusion générale	68
	Références	71
	Annexes	73
A	Texte extrait de Feltz (1887)	73
B	Texte extrait de Risler (1894)	101

Introduction générale

Longtemps considéré comme une branche de la géologie, de la chimie, voir de la biologie, il apparaît sans conteste depuis le début du XX^e siècle que l'étude des sols est une science à part entière. Cette évolution n'est pas anodine, elle est souvent attachée aux changements des concepts fondateurs de la science. Ces changements sont le fait de personnages, d'un contexte historique, d'idéologies, d'une possible utilité pratique de la science et enfin d'échanges. Ces éléments de contexte peuvent être étudiés au même titre que la science elle-même. Ces éléments permettent de dresser un état des lieux des pratiques dans une époque, une *épistémologie de la science des sols*.

L'épistémologie et la philosophie des sciences proposent un ensemble de savoirs liés à la connaissance savante. L'épistémologie s'intéresse aux pratiques de construction du savoir et offre une analyse critique afin d'en déterminer sa valeur. Une définition de l'épistémologie est donnée par le *Dictionnaire de la Pléiade* (Piaget, 1967) : « Partie de la philosophie qui a pour objet l'étude critique des postulats, conclusions et méthodes d'une science particulière, considérée du point de vue de son évolution, afin d'en déterminer l'origine logique, la valeur et la portée scientifique et philosophique ». Dans ce mémoire je m'efforce de traiter d'épistémologie historique, c'est à dire que je relie à une perspective historique les éléments du discours sur la connaissance. Pour ce faire, je note l'importance des concepts constitutifs ou structuraux du savoir et la nécessité d'une étude descriptive historique avant l'étude épistémologique.

De nombreux travaux de qualité sont disponibles sur l'histoire de la science des sols. Citons les deux ouvrages de référence sur le sujet, l'un Français écrit par J. Boulaine (Boulaine, 1989), l'autre Russe écrit par I. Krupenikov (Krupenikov *et al.*, 1993). Ces derniers fournissent une vision historique générale de la science des sols, avec chacun une vision plutôt orientée vers les écrits disponibles dans leur langue respective. En complément, de nombreux articles existent sur des sujets variés. Certains sont le fait d'historiens (p.ex Moon (2018)), d'autres de pédologues fournissant une vision de leur sujet d'étude. Ces derniers articles sont le plus souvent exclus de mon analyse car ils fournissent un travail très limité du point de vue méthodologique (p.ex. Brevik et Hartemink (2010)). En épistémologie de la science des sols, peu de références existent. Notons l'excellent travail d'épistémologie de Chatelin (1979) avec de nombreux exemples sur les sols tropicaux. L'épistémologie de la science des sols reste

largement inexplorée et je trouve de fait les notions d'épistémologies nécessaires dans les ouvrages de références ou dans des études connexes en géologie ou biologie.

Pourquoi vouloir faire une recherche épistémologique sur la science des sols ? L'épistémologie en elle-même n'a pas de rôle sur l'avancement des sciences mais elle présente un intérêt certain (voir [Granger \(1992\)](#)). Premièrement, l'épistémologie met en lumière « la signification de l'œuvre scientifique. C'est-à-dire d'explicitier des relations non immédiatement apparentes entre concepts ; de discerner le rapport des connaissances parcellaires à des totalités potentielles, peut-être même seulement virtuelles et irréalisables en fait, mais qui fournissent un moteur et donnent un sens à la connaissance scientifique. »¹ Deuxièmement, l'épistémologie offre la possibilité d'étudier des « organisations de concepts, qu'elles soient achevées ou imparfaites, des difficultés, ou obstacles, ou incohérences, des ouvertures, des points "sensibles". »² C'est à dire que l'épistémologie a pour finalité de comprendre le moteur et le cheminement de la science. Un rôle qui ne saurait être attribué à une philosophie qui, à défaut de comprendre le moteur d'une science, s'efforcerait de la comparer avec ses contemporaines.

Hier comme aujourd'hui la science des sols est le fait de plusieurs écoles de pensées qui se confrontent et se complètent. Il serait trop ambitieux de dresser une épistémologie globale de la science des sols dans un simple mémoire. De plus, il ne serait pas judicieux de commencer par la finalité lorsque une introduction épistémologique de la science des sols est inexistante. Pour restreindre mon étude, je note que de nombreux auteurs estiment que la science des sols que nous connaissons actuellement est le fruit d'un changement majeur, intervenu à la fin du XIX^e siècle. Ce changement se serait produit sous l'action d'un homme, V.V. Dokouchaev, ou du moins d'une école de pensée venue de Russie. Celle-ci se serait confrontée à d'autres écoles, françaises, allemandes et anglo-saxonnes avant de s'imposer. Comment s'est effectuée cette transformation ? Quelles en sont les causes, les acteurs, les moteurs et le contexte ? Comment cette nouvelle école a imposé ses idées ? Quelles incohérences ont été résolues par la nouvelle théorie de Dokouchaev ? Enfin, je note que le contexte scientifique de la fin du XIX^e siècle est particulièrement fécond et complexe pour les sciences naturelles. Non sans amorcer le second chapitre, les points majeurs qui rendent ce sujet d'étude pertinent sont les suivants :

- (a) La diffusion des idées de Charles Darwin, Dimitri Mendéléev et Charles Lyell. Dans la fin du XIX^e siècle, l'influence de ces trois scientifiques est profonde. Darwin et Mendéléev montrent la force prédictive d'une théorie, pouvant rendre compte des événements observés et même prédire ceux qui ne l'étaient pas encore. Lyell et sa théorie de l'uniformitarisme a montré que les processus qui ont formés les roches se produisent encore. La puissance d'une théorie et les longs commentaires qui y ont été associés ont certainement provoqué ou influencé la recherche en science des sols.
- (b) La volonté de classification des sols. La fin du XIX^e voit l'effet des grandes classifications telle que celle de Mendéléev. La science des sols se rapproche de cette tendance avec un essai de classification générale des sols sur une base scientifique ([Krasilnikov](#)

1. [Granger \(1992, p. 40\)](#).

2. [Granger \(1992, p. 40\)](#).

et al., 2010), d'abord à une échelle locale dès le milieu du XIX^e siècle, puis à une échelle régionale et globale à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle.

- (c) Le concept de sol est revisité. De nombreuses publications et ouvrages émergent dès le milieu du XIX^e siècle. Celles-ci ne traitent pas seulement le sol dans ses propriétés édaphologiques, mais s'intéressent aussi à sa formation, sa distribution géographique et à son évolution. C'est une vision radicalement différente de celle ayant pour but l'utilisation du sol pour les cultures et la production alimentaire.
- (d) Une période de débats. De fait, plusieurs écoles s'affrontent et discutent sur la formation du sol et sur son évolution. Certains voient le sol comme une simple dégradation de la roche-mère, d'autres comme un corps dont les propriétés sont principalement chimiques, et enfin certains qui comprennent le sol comme un corps naturel en évolution avec son environnement direct. Je peux y rajouter les conceptions des biologistes du sol (p.ex. Darwin) qui considèrent la faune du sol et la végétation comme éléments majeurs de l'évolution des sols. Ces différentes écoles ne sont pas cloisonnées.

Ce mémoire porte sur la période 1883-1909. Je m'autorise cependant des digressions sur les années qui précèdent et les années qui suivent lorsque le détail du récit le demande. La date de 1883 est choisie comme date de début de mon étude. Elle correspond à l'année où Dokouchaev défend sa thèse en géognosie et minéralogie à l'Université de Saint-Petersbourg. Cette thèse traite du chernozem russe et de son développement. Les idées qu'il propose sont novatrices et ont un fort retentissement. Selon Dokouchaev, le chernozem se développe comme un corps naturel indépendant. Par interpolation, il montre comment le sol est lié aux lois du déterminisme.

La deuxième date, l'année 1909, correspond à l'organisation de la première conférence internationale d'agrogéologie à l'institut royal de Hongrie. Elle réunit de nombreux savants Russes et Allemands, sur l'initiative de deux scientifiques hongrois. Cette fin de période étudiée correspond aussi approximativement à la fin de la tenue du comité scientifique en 1911, qui a orchestré les recherches agronomiques en France. Ce comité a été instauré en 1905 sous la présidence du président de la république Loubet. D'une manière plus générale, les années 1910 sont marquées par la publication d'un grand nombre d'ouvrages qui tendent à accepter les conceptions de pédologie génétique évoquées à partir de 1883.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une vision épistémologique de l'évolution de la science des sols à la fin du XIX^e siècle. Dokouchaev propose une nouvelle vision de la formation et de l'évolution des sols et celle-ci va se diffuser et se confronter avec des écoles de pensées existantes.

Pour ce faire, je dispose de plusieurs sources primaires. Premièrement, les ouvrages des auteurs que je mentionnerai sont généralement facilement accessibles. Il s'agit des ouvrages, entre autres, de Muller, Ramann, Hilgard, Grandeau, Shaler. Ils sont étudiés dans leur langue de publication, c'est à dire en Anglais, Allemand ou Français. De plus, les articles scientifiques en Russe possèdent parfois une traduction qui visait à les publier dans des journaux d'éditions francophones. Une seconde source importante se trouve dans les compte-rendus des sociétés, telles que *le Bulletin de la société belge de Géologie, Paléontologie et d'Hydrologie* ou le *Yearbook of the United-States Department of Agriculture*. Je dispose des publications scientifiques de journaux, telles que *les Annales de la science agronomique française*

ou étrangère, plusieurs éditions du *Journal d'agriculture pratique, de jardinage et d'économie domestique* et enfin les *Annales de Géographie*, lesquels publient les dernières nouveautés sur les sciences agronomiques ou géographiques de manière générale. Cependant, je reconnais qu'une part non-négligeable des sources en Russe m'est inaccessible, soit parce qu'elles sont introuvables dans le temps que je dispose, soit parce qu'aucune traduction n'est disponible. Pour résoudre ce problème je dispose de plusieurs solutions, telles que l'utilisation des quelques traductions disponibles, des compte-rendus des sociétés, l'utilisation des sources secondaires qui ont traduits et analysées certains écrits russe, et finalement des sources secondaires d'histoire de la science des sols. Dans les sources secondaires je possède de nombreux articles qui s'échelonnent sur la période 1920 jusqu'à de nos jours. De plus, les deux ouvrages de référence précédemment évoqués me sont accessibles. Je reconnais que certains auteurs peuvent avoir été omis de l'analyse et je ne prétends pas avoir exhaustivement décrit tout les ouvrages. Cependant je crois que j'ai couvert les tendances majeures d'une époque et de ses acteurs.

Ce mémoire est organisé en six chapitres en incluant ce chapitre d'introduction. Les chapitres 2-5 comprennent un résumé individuel en première page. Dans le Chapitre 2 je fais un état des lieux des acteurs et des écoles de pensées dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Le Chapitre 3 décrit les méthodes employées pour l'étude des sols par les acteurs évoqués dans le Chapitre 2. Le Chapitre 4 fourni une analyse sur le raisonnement et l'argumentation dans la science des sols, avec un regard particulier sur l'utilisation de l'hypothèse. Enfin, Chapitre 5 étudie le lexique de deux textes pris en exemple. Ces deux textes représentent deux écoles de pensées majeures dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Chapitre 6 conclut ce mémoire et indique les lacunes et limites du présent travail.

État de la question

L'importance du contexte historique est signalée dans de nombreux ouvrages d'épistémologie. La production scientifique n'est pas le résultat du savant seul, mais d'une époque, d'un espace géographique, de fréquentations et d'influences. Dans ce chapitre, je propose un aperçu du contexte historique et épistémologique caractéristique de la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Il ne s'agit pas de procurer un récapitulatif exhaustif des faits et individus, mais bien de reconnaître les tendances générales de l'avènement et du développement d'une discipline scientifique.

Pour ce faire, j'identifie les travaux antérieurs à notre période historique qui, d'un point de vue méthodologique ou conceptuel, ont pu servir de guide pour les savants de la fin du XIX^e siècle. Il s'agit des individus et des espaces géographiques, mais aussi des écoles de pensées qui, je le montrerai par la suite, ont joué un rôle décisif dans la science des sols. Mon propos est composé de quatre sous-parties, en référence à quatre écoles de pensées majeures du XIX^e siècle. C'est l'objectif de ma première section. Dans un second temps, je me concentre sur les circonstances d'un changement de concepts dans la science des sols. Je montre comment la naissance de la science des sols se fait par l'affirmation de certaines notions et par le déclin d'autres. Enfin, je propose une classification épistémologique simple de la science des sols, basée sur la dichotomie entre deux options méthodologiques. Celles-ci me sont suggérées par Bachelard (1934) et illustrées par de nombreux exemples.

Je montre que les multiples échanges de méthodes entre scientifiques des différentes écoles, ainsi que les nécessités pratiques d'une amélioration de l'agronomie, ont permis le développement d'une nouvelle théorie sur la formation des sols. Cette dernière s'est heurtée à des théories contraires du point de vue conceptuel (l'agrogéologie) ou méthodologique (opposition rationalistes-positivistes).

2.1 Un héritage historique

2.1.1 Boussingault et l'esprit d'analyse

La science des sols et l'agronomie en France au XIX^e siècle sont dominées par les travaux de Jean Baptiste Boussingault (1808-1887). D'abord chimiste puis géologue, Boussingault accepte un poste de professeur à l'École des Mines de Bogotá en 1822. Il se forme à l'agronomie lorsque le besoin de ravitaillement des mineurs en zone isolée exige de mettre sur pied des cultures. Lors de son retour en France, il est nommé Doyen de la faculté des sciences en 1836, puis délaisse peu à peu la géologie pour se consacrer presque exclusivement à la chimie agricole. Il acquiert un domaine en Alsace où il réalise des expériences agronomiques qui lui servent de support pour la rédaction d'une cinquantaine de notes scientifiques. Ses travaux en agronomie portent en partie sur le rôle des substances minérales et de l'azote dans l'alimentation des végétaux. Il démontre par ses cultures en champs que contrairement aux idées de Liebig (voir Chapitre 2.1.3), les plantes n'absorbent pas directement l'azote de l'air.

La particularité du travail de Boussingault est l'utilisation de plusieurs échelles d'analyses ; du laboratoire à la parcelle agricole, mais en se référant aussi à l'échelle géographique ou microscopique (Boulaine, 1994). Dans la deuxième partie du XIX^e siècle, Louis Grandeau (1834-1911) dirige l'inspection générale des stations agronomiques. C'est un agronome prolifique qui étudie les chernozems en collaboration avec l'école russe (voir section 2.1.4). Les travaux de Grandeau traitent du problème de la fertilité des sols en rapport avec la quantité d'humus. Pour ce faire, il combine l'approche minérale et l'approche chimique. Il est en contact régulier avec Liebig avec lequel il discute les résultats de ses expérimentations. Il organise le congrès international des stations agronomiques en 1881 et 1889 et fonde en 1884 les *Annales de la Science agronomique française et étrangère*. Ces travaux seront expliqués plus en détail lors des chapitres suivants.

L'approche que privilégie Grandeau est celle d'un chimiste du sol, proche et héritier des méthodes de Boussingault. Cette conception est différente de celle des idées alors défendues par l'école russe et de leur approche globaliste du sol. Celle-ci n'est pas acceptée en France dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, même si elle est présente dans certains ouvrages, comme par exemple les travaux d'Eugène Risler (1828-1905) dont les tomes de sa *Géologie Agricole* sont publiés entre 1884 et 1887. Ces derniers entrent en contradiction avec les conclusions de l'école russe, bien que les deux approches soient globalistes. Risler estime que la carte géologique est nécessaire et surtout suffisante à la compréhension des sols de France et que, contrairement à l'école russe, le climat ne joue qu'un rôle secondaire et limité. Il est soutenu par une large majorité d'agronomes et de géologues, dont Adolphe Carnot (1839-1920). Les cartes agronomiques française d'alors sont édités à plusieurs échelles mais sans commune méthode et sans lien entre elles.

2.1.2 Chimistes et naturalistes anglo-saxons

La chimie minérale a fait de grandes avancées dès le début du XIX^e siècle en Angleterre. En 1837, la *London Royal Society* avait expressément demandé au savant Français J.B. Du-

mas et Allemand J. von Liebig de produire un ouvrage sur les rapports de la chimie et de l'agriculture, publié en 1840 finalement sans l'aide du Français. En 1843 est créé *the Rothamsted Experimental Station* par John Bennet Lawes (1814-1900). Celui-ci, botaniste de formation, expérimente depuis une dizaine d'années déjà les effets d'engrais sur la croissance des plantes en pots, puis en champ deux années plus tard. Son objectif est d'étudier la nutrition des plantes. Il dépose ainsi un brevet en 1942 avec Joseph Henry Gilbert (1817-1901) pour « la fabrication de superphosphates par l'action de l'acide sulfurique sur des phosphates naturels » (Boulaine, 1984) puis lègue une partie de sa fortune en 1889 pour permettre la pérennité de la station. Lawes et Gilbert dominent la science des sols à travers la chimie minérale pendant près de 60 ans. Leurs expériences se concentrent sur l'action nutritive des minéraux sur les plantes, ainsi que sur la possibilité pour l'azote de l'air d'être absorbée directement par les plantes. Ils rejoignent en ce sens les travaux du savant français Boussingault.

Les naturalistes anglais remarquent rapidement que l'action chimique seule était trop restrictive car elle effaçait le rôle tenu par la faune dans la formation de la terre végétale, et que cette dernière n'était pas suffisante pour garantir l'apport hydrique nécessaire aux végétaux (Robin *et al.*, 2007). Une contribution importante est apportée par Charles Darwin (1809-1882), naturaliste, zoologiste et botaniste. Ces nombreux récits de voyage à bord du *Beagle* (1831-1836) comportent des passages sur le sol et l'érosion (Feller *et al.*, 2000). C'est principalement dans son ouvrage publié en 1882 et traduit en français sous le nom de *Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale* (Darwin, 1882) que Darwin décrit l'action de la faune dans la formation des sols, la « pedoturbation » (Feller *et al.*, 2006), ce qui lui vaut d'utiliser le terme de terre animale plutôt que de terre végétale. Il rend compte de plusieurs expériences utilisant des coupes et schémas avec une notation positionnelle par opposition aux notations d'horizons, comme dans l'école russe. Toutefois, il exprime une vue dynamique du sol, qui se rapproche de celle de l'école russe mais qui est aussi éloignée de ses contemporains Anglais.

En Grande-Bretagne encore, Robert Warington (1838-1907) est chimiste à Rothamsted de 1876 à 1891. Il écrit *The chemistry of the farm* et *Physical properties of soils* en 1881 et 1900 respectivement. Ce sont deux ouvrages qui marquent les scientifiques anglo-saxons. Entre autre, Warington montre que la nitrification dans les sols est d'origine bactérienne (Boulaine, 1996, p. 252). Aux États-Unis, Eugen W. Hilgard (1833-1916) améliore les méthodes d'étude des échantillons de sol au laboratoire, en reprenant partiellement certaines méthodes de Grandeau. Il s'oppose profondément à d'autres scientifiques états-uniens sur les sols (Boulaine, 1989, p. 129). En particulier, Hilgard a une conception globaliste des sols, lorsque les approches « fragmentistes » (défendu par le *Soil Survey*) sont alors majoritaires. En conséquence, les écrits de Hilgard sont lus principalement par ses pairs à l'étranger.

2.1.3 Les Germanophones et l'*Allgemeine Bodenkunde*

Les études détaillées des scientifiques allemands du XIX^e siècle entraînent de nombreux progrès dans la connaissance des sols. Il s'agit, le plus souvent, de chimistes, minéralogistes ou agronomes qui ont d'abord abordé l'étude des sols à travers leurs disciplines respectives.

C'est le cas du chimiste Carl Sprengel (1787-1859) qui publie une *Bodenkunde* (=étude générale des sols), appuyée de ses expériences personnelles. Sprengel reconnaît dès 1820 les intérêts des substances minérales pour la nutrition des végétaux. Il s'oppose aussi aux conceptions du sol telles que formulées alors par les géologues tel que Risler (voir section 2.1.1) ou Fallou. Pour lui, le sol est un système dynamique, résultant de la dégradation de la roche mère par de nombreux acteurs physiques et chimiques. Il soutient que la valeur du sol dépend d'abord de la dynamique de la matière organique en fonction du régime écologique, et donc du climat.

Contemporain et connaissance de Sprengel, Justus von Liebig (1803-1873) est un chimiste reconnu. Sa contribution dans l'agronomie se caractérise par la publication d'un ouvrage *Principes de chimie agricole* (1856), et par la spécification de l'alimentation générale des plantes, en application stricte du principe de Lavoisier (1743-1794) : « rien ne se perd, rien ne se crée ». Il détaille une théorie minérale en une suite de 50 propositions qui décrivent le mouvement et le cycle de certaines substances tel que le CO₂, N, P, K, Ca, Mg, S ou Fe. Il démontre par l'expérience la validité de ses lois. Pour plus de détails, le lecteur est redirigé vers [Dumas \(1965\)](#).

Une contribution majeure germanophone du milieu XIX^e est faite par Albert Fallou (1794-1877) qui en 1862 publie son ouvrage utilisant le mot pédologie (= *Allgemeine Bodenkunde*) par opposition aux écoles d'agrogéologie allemande. Fallou définit le sol comme un corps naturel, avec un point de vue géologique apparent. Pourtant, ces ouvrages ne comportent aucun chiffre ou données, le sol est théorisé. ([Joffe, 1949](#)) précise :

Credit is due Fallou for the attempt to treat soil science as an independent science and soil as a separate formation [...] The views of Fallou appear modern, and are in line with the scientific appreciation of the soil as a natural body.¹

Les études théoriques de Fallou sont appliquées par P.E. Müller (1840-1926) qui rapporte à partir de 1875 des analyses sur les podzols du Danemark. Il montre l'enrichissement en aluminium des horizons spodiques. En outre, il définit en 1880 les termes de classification de l'humus en *mor*, *moder* et *mull* qu'il étudie sur un profil.

Plus connu, Emil Ramann (1851-1926) est très proche de la pensée de l'école russe. Il publie plusieurs ouvrages, parmi lesquels *Forftliche Bodenkunde und Standortslehre*² et *Bodenkunde*³ en 1893 et 1905. Ramann se réfère fréquemment à l'école russe, en particulier à Dokouchaev, [Ramann \(1911, p. 4\)](#) écrit :

Einen großen Fortschritt erfuhr die Bodenkunde durch die Erkenntnis der Abhängigkeit der Bodenbildung von klimatischen Einflüssen, [...] die von von Dokutschajew in Rußland erkannt, von Sibirzew in ein System gebracht wurden. Erst hierdurch verliert die Bodenkunde ihren örtlichen und damit kleinlichen Charakter und weitet sich zu einer die Erde umspannenden Wissenschaft.

1. Traduction : *Crédit est dû à Fallou pour sa tentative de traiter la science du sol comme une science indépendante et le sol comme une formation à part entière [...] La vision de Fallou paraît moderne, et est en ligne avec l'appréciation scientifique du sol en tant que corps naturel.*

2. Science des sols forestière et importance du lieu.

3. Science des sols.

Namentlich in Rußland hat diese Richtung mächtig fördernd gewirkt und der Bodenkunde eine selbständige Entwicklung gegeben, der die übrigen Länder keine gleichwertigen Leistungen entgegensetzen können.⁴

Pourtant, les classifications des sols fournies par Ramann restent largement influencées par la géologie (rapporté par [Krupenikov et al. \(1993\)](#)).

2.1.4 L'école russe

L'école russe de la science des sols en général et l'équipe de Saint-Pétersbourg en particulier ont joué dans la deuxième moitié du XIX^e siècle un rôle de contrepoids aux conceptions allemandes et française d'agrogéologie et de chimie agricole. La fin du XIX^e siècle voit apparaître en Russie une nouvelle génération de savants qui s'appuient sur les expériences françaises et allemandes, ainsi que sur les forestiers, cartographes et chimistes russes. Lorsque plusieurs savants russes s'attellent à l'étude des sols, c'est d'abord pour répondre à un problème à l'ordre du jour. Il s'agit d'exploiter les grandes plaines d'Ukraine et d'en rendre une partie propice aux plantations d'arbres afin de palier au manque aiguë de bois dans cette période pré-industrielle ([Margulis, 1954](#); [Krupenikov et al., 1993](#)). Ces plaines sont connues depuis longtemps pour leur fertilité et leur couleur noire due à l'accumulation de l'humus sur une profondeur d'au moins 50 cm. Elles sont appelées « steppes à chernozems », littéralement « terre noire ».

Du reste, les sécheresses de 1873 et 1875 dans le sud de la Russie provoquent une situation particulière et mettent en péril les exportations de céréales pour le compte des négociants de Saint-Pétersbourg ([Leroy-Beaulieu, 1880](#)). C'est en conséquence que de nombreux savants travaillent à partir de 1875 sur le sujet de l'humus dans les chernozems. Ces derniers constituent un groupe hétérogène parmi lequel se trouve Pavel Andreievitch Kostychev (1845-1895), forestier, chimiste du sol et microbiologiste. Dès 1875 Kostychev vérifie les conclusions de Grandjean sur la capacité de l'humus à fournir de l'azote. Il publie ses travaux sur l'humus dans les chernozems en 1881 et 1886. Ses travaux portent sur l'effet de la température, de l'altération et des propriétés physico-chimiques du sol. En particulier, il considère l'accumulation de l'humus dans les chernozems comme une résultante des caractères physico-chimiques hérités de la roche mère. En tant que microbiologiste il souligne l'importance de la physiologie des végétaux inférieurs et montre la présence de produits synthétisés par les bactéries ([Feltz, 1887](#)).

À cet égard, Kostychev s'oppose vivement aux écrits du jeune Vassili Vassilievitch Dokouchaev (1846-1903) qui défend l'idée que le climat est un facteur primordial dans l'accumulation de l'humus et de la variabilité spatiale des chernozems. Ce dernier publie une imposante littérature en 1883 où il détaille son concept de sol comme corps naturel indépendant et variant, au même titre que les autres règnes de la nature selon Linné : le végétal, l'animal et le minéral. Cette conception est d'autant plus importante qu'elle se dégage de toute pensée utilitaire

4. Traduction : *La science du sol a connu un grand progrès par la connaissance de la dépendance de la formation des sols aux influences climatiques, lesquelles contributions ont été faites par Dokouchaev en Russie, puis portées en tant que système par Sibirtzev. Ce n'est qu'alors que la science du sol perd son caractère local et s'étend à une science couvrant la terre entière. En Russie en particulier, cette direction a eu un effet puissant pour donner à la science du sol un développement indépendant, auquel aucun autre pays n'a su faire de même.*

du sol, en opposition aux orientations jusqu'alors édaphologiques (le sol en tant qu'habitat des végétaux) ou techniques (le sol en tant que matériau) des agronomes (Monnier, 1966).

2.2 Une science qui s'affirme

2.2.1 L'essoufflement de l'agrogéologie

L'agrogéologie ou géologie agricole est une sous-discipline de la géologie qui s'intéresse à la dimension spatiale des sols. Ce dernier est un substrat dépendant de la dégradation de la roche mère, et lié chimiquement à cette dernière. Ce courant de pensée s'exprime dès 1840 avec la publication par Elie de Beaumont (1798-1874) des cartes géologiques de France. Celui-ci écrit que (Dufrenoy et de Beaumont, 1848, p. 256) « la nature géologique [...] se manifeste encore par l'influence que la nature de la roche exerce sur la terre végétale ». C'est un courant d'abord très marqué Outre-Rhin puis qui se répand largement en France à la fin du XIX^e siècle, où l'étude des sols est pourtant traditionnellement entre les mains des chimistes. Du reste, la démarche des chimistes et des agrogéologues est la même, à savoir la science des sols se réfère à une science principale : géologie, chimie, biologie.

En France à la fin du XIX^e siècle, E. Risler porte le courant des agrogéologues à la tête de l'Institut National Agronomique de Paris. Il publie entre 1884 et 1897 quatre tomes de *Géologie agricole*, où il y examine les milieux et les sols en ordonnant son analyse sur les structures géologiques. Dans l'introduction de son volume 1, Risler prévient (Risler, 1894) :

Il y a sable et sable. Il y a toutes sortes d'argiles. Il y a également toutes sortes de calcaires la craie ne ressemble pas au calcaire corallien et le calcaire corallien ne ressemble pas davantage au calcaire grossier des environs de Paris. Les terres qui dérivent des uns ou des autres diffèrent par leur composition chimique comme par leurs propriétés physiques ; elles n'ont ni la même profondeur, ni le même sous-sol.

L'approche pédologique est claire mais l'apport de la géologie agricole permet de généraliser et de systématiser des observations agronomiques, et de comprendre la nature et la diversité spatiale des sols. Risler s'oppose à la création des cartes des sols, il constate que (Boulaine, 1989) : (i) les cartes des sols existantes sont très compliquées, mais incomplètes, (ii) celles-ci ne sont pas assez fournies pour des utilisations pratiques, (iii) elles ne sont pas fonctionnelles pour les cultivateurs, car ceux-ci possèdent bien plus de connaissances que la carte ne leur en donne alors. Risler s'oppose en ce sens aux visions plus globalistes des agronomes français, telle que Grandeau, ou étranger, telle que Dokouchaev. Pourtant, l'approche défendue par les géologues a de gros inconvénients. Legros (2012) observe que certains auteurs mentionnent que la genèse de certains sols africains, de plusieurs millions d'années, ne peut s'expliquer par la géologie :

Les terres sont le résultat de transformations biochimiques si longues et si abouties qu'on ne distingue pas facilement quelles roches leur ont donné naissance.

Du reste, la vision globaliste du sol -la pédologie, paraît alors difficilement applicable en France où le climat est plutôt homogène lorsque la géologie est très contrastée. Alors que

l'agrogéologie est un courant majoritaire en France et en Allemagne à la fin du XIX^e siècle, des idées nouvelles arrivent de la Russie et de l'équipe de Saint-Petersbourg. En ce sens, les conceptions de Risler ne peuvent que difficilement s'appliquer aux steppes d'Ukraine et de l'ouest de la Russie, tant par l'homogénéité des couches géologiques que par la diversité des climats. De nouvelles solutions sont proposées.

2.2.2 Énoncer les grandes lois de la nature

Depuis les années 1840, le problème du chernozem russe mobilise les savants qui essaient de préciser le concept de la « terre noire » fertile des steppes russe. Ce problème est abordé par Dokouchaev à partir de 1877. Les résultats qu'il présente sous forme d'une thèse de doctorat, en 1883, ont un large retentissement local et international. Dokouchaev a l'idée de tracer une carte isohumique, -une carte qui différencie les sols par leur teneur en humus, pour aider son travail de terrain. Il remarque alors que les zones d'égales teneur en humus se répartissent sur une zone de même latitude. Il en déduit sept zones pour la Russie (Margulis, 1954), ce qui lui fait conclure l'influence du climat sur la formation des sols à une échelle continentale. C'est une opposition franche aux idées des agrogéologues français ou allemand, idées selon lesquelles la roche mère est l'unique explication de la variabilité spatiale des sols. Dokouchaev continue ses observations durant trois années de suite, de 1898 à 1900. Il affine sa méthode en incluant la végétation, les agents biologiques, les caractéristiques topographiques locales, la durée et la géologie comme facteurs de la formation des sols. Il réfute un chiffrage quantitatif simple de chacun des facteurs, bien que plusieurs de ces disciples donnent un poids pré-pondérant au couple climat-végétation (Krupenikov *et al.*, 1993). Dokouchaev différencie les échelles spatiales, comme pour rendre sa méthode de classification applicable de manière globale. Par exemple, la variabilité spatiale d'un sol d'une parcelle de champ n'est pas liée au climat mais à des possibles différences de la roche sous-jacente. Au contraire, la variabilité spatiale des sols à une large échelle se rapporte d'abord au climat, et dans une moindre mesure à la végétation.

Dokouchaev s'entoure d'élèves qui répandent ses idées dans le monde entier, en premier lieu en Russie, dans l'école de Saint-Petersbourg. Il confie une chaire de pédologie nouvellement créée en 1892 à son disciple Nicolas Mikailovich Sibirtzev (1860-1899). Ce dernier théorise les conceptions de Dokouchaev sur la formation des sols et il influence une nouvelle génération de pédologue par ses cours. Lors de l'exposition universelle de 1900 à Paris, Dokouchaev publie son dernier texte en français : *Zones naturelles des sols, zones agricoles, sols du Caucase*. Les nouvelles conceptions de la distribution des sols énoncées par Dokouchaev sont nombreuses. Dokouchaev reconnaît que la formation des sols obéit aux lois du déterminisme par la conjugaison d'un grand nombre de facteurs environnementaux interdépendants. Il repousse la démarche purement chimique ou agrogéologique pour faire du sol un corps indépendant. Son autre grande notion est celle de zonalité climatique. Bou-laine (1989) note (d'après Krupenikov *et al.* (1993)) que Dokouchaev décrit la formation du sol comme « le résultat immédiat d'une interaction séculaire et très étroite en l'eau, l'air, la terre d'une part, les organismes végétaux et animaux, l'âge du pays d'autre part ». Le sol est à cet égard nécessairement zonal. Plus de détails sur les méthodes et le raisonnement sont fournis dans les prochaines sections.

À l'étranger, la diffusion des idées russes se fait de manière contrastée (Moon, 2018). En France, les idées de Dokouchaev passent inaperçues jusqu'à l'exposition universelle de 1899. Peu de citations des travaux russes sont retrouvés dans *Les annales de la science agronomique* dirigées par Grandeau. Certains géologues français tels que Emmanuel de Margerie ou Stanislas Meunier sont enthousiastes des travaux de Dokouchaev (Moon, 2018, p. 4) et les décrivent précisément (De Margerie et Raveneau, 1900). Il est possible de relever un article sur les travaux de Kostychev. Celui-ci cite Dokouchaev mais ne partage pas ses idées. En Belgique, L.Y. Levinsson-Lessig, disciple de Dokouchaev, diffuse les idées de ce dernier et participe à la fondation de la société belge de pédologie. Il y publia pendant plusieurs années des comptes-rendus et des analyses de pédologues russes. J'ai aussi montré précédemment que Ramann cite Dokouchaev et lui attribue de grandes qualités scientifiques, sans pour autant changer sa classification des sols basée sur la dégradation de la roche par le climat (Krupenikov *et al.*, 1993, p. 200).

2.2.3 Inventaire - classement - taxonomie - genèse

Dokouchaev et ses pairs russes fournissent les bases d'une nouvelle science. Ils différencient des processus distincts dans un espace pourtant géographiquement continu. Par exemple, le chernozem et le podzol décrit dans la thèse de Dokouchaev sont le fruit de processus naturels indépendants. Chatelin (1979, p. 25) signale que la pédologie, à l'instar des sciences du vivant du XIX^e siècle n'a pas bénéficié « d'un long passé d'observation et de classement. Elle a entrepris d'un même mouvement les premiers inventaires, l'établissement d'une taxonomie, l'analyse des mécanismes et des genèses ». Pour ce faire, c'est l'entourage immédiat de Dokouchaev qui approfondi, transmet, propage ses idées et réalise les inventaires, les cartographies et les classifications. En identifiant les grandes zones de sols, Dokouchaev pose les bases d'une possible classification des sols en fonction de leurs caractères. Il en fait une ébauche qui est complétée et amendée par ses étudiants. Il a une vue globalisante qui lui permet de replacer les sols dans leur milieu naturel. Legros (2012) explique :

Ses premiers essais de classification des sols mentionneront-ils, parallèlement aux caractères du climat, des roches et de la végétation, les représentants les plus caractéristiques de la faune : sols à aurochs, ours, élans ; sols à chameaux, dromadaires, etc. Par la suite, l'auteur en viendra à ne plus considérer que la faune du sol.

Du reste, Dokouchaev observe que certains facteurs locaux sont prépondérants dans la formation des sols et masquent l'influence du climat.

Ce problème conceptuel est réglé par Sibirtzev qui décrit dans son ouvrage *Pochvovedénie* -Pédologie en russe, les notions de sol zonaux, azonaux, et intrazonaux. Les sols zonaux obéissent à la zonalité climatique, les sols azonaux obéissent à des caractéristiques locales autres que le climat (sols grossiers, sols squelettique, sols alluviaux), et les sols intrazonaux sont liés à des conditions particulières (sols salés, sols marécageux, sols humiques carbonatés). Autre disciple de Dokouchaev, A. Ferkhmine est l'auteur d'une carte des sols de Russie au 1/2 252 000 publiée en 1900 à l'occasion de l'exposition Universelle à Paris (De Margerie et Raveneau, 1900).

Une contribution majeure vient de Konstantin Glinka (1867-1927), élève de Dokouchaev. Il étend les notions de distribution spatiale des sols -la géographie des sols, et produit la première carte schématique des sols à l'échelle globale. Celle-ci est publiée en 1908 à l'échelle du 1/80 000 000 et inclue 18 unités pédologiques qui varient selon les grandes zones climatiques du globe. Plus d'informations sur la carte de Glinka peuvent être trouvée dans [Hartemink et Bockheim \(2013\)](#). Du reste, de nombreuses classifications sont élaborées durant la fin du XIX^e siècle. Le plus souvent, elles ne provoquent pas de consensus autour de leurs conclusions. Cet aspect est élaboré plus en détail dans le chapitre suivant.

2.3 Des tendances épistémologiques marquées

2.3.1 Un contexte

L'épistémologie contemporaine ne cherche pas dans les sciences une raison unique, indépendante de tout contexte historique. De ce fait, la science des sols de la fin du XIX^e siècle est caractérisée par un certain nombre de modes de pensées, de tendances déterminantes. Tous les savants n'adoptent pas les mêmes convictions méthodologiques, qu'elles soient explicitement formulées ou implicitement induites. C'est ce que C. Darwin décrit dans ses lettres lorsqu'il relate les débats entre géologues de son temps ([Darwin et Seward, 1903](#)). Les uns supportent le besoin de théoriser et de dégager des lois, alors que les autres distinguent clairement les faits de la théorie. Selon ces derniers, les scientifiques sont des observateurs, dont les expériences et descriptions constituent la pièce maîtresse de leur argumentation. Ces deux attitudes face à la science sont aussi tangibles en science des sols. La recherche des causes et lois régissant la formation des sols par l'école russe s'opposent aux démarches purement empiriques et inducto-déductives des traités agricoles des agronomes français. Les scientifiques qui s'attachent aux idées et limitent les expériences du mécanisme de production de la connaissance correspondent aux *rationalistes*. Ceux qui s'en tiennent aux seuls fait d'observations en insistent sur la suspension de tout jugement correspondent à une tendance *positiviste*. Ces deux tendances sont traitées de manières variées par les philosophes. J'utilise les termes tels que formulés par Gaston Bachelard dans [Bachelard \(1934\)](#).

En ce sens, le rationalisme apparaît comme une doctrine qui considère que la connaissance provient essentiellement de l'usage de la raison et du raisonnement analytique. Pour un esprit rationaliste, les faits sont complétés par les théories, lesquels sont un modèle vrai du réel. L'expérience peut être utilisée, modestement, comme vérification de ce qui a été déduit. L'utilisation de schémas causaliste et déterministique est fréquent. D'une manière opposée, le positivisme réfute l'utilisation de schémas théoriques pour l'explication de la nature (du réel). L'expérience et sa répétition sont à la base de la démarche positiviste, parce que ces dernières corrigent constamment les idées scientifiques et les théories, pour les mettre en adéquations avec un nombre de fait toujours plus grand et s'approcher du réel.

2.3.2 La conviction des rationalistes

Il n'est pas possible de trouver une conscience et revendication des orientations épistémologiques chez les savants et pédologues de la fin du XIX^e siècle. Pourtant, la classification des sols offre une opportunité de découvrir une option clairement rationaliste, tant par la volonté de découvrir des propriétés encore inconnues que par la revendication du sol comme « entité naturelle » complexe. Une influence certaine sur l'école russe est la classification périodique des éléments élaborée par Dimitri Mendéléév (1834-1907). Ce contemporain et professeur de Dokouchaev propose une classification complète des éléments naturels. Celle-ci se révèle avoir un fort pouvoir de prévision lorsque de nouveaux éléments apparaissent. Cette volonté de structuration de la connaissance est très présente chez Dokouchaev, puis chez Sibirtzev. Dokouchaev groupe les sols « en système » de par leurs propriétés et leurs variétés. Ce n'est pas une classification d'agronome mais de naturaliste tant les sols sont envisagés en tant que corps naturels. Trois classes et de nombreuses sous-classes regroupent les conditions de genèse et d'évolution des sols de Russie. Cette classification est modifiée par Sibirtzev. Pour ce dernier, les facteurs de formation des sols, s'unissent, s'harmonisent pour imprimer une direction déterminée, et donner un type de sol constant dans ses traits essentiels sous l'action de mêmes facteurs. Margulis (1954) rend compte des écrits de Sibirtzev :

Ce type de pédogenèse [des sols à chernozems] est conditionné par l'existence à la surface du globe d'un ruban de steppe herbeuse avec ses particularités physico-géographiques, géologiques et biologiques. Partout où une telle bande existe, on assiste à des processus tchernoziomogènes et on trouve des tchernoziomes.⁵

Ainsi se confirme la fonction déterministique des classifications. La capacité des classifications de prévoir se trouve à cet égard loin des positions des positivistes.

L'esprit rationaliste se caractérise aussi par la recherche d'un ordre naturel, c'est à dire l'établissement des grandes lois de la nature. Les Russes encore, généralisent le concept de zonalité climatique des sols. Son extension ne pose pas de problème pour des régions de plaine avec des matériaux pédologique récent. Néanmoins, de nombreuses difficultés adviennent lorsque les particularités locales forment des îlots de sols aux conditions topographiques, hydrographiques et géologiques singulières. Un sol n'est pas conforme aux critères pédologiques lorsque celui-ci ne correspond pas à la disposition schématique et grossière de la zonalité climatique. Ainsi, les sols semi-zonaux salés (solonetz) sont repartis suivant certaines conditions climatiques (précipitations faibles, été chaud) et rentrent dans la famille des kastanozems suivant la classification de Dokouchaev. Le climat pourtant dans les solonetz n'a qu'un rôle secondaire lorsqu'il a paru possible de le relier aux rapport sodium/argile prédominant dans la régularité spatiale de ces sols. L'importance des critères de classification met en évidence la valeur intrinsèque du modèle dans l'approche rationaliste.

Enfin, l'effort pour reconstituer les phénomènes de la nature passe aussi par la création d'un modèle du réel qui explique les processus les plus complexes. À ce titre, Kostychev

5. Différentes formulations existent pour le terme de « chernozem ». Je trouve suivant les auteurs des dérivés tels que « tchernoziome » ou « tschernozième ». J'utilise le mot « chernozem » tel qu'utilisé par Boulaine (1989) pour définir les terres noires de Russie.

développe une première ébauche du profil pédologique, c'est à dire un sol divisé et organisé verticalement. Il définit le podzol par trois horizons A1, A2 et Bh (Kostychev, 1889), lesquels constituent une réplique imagée du sol.

2.3.3 L'opposition des positivistes

La position positiviste s'est souvent construite en opposition et par réaction à la théorisation des rationalistes. Dans la science des sols française de la fin du XIX^e, les recherches se concentrent sur les fonctions édaphologique et techniques du sol. Les titres même des principales revues ne laissent guère la place à l'interprétation : les *Annales de la Science agronomique française et étrangère* ou le *Journal d'agriculture pratique* sont dirigés par Grandeau, les « Annales de Grandeau », et publient des travaux agronomiques quantitatifs, des relations fonctionnelles. De même, Grandeau dans les *Traité d'analyse des matières agricoles* en trois tomes (Grandeau, 1897b) expose sa préférence pour les données chiffrées et les méthodes quantitatives, et fait apparaître les traits d'un esprit positiviste. Son chapitre sur les sols comprend des parties ordonnées chronologiquement « Prise des échantillons », « Analyse mécanique des sols », « Analyse physico-chimique du sol », etc... Celles-ci rendent compte de corrélations quantifiées, s'éloignant le plus possible du caractère subjectif, spéculatif des classifications générales des sols. Les caractères et les facteurs de formation des sols sont interprétés en tant que relation fonctionnels. Grandeau fait usage de schémas partielle « PhO⁵/matière organique, ammoniacque/acide nitrique » au détriment d'une vision globale, d'une approche rationaliste. Cette vision opérationnaliste du sol se comprend par la place historique des chimistes dans l'école française.

L'expérimentation joue un rôle fondamental dans la pensée positiviste. Les relations entre les éléments du sol sont interprétés en fonction d'un protocole analytique. L'instruction est basée sur la correction des idées scientifiques pour les mettre en harmonie avec un nombre le plus grand possible de faits. Ainsi quand Grandeau écrit sur la nouvelle méthode d'analyse physico-chimique du sol de Thomas Schloessing :

elle a sur toutes les méthodes dites mécaniques proposées jusqu'ici, l'énorme avantage de faire connaître la teneur exacte d'une terre en argile et en sable. [le sable] n'est plus ici, comme dans toutes les analyses mécaniques, confondu avec l'argile.

L'esprit positiviste est manifeste. Grandeau voit un progrès certains dans l'établissement de mesures plus précises pour quantifier la teneur du sol en sable et argile, sans toutefois penser plus globalement des interactions de ces éléments avec d'autres propriétés du sol. Il ne s'aventure pas dans la spéculation et la théorisation. Ainsi, une nouvelle méthode expérimentale permet de corroborer une première impression de l'auteur, puisque plus loin celui-ci annonce le pourquoi d'une nouvelle méthode :

Il [Schloessing] a constaté, en outre, et je l'ai maintes fois reconnu après lui, que 5 à 10 p. 100 d'argile unie à des matières organiques suffisent pour donner du corps à une terre et en faire une véritable glaise.

Pour autant, Grandeau est un observateur neutre de l'expérience, où son avis ne compte pas. En ce sens, l'orientation positiviste du savant s'expose clairement, bien que non reconnue explicitement par l'auteur.

La pensée positiviste est aussi une réaction aux idées rationalistes et globalistes sur les sols. De 1890 à 1900, alors que les conceptions de Dokouchaev sur la formation des sols font référence en Russie, H. Hitier, alors élève de Grandeau publie dans le *Journal d'agriculture pratique* un compte rendu du pavillon russe de l'exposition universelle de 1900. Ce dernier est consacré aux travaux sur les sols et l'agronomie, ainsi que sur le chernozem (=tchernoziom). L'auteur ne se réfère ni au mot pédologie, ni aux travaux de Dokouchaev (Boulaire et Feller, 1985), mais permet de rappeler que : « C'est à lui [Grandeau] que l'on doit les plus belles recherches et les plus complètes sur la véritable cause de fertilité de ces terres noires de Russie » (Grandeau, 1900, p. 44). Les deux options épistémologiques paraissent irréconciliable.

2.3.4 La pensée génétique

Il y a, en dehors des deux tendances épistémologiques énoncées ci-dessus, une forme de pensée particulière qui s'articule autour du rationalisme. Les recherches de l'école russe et des anglo-saxons de la fin du XIX^e siècle constituent, pour la science des sols, une pensée génétique, s'articulant autour des schémas causaliste, déterministe et d'évolution. Cette pensée s'inspire des concepts évolutionnistes, par des mots de « genèse », « évolution », « formation », « origine », « histoire ». La pensée génétique distingue les faits et les données des interprétations et théories qui en sont déduites. Parmi les contributeurs majeurs à la science des sols, Dokouchaev fait figure d'exemple dans le développement de la pensée génétique, si l'on exclu de fait ses travaux expérimentaux qui constituent pour partie une justification par le positivisme. Il n'est pas difficile de retrouver les influences que Dokouchaev a reçu. Il est l'élève de Mendéléev, lui-même situant les travaux de Darwin parmi les plus grandes contributions. L'influence du darwinisme et des concepts évolutionnistes est considérable dans la deuxième partie du XIX^e siècle. Chatelin (1979) écrit :

Pour la nouvelle science du sol, la biologie a montré l'extraordinaire puissance d'une théorie, capable de rendre compte semblait-il de tous les faits connus, capable aussi de révéler tout le sens d'une classification naturelle. Il a souvent été dit que c'est sous l'influence de Darwin que les sols ont été pris comme des types évolutifs.

Il convient de donner une illustration de cette pensée génétique. Les écrits de Nathaniel Shaler (1841-1906), géologue américain, sont un exemple du développement de cette pensée de par le titre même de son ouvrage : *The origin and nature of soils*. Il étudie les « processus de formation des sols » par « l'effet des animaux et plantes », ainsi que « l'action et la réaction des hommes et des sols ». Le texte apporte aussi des mots-clefs « processus de formation des sols », « dégradation », « progressive » (Shaler, 1892).

L'influence de Darwin et de ses concepts d'évolution est typiquement présente dans les écrits en science des sols lorsque les auteurs cherchent à retracer les étapes de formation

du sol, les processus et les stades de la pédogenèse. C'est ce que fait Risler dans sa géologie agricole. Dans les processus qui forment les nappes de glaises au nord de la vallée de la Côte-Saint-André, Risler identifie une chronologie dans les dépôts. D'abord, un « épuiement et remaniement superficiel des derniers poudingues miocènes », puis une action lente des acides carboniques, enfin une dissolution des calcaires laisse pour résidus les matériaux glaiseux. Les cailloux résistant sont entraînés dans les dépressions par l'action des agents atmosphériques. Une démarche recherchant la filiation d'un sol est caractéristique de la pensée génétique. Risler fournit une explication morphologique à la formation du sol, avec une part importante de l'action de formation dédiés au temps et aux agents d'érosions. La formation des sols est due à un système. Risler, de par son orientation géologique, ne laisse que peu d'espace aux mécanismes biologiques. Pourtant, le rôle des théories et des évolutions met en lumière l'orientation génétiques des écrits de Risler.

En Allemagne aussi, les conceptions génétiques du sols prennent place lentement. Les écrits de Ramann sont considérés par [Krupenikov et al. \(1993\)](#) comme les premiers en leur genre. Celui-ci reporte les écrits de [Stremme et al. \(1926\)](#) pour qui Ramann a contribué au développement d'une vision génétique des sols par sa vision de la dégradation du sol basé sur le climat. [Krupenikov et al. \(1993\)](#) note que :

This opinion is confirmed by Ramann's soil classification in which he first divides soils according to the temperature belt and then according to the degree of wetting. S. A. Zakharov considered this classification « climatic » but it also considers contours and the ecological concept of « hydroseries » and « thermal series », although without quantitative indices.⁶

6. Traduction : *Cette opinion est confirmée pas la classification des sols de Ramann dans laquelle il divise d'abord les sols par rapport à la ceinture de température et ensuite par rapport à leur degré d'humidité. S. A. Zakharov a considéré cette classification de climatique, mais il considère aussi les contours et les concepts écologiques de « séries hydrologique » et de « séries thermales » bien que n'utilisant pas d'indices quantitatifs.*

Les méthodes dans la science des sols

La méthode désigne de manière générale l'ensemble des procédés qui guident le processus de production des connaissances scientifiques. La méthode lie des faits aux théories par une structure expérimentale. L'épistémologie montre le manque d'unicité et le fait qu'il y a bien des méthodes scientifiques autant qu'il y a de manières de faire. Dans ce chapitre, je propose un aperçu des méthodes communément employées dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Il s'agit de constater l'unicité ou la divergence des méthodes entre écoles de pensées, mais aussi entre la science des sols et les sciences naturelles voisines.

J'oriente d'abord mon propos vers l'analyse des principes méthodologiques présents dans la science des sols et de la construction méthodologique quotidienne qui en découle. J'étudie particulièrement les différences de principes méthodologique entre la science des sols et la géologie ou la biologie. Dans un second temps j'analyse le rôle de l'expérience et de l'usage des techniques. Qu'elles sont les procédés qui encadrent l'expérience, et comment ceux-ci se comparent à l'usage des techniques en chimie agricole ? Enfin, je profite de cette étude méthodologique pour mettre en lumière le rôle des échelles spatiales et temporelles. Il s'agit de montrer que les échelles sont, à l'instar de la chimie agricole ou la géologie, importantes pour comprendre la structure méthodologique en science des sols à la fin du XIX^e siècle.

Je montre que la science des sols dispose d'une relative homogénéité méthodologique contrairement aux différences attendues. L'école russe ne se différencie que de manière marginale par rapport aux autres écoles de pensées. De plus, je montre aussi que, de manière inattendue, le socle méthodologique est proche de celui des chimistes agricoles. D'aucuns trouveront des similarités avec les méthodologies utilisées en géologie, mais celles-ci restent cantonnées aux mécanismes d'échelles.

3.1 Un science empirique

3.1.1 La comparaison simple et à plusieurs facteurs

Les analyses factorielles simples mettent en relations deux facteurs de variation du sol et proposent d'en analyser les variations communes. Fréquemment il s'agit d'une relation entre un facteur de formation du sol (roche mère, climat, végétation) et un composant du sol (argile, matière organique, azote).

De telles comparaisons sont ordinairement très présentes dans les sciences agronomiques. De la sorte que les *Annales de la science agronomique française et étrangère* éditées par Grandeau compile le plus souvent des travaux à analyse factorielle. Par exemple, dans le Tome 2 de 1897, M. Potier, Professeur spécial d'agriculture à Saint-Sauveur-en-Puisaye, pose le problème de l'emploi des engrais phosphatés de différents types sur les sols. Ce dernier teste l'emploi d'engrais sur des sols de diverse nature (ferrugineux, calcaire et marnes, argile) par rapport au rendement de différents produits tels que les betteraves ou les blés (Grandeau, 1897a, p. 136). Il conclut sur les choix à faire en matière de fertilisation au phosphate ou superphosphate sur la base de corrélations simples entre ajout d'engrais et rendement agricole. Ces études par comparaison de données restent le plus souvent quantitatives. Il en est différent pour l'interprétation des facteurs de la pédogenèse. D'un point de vue qualitatif, Dokouchaev compare alternativement l'influence de la roche mère sur la teneur en matière organique. Il en découle un lien de cause à effet entre le sous-sol et le type de chernozem. En comparant le comportement des sous-sols loessiques, argileux, sablonneux, argilo-siliceux et marneux, il apparaît que les teneurs en humus sont qualitativement et quantitativement différentes.

Ces schémas de comparaisons entre deux types de données sont souvent insuffisants. Le sol en tant que système complexe contient des interactions multiples. Il semble que la comparaison quantitative simple soit très limitée et ne permet pas de déduire des corrélations dans de nombreuses circonstances. Dans le cas des sols de Russie et du chernozem, Dokouchaev propose que la valeur relative d'un sol s'obtienne par un certain nombre de facteurs géologiques, chimiques, mécaniques et physiques qui interagissent et se confondent dans une analyse quantitative. Le facteur géologique rend compte de l'épaisseur des horizons et de la teneur en humus du sol, en relation directe avec la couleur du sol. Un graphique est élaboré, le type de roche mère forme l'axe des abscisses, l'axe des ordonnées comprend une échelle de valeurs partant de 100, avec pour ligne tracée la teneur en humus et l'épaisseur du sol. La moyenne arithmétique entre les deux lignes (les deux paramètres) est appelée la moyenne géologique par Dokouchaev (reporté par Margulis (1954)). Cette dernière permet de tirer des conclusions d'ordre génétique entre le facteur roche-mère et des caractéristiques choisies du sol. Les mêmes principes sont appliqués pour déterminer une moyenne chimique, mécanique ou physique, en variant assurément les paramètres explicatifs pour chaque moyenne. La classification génétique du pédologue se confond avec la donnée purement statistique pour la comparaison des facteurs d'influences de la formation des sols et des caractéristiques qui en découlent.

Enfin, les comparaisons entre les paramètres du sol mènent à une comparaison entre les sols

eux-mêmes. Une analyse comparative générale considère les sols dans leur totalité et légitime une analogie entre sols à une échelle plus vaste, au moins régionale. Là encore, l'école russe par Sibirtzev est la seule à proposer cette approche à la fin du XIX^e siècle. Sibirtzev base sa classification des sols de Russie sur une comparaison entre plusieurs paramètres quantitatifs et qualitatifs. Le sol type steppique désertique se différencie du sol de type chernoziomique par sa teneur en humus inférieure à 4 % et de par sa couleur jaune brunâtre roux (voir classification des sols de Sibirtzev). D'autres paramètres peuvent être ajoutés, tels que le caractère du squelette, de sa finesse ou grossièreté, la cohésion ou la plasticité du sol, la richesse de l'argile en zéolithes. Ceux-ci permettent d'exposer les liens entre le sol et son milieu, et les liens entre les propriétés des sols elles-même afin d'en dériver une comparaison à large échelle. Sibirtzev, considérant particulièrement les sols de Russie septentrionale, annonce (reporté par Margulis (1954)) :

La systématique des sols ainsi exposée apparaît comme étant très complexe. Elle ne l'est qu'apparemment car, en réalité, les propriétés des sols s'unissent entre elles et se déterminent l'une l'autre. En fait, elles se présentent en groupes.

Il apparaît que la comparaison en science des sols est abordée de manière très variée, dépendant que l'on se situe proche des sciences agronomiques ou de l'école russe. Certaines études sont purement statistiques avec liens de causes à effets, d'autres font appel à des données de pédogenèse plus complexe et dont la comparaison permet d'aborder la nature très complexe des interactions contenues dans les sols. De plus, les facteurs de formation des sols sont difficilement observables hors du milieu naturel, de la même manière qu'ils ne peuvent être observés séparément. L'analyse qualitative à plusieurs variables permet, à la fin du XIX^e siècle, sans aucun doute, de révéler des fonctionnalités mécaniques, physiques ou chimique des sols.

3.1.2 Les principes de successions

La pratique de la pédologie pour de nombreux auteurs repose sur la question des successions, c'est à dire des stades successifs, des jalons, qui au cours du temps ont façonné les couches du sol. L'idée selon laquelle la formation des sols est un processus temporel est très présente à la fin du XIX^e siècle dans les auteurs de l'école russe et chez les géologues français et états-uniens. La science des sols hérite pour partie des sciences géologiques, et de leur croyance en une hypothèse générale sur les stades antérieurs. Il s'agit de retracer la genèse d'un horizon du sol en supposant que celui-ci est un stade avancé d'une évolution d'un autre horizon ou d'une dégradation de la roche mère. Ce cadre théorique facilite l'interprétation des sols complexes puisque les même données de départ mènent indéniablement au même sol type. Cela simplifie les démarches mais l'approche est difficilement tenable lorsque plusieurs facteurs entrent en jeu. Dans le Chapitre 5, il est mentionné un exemple de succession tel que décrit par Risler. Il est aisé de trouver des exemples chez les géologues, puisque la roche mère est l'origine du sol, et en tant que tel, reconnu comme son stade primitif auquel la science des sols a pour but d'en retracer l'évolution. Je fournis deux exemples. Le premier est une interprétation d'une succession par le géologue Risler, le second est extrait du livre de Shaler sur les origines et la nature des sols dont le point de vue génétique s'approche de la conception de l'école russe.

Les successions sont évoquées par Risler dans sa *Géologie agricole* par l'accumulation verticale des couches géologiques. Les principes de successions ne sont pas évoqués explicitement dans un contexte pédologique. Néanmoins, de nombreuses explications sur la formation des sols font appel à des notions proches de l'agronomie. Dans la formation des terrains quaternaires de la Savoie, la possibilité de multiples agents de formation des sols est évoquée, par des processus temporellement différents. Ainsi les terres formées par la décomposition des roches sous-jacentes sont différenciées des terres formées « par voie de transport »¹, et dont les limites « ne peuvent être établies d'une manière tout à fait rigoureuse »². Dans un pays de granite, les matériaux produits par la décomposition de la roche sont soumis à la pente et s'accumulent sur des terres de valons où ils se joignent aux terres argileuses très épaisses. Le principe de succession n'est pas clairement formulé mais le caractère pédologique de l'interprétation des successions physiques est certain, et l'auteur d'ajouter :

On pourrait même dire que tous les dépôts secondaires et tertiaires ont été à leur origine des terrains de transport formés au moyen des éléments enlevés aux terrains plus anciens.

Enfin, notons que les termes « formation » et « succession » sont très largement employés par Risler dans sa géologie agricole, mais la signification géologique des termes diffère d'une quelconque interprétation pédologique. J'entrerai plus en détail dans l'emploi du lexique dans le Chapitre 6.

Dans une analyse divergente des principes de succession, Shaler évoque « l'histoire des sols » dans un processus de dégradation des terres (= *downwearing*³). Le principe de succession est évoqué dans le changement du caractère minéral des sols. Par exemple, lors de la migration des sédiments par l'action de l'eau et de la gravité, certains minéraux insolubles se maintiennent dans le sol. C'est le cas du quartz qui peut rester pour « une période indéfinie ». Ces détritiques de roches s'accumulent et décroissent la qualité nutritive du sol lorsqu'un nouveau sol se forme. L'action de l'eau entraîne-elle un excès d'oxydes de fer près de la surface dans les sols à roche mère calcaire, à cause du dioxyde de carbone contenu dans l'eau. Si l'eau passe dans un sol argileux ou sableux, cet effet tend à se dissiper. Shaler signale l'action bénéfique pour la fertilité des mouvements de minéraux dans les sols. La variété des minéraux contenue dans une roche mère est insuffisante pour fournir la diversité des minéraux dont la végétation a besoin. Shaler fournit une justification de succession verticale des minéraux dans le sol :

Within each area of ordinary soil we commonly find a share of the substances derived from the higher levels of the strata, through which it has passed; in this manner it is likely to be supplied with a wider range of ingredients than the rock on which it lies can afford.⁴

Pour Shaler, la succession se justifie par l'action chimique, la notion physique de succession dans les sols évoquée par Risler est aussi présente chez Shaler, mais n'est pas évoquée dans

1. Risler (1895), page 26.

2. Risler (1895), page 27.

3. Shaler (1892), page 222.

4. Traduction : *Dans chaque zone d'un sol ordinaire on trouve communément une partie des substances dérivées des niveaux supérieurs des strates traversées : de cette manière il a de fortes chances d'être approvisionné par une variété d'ingrédients plus large que la roche sur laquelle il se trouve ne peut fournir.*

ce mémoire afin de garder un exposé clair et succinct. Plus d'informations peuvent être trouvées dans [Shaler \(1892, p. 300-306\)](#). Cette action chimique est elle aussi mentionnée à plusieurs reprises dans [Hilgard \(1918\)](#).⁵

3.1.3 Les formes du sol

Les structures et les formes du sols offrent un message. Ils permettent de remonter aux mécanismes de genèse et d'évolution des sols. L'analyse des formes est très présente dans la littérature pédologique de la fin du XIX^e siècle. En particulier, les formes laissent comprendre directement ou indirectement des caractéristiques du sol, de sa porosité, de sa qualité agronomique et de sa mobilité. Plusieurs auteurs ont abordé la question, j'en fourni trois exemples à travers trois échelles, en commençant par la plus fine.

La forme du minéral fournit une explication sur son origine. Hilgard mentionne les formes typiques de principaux minéraux présents dans les sols, quand ceux-ci sont facilement reconnaissable. Le calcite est caractérisé par « its perfect cleavage in three directions, producing cleavage forms with smooth, rhomb-shaped faces (rhombohedrons) »⁶. Le sulfate de sodium, présent quelquefois par la pollution industrielle dans les sols arides, est formé de « light, feathery, needle-shaped crystals »⁷. L'analyse des formes de minéraux seules permet de parfaire l'analyse sur la qualité du sol et du labour. Dans *Influence of the granular sediments upon the tilling qualities of Soils*, Hilgard déduit les conditions de labour à partir des formes des sédiments ([Hilgard, 1884](#)) :

The form of the grains being angular instead of rounded, they are apt to form a very closely packed mass far from suitable to vegetable growth.⁸

On distingue comment les formes du sol fournissent une signification immédiate pour Hilgard. Celui-ci fournit de nombreux exemples qui seraient trop long à étudier. De plus, de nombreuses analyses similaires peuvent être trouvées dans les auteurs évoqués précédemment.

À une autre échelle, plus visible à l'œil nue, il est des assemblages de sédiments qui par leur forme et leur structure indiquent des rapports entre les minéraux et l'eau qui s'infiltré dans les sols. C'est le cas des concrétions évoquées dans [Ramann \(1893\)](#) et plus largement décrite dans [Ramann \(1911\)](#). La formation des concrétions est décrite dans les pages 100-101 avec l'action de l'eau sur les oxydes et oxydhydrates du sol. Cela résulte à une oxydation des éléments et donne une couleur, souvent d'orange à gris, et à :

kleinen, gerundeten Konkretionen, die meist wenig Zusammenhang zeigen und lose im Boden liegen (wenig schädliche Form) oder in geschlossenen Bänken von oft bedeutender Ausdehnung und Mächtigkeit.⁹

5. Première édition en 1905.

6. Traduction : son parfait clivage en trois directions, produisant des formes de clivage avec des cotés lisse en losange (Rhomboèdre).

7. Traduction : léger et doux cristaux, avec une forme d'aiguille.

8. Traduction : la forme des grains étant angulaire à la place d'arrondis, ils sont capable de former une masse très compacte loin d'être approprié pour la croissance de la végétation.

9. Traduction : de petites concrétions arrondies, qui montrent généralement peu de cohésion et reposent librement dans le sol (peu de forme nuisible) ou dans des couches distinctes d'étendue et de largeur souvent importantes.

Ces larges formes sont souvent présente de façon répandue dans les sols tropicaux, Ramann souligne :

Im Laterit der Tropen finden sich weit verbreitet im Boden Eisenkonkretionen, die man meist dem Raseneisenstein zurechnet. Über ihre Bildung ist noch nichts bekannt.¹⁰

Il est évident que la présence de couleurs ou de concrétions dans les sols forme une figure qui permet de reconstituer et d'imaginer la genèse de phénomènes complexes.

À une échelle encore plus large, l'étude du profil du sol révèle des formes complexes de structure. Je ne saurais faire une liste exhaustive des auteurs traitant du sujet. Je note toutefois les contributions de Ramann (1911, p. 500-511), ou encore de Dokouchaev. La quantité d'humus et des horizons¹¹, leur forme horizontale, leur épaisseur et couleur forment des éléments propres et pouvant rentrer dans une classification. C'est ainsi qu'un sol avec une couche supérieur gris-clair ou gris-jaunâtre de 5-25 cm avec une régularité horizontale et une sous-couche jaune, s'apparente à un sol de type éolien-lœssique classique. Les figures visuelles fournissent des informations et sont largement décrites. Notons toutefois que ces figures du sols sont des concepts construits, par opposition aux interprétations directes que suggèrent les figures simples évoquées précédemment (minéraux, concrétions). L'étude du profil des sols s'apparente à créer un modèle de la réalité, comme précédemment évoqué dans le Chapitre 2.

3.2 La place de l'expérimentation

3.2.1 Le laboratoire

Les pratiques expérimentales dans la science des sols sont courantes à la fin du XIX^e siècle. Je note que contrairement à certaines autres sciences naturelles telles que la biologie, la science des sols ne laisse qu'une place restreinte à l'expérimentation et au laboratoire, par rapport à l'observation. Toutefois, de nombreuses pratiques montrent que l'utilisation de l'expérience en général et du laboratoire en particulier permettent de confirmer les observations directes. Je fournis deux exemples d'utilisation du laboratoire en science des sols. Je cherche spontanément le premier exemple dans les *Traité d'analyse des matières agricoles* de Grandeau. Le second traite de plusieurs auteurs, où le recours au laboratoire est d'utilisation plus pédologique qu'agronomique, les analyses aident les observations, mais ne constituent pas une recherche en tant que tel.

Grandeau fournit dans ses traités une source considérable d'information sur les méthodes et les techniques d'analyses des sols. L'approche du chimiste est sensible tant elle est basée

10. Traduction : *Dans les latérites des tropiques se trouvent de manière très répandue des concrétions de fer que l'on impute le plus souvent à la présence de fer des marais. Leur processus de formation n'est pas encore connue.*

11. La notion d'horizon n'est pas clairement définie à la fin du XIX^e siècle. En conséquence, j'utiliserai le terme de « couche » dans ce mémoire. Je note toutefois que la notion de sol en tant que corps tri-dimensionnel est déjà présent dans la littérature au milieu du XIX^e siècle, notamment par les écrits de Fallou (1962), J.R.L von Libernau (1862) et Albert Orth (1873, 1875) (rapporté dans Tandarich *et al.* (2002, p. 336)) et est héritée des sciences géologique. Cette notion est développée plus en détail dans le Chapitre 4.

sur l'expérience en laboratoire et la répétition des analyses dans un stricte protocole ayant pour but de soutenir la comparaison future. Grandeau écrit dans son introduction :

Ce qui importe le plus au progrès de la chimie agricole, c'est qu'il soit fait un grand nombre d'analyses de sols, de végétaux, de fourrages, d'amendements, d'engrais, prélevés dans des conditions bien déterminées, analyses exécutées par des méthodes sûres, assez rapides et identiques, quels que soient les analystes auxquels on les doive, ce qui permettra des rapprochements entre les résultats obtenus.

En particulier, sa méthode d'étude des matières noires est très utilisée par ses pairs. Le rôle exact de l'humus (« matière noire ») a été très discuté au milieu du XIX^e siècle par les chimistes. Grandeau avance, par ses déductions en laboratoire, que les éléments assimilables du sol sont inclus dans les matières noires, éléments sur lesquels dépend la fertilité du sol. Il concilie théorie de l'humus et théorie minérale, en prouvant expérimentalement que l'humus ne nourrit pas la plante mais rend assimilable les éléments minéraux nutritifs (Boulaine et Feller, 1985). La position expérimentale du chimiste, hérité de Boussingault et de Liebig, est visible et appliquée à l'étude d'un questionnement concret.

Par opposition à l'utilisation expérimentale du laboratoire des agronomes et chimistes du sol, plusieurs auteurs -des pédologues au sens large, ont recours à l'analyse de façon systématique pour soutenir les observations visuelles. C'est le cas dans la plupart des ouvrages de pédologie génétiques tel que dans Ramann (1893), Hilgard (1918) et chez Kostychev (1889). Ainsi dans Ramann (1911, p. 30), une analyse de l'influence de l'humus sur l'altération est fournie. En considération de ces observations sur l'altération des silicates, Ramann utilise les analyses pour l'évaluation de ses suppositions et conclue :

Eingehende Untersuchungen über die Verwitterung von Silikaten unter Mitwirkung von Humusstoffen, die im bodenkundlichen Laboratorium ausgeführt wurden zeigen, daß auch in diesem Falle die zersetzende Wirkung hauptsächlich dem Einfluß des Wassers zuzuschreiben ist und weitergehende Einwirkungen erst in langen Zeiträumen zu erwarten sind¹².

Chez Hilgard, l'utilisation des analyses en laboratoire est raisonnée, mais assez systématique. Plusieurs analyses sont faites, l'utilisation se limitant généralement à une douzaine d'éléments. Hilgard (1918, p. 324) semble noter les limites de l'utilisation du laboratoire, en privilégiant les expériences en champ et en avisant qu'il ne peut pas reproduire, de manière contrôlée, l'action entre les plantes et les racines. Pourtant, les analyses sont une part importante de la base du raisonnement pédologique, sans toutefois en être la cause et la recherche directe. Enfin, Kostychev dans Feltz (1887) expérimente au laboratoire différentes hypothèses sur l'origine de l'humus contenu dans les terres noires. Ainsi différents matériaux sont testés pour leur influence sur la variabilité de la composition en humus des terres noires. Les expériences de laboratoire servent, là encore, à évaluer les observations faites sur le terrain.

12. Traduction : *Des recherches approfondies sur l'altération des silicates à l'aide de substances humiques, réalisées au laboratoire pédologique, montrent que dans ce cas également, l'effet de la décomposition est principalement dû à l'influence de l'eau. Ces processus ne peuvent être attendus que sur de longues périodes.*

Notons enfin que j'ai omis de présenter les méthodes analytiques de laboratoire telles qu'énoncées dans certains ouvrages. Il n'est pas du sujet de ce mémoire de traiter des mécanismes d'analyse physique, chimique et biologique, mais bien de retrouver les orientations systématiques dans la méthodologie de la science des sols.

3.2.2 Les bilans

Les notions de bilan interviennent fréquemment en science des sols, elles se définissent de deux manières. La première se rapporte aux phénomènes d'altérations, de dégradation d'un matériel de départ, par des actions géochimiques ou physiques. La bilan est en rapport au matériel de départ et se quantifie en perte rapporté à sa dégradation totale. Par exemple, quelle proportion minérale d'une roche mère a été lessivée par rapport à un possible apport éolien. Cette distinction est nommée système de bilan « ouvert » dans [Chatelin \(1979\)](#), par opposition au système de bilan « fermé » (sans nouvel apport). La seconde se rapporte à un bilan simple, comme généralement admis dans le langage courant. Un apport est comparé à une perte par une (simple) équation dont la résolution fournit la réponse au problème. Par exemple, le bilan des éléments fertilisants à l'usage des végétaux dont la somme des pertes et des apports est la quantité disponible pour la croissance des végétaux. Une valeur négative (un apport trop faible) résulte en un stress pour les végétaux et en une croissance restreinte.

Les bilans sont une notion très commune en science des sols, tout autant qu'en géologie. C'est d'ailleurs en lisant les écrits de [Risler \(1894\)](#) que l'on retrouve la forte présence des bilans. Je pourrais multiplier les exemples, mais n'en donne qu'un seul pour l'illustration, tiré du tome IV de sa *Géologie agricole*, pages 201-202. Dans l'énonciation des propriétés hydriques des sables des dunes de Gironde, Risler dresse le constat de l'équilibre de la hauteur de la nappe aquifère des dunes. Il recourt au bilan hydrique simple, sans quantification à proprement parler, mais en utilisant simplement sa perception directe. Il conclue :

Elle [la nappe aquifère] reste stationnaire au niveau qui représente l'équilibre entre les apports qui lui sont faits par l'atmosphère et les causes naturelles de déperdition auxquelles elle est soumise évaporation, dans une très petite mesure, et pente du terrain.

Je donne deux exemples en rapport aux deux notions de bilans évoquées précédemment. Le premier est tiré des écrits de Sibirtzev, rapporté dans [Margulis \(1954\)](#). Le second est tirée de l'ouvrage d'[Hilgard \(1918\)](#).

Sibirtzev attribue à la matière organique une place prépondérante dans son analyse. Il étudie l'accumulation de la matière organique dans les chernozems des steppes russes. L'accumulation se produit lorsque les quantités reçues sont supérieures aux quantités perdues (par la minéralisation). Par raisonnement, il infère une quantité maximum d'humus dans le sol définit par $(n - 1)A$ où A est la quantité apportée par les débris végétaux et animaux et $\frac{1}{n}$ est la perte annuelle en humus, $n - 1$ est l'année ou un apport nouveau A n'augmente plus la teneur en humus du sol. Si le sol accumule une quantité d'humus équivalant à $9A$, il s'accumule naturellement l'année suivante $9A + A$ dont le sol décompose $\frac{9A+A}{10}$. Il reste donc dans le sol la même quantité d'humus que l'année $n - 1$ et il n'y a plus d'accumulation. Le bilan est utilisé pour son pouvoir prédictif dans le cas d'un changement d'apport ou de perte

en humus. Si un des facteurs change, l'équation fournit un résultat différent. Par exemple, pour un résultat pratique, lorsqu'une forêt envahie le chernozem, Sibirtzev note que la dégradation lente de la matière organique est due à un nouvel apport d'humus par la forêt, ce qui résulte en un nouveau équilibre. La forêt consomme une partie de la matière organique steppe et une partie de la matière organique forestière, tandis que les apports se limitent dès lors au seul humus forestier. Sibirtzev note l'importance de la dégradation des sols de chernozems due à la reforestation, ce qui implique de grandes conséquences économiques, et montre de surcroît la capacité prédictive des bilans.

Dans un autre contexte, le bilan est fait à partir de la dégradation d'un matériel de départ. Il n'y a pas de nouvel apport extérieur. Dans Hilgard (1918, p. 16), la formation des sols est analysée en tant que dégradation chimique, aussi appelée décomposition (de la roche mère). L'auteur tire un bilan de la dégradation de la roche, en énonçant les composants entrant en considération : les éléments de l'air sont des « negligible elements », l'eau fournit un agent de dégradation sous forme de « weathering by carbonic acid », l'oxygène fournit une oxydation aux matériaux contenant « ferrous (iron monoxid) and ferroso-ferric oxid ». La liste est longue, mais l'auteur note que l'action des ces agents de dégradation sans apport extérieur est possible mais pourtant accélérée avec des nouveaux apports, tel que l'humus de la végétation :

It is hardly necessary to insist that the action of all these chemical agents continues in the soils themselves, and that owing to the fineness of the material, resulting in an enormously increased surface exposed to attack, such action acquires increased intensity. This is the more true as in soils bearing vegetation there are always superadded the effects of the humus-acids resulting from the decay of vegetable matter, as well as of the acid secretions of the living plants.¹³

Les bilans sont un exemple très clair de position positiviste tant ils font appels à des mesures quantitatives et des équations. Ces dernières, ainsi que les formules arithmétiques sont elles-mêmes peu discutables, même si leurs composantes le sont. Les bilans visent d'une part à établir des faits indiscutables, et d'autre part à limiter les critiques possibles des positions positivistes fortes. Il est cependant clair que lorsque les formules sont peu critiquables, les données disponibles et mesurées le sont bien plus. Par exemple, dans le premier exemple énoncé ci-dessus, le bilan est dépendant de la mesure de la quantité d'humus, parfois aléatoire ou interpolé à partir de mesures succinctes, ce qui infirme une position positiviste forte. Cette critique est facilement évitable par le recourt aux mesures faites en laboratoire.

3.2.3 Une science pratique

La science des sols à la fin du XIX^e a recourt à une forme de justification quand à son utilité faces aux sciences agronomiques. Dans cette même optique, la science des sols se retrouve en confrontation, sinon en concurrence avec l'édaphologie, la minéralogie ou l'agronomie

13. Traduction : *Il est à peine nécessaire d'insister sur le fait que l'action de tous ces agents chimiques se poursuit à l'intérieur des sols eux-mêmes et que, du fait de la finesse de la matière, la surface exposée à l'attaque augmente énormément, ce qui en accroît son intensité. Ceci est d'autant plus vrai que, dans les sols végétaux, les effets des acides humiques résultant de la décomposition de la matière végétale, ainsi que des sécrétions acides des plantes vivantes, sont toujours surajoutés.*

au sens large. La science des sols n'est pas une science naturelle en tant que telle, mais bien issue d'une sous-branche de la géologie ou de la chimie agricole. Dans le tome premier de sa *Géologie agricole*, Risler se justifie de la nature même de la création de son ouvrage :

On a dit : Pourquoi créer un cours d'agriculture comparée ? Il n'a pas sa raison d'être, pas plus qu'un cours de chimie comparée ou de mathématiques comparées.

C'est la nature même d'une nouvelle branche de la science de se justifier de son existence. Néanmoins, il est évident que la naissance de la science des sols se montre par son « utilité », sa « praticité ». Cette nouvelle science répond à des besoins pratiques, qui intègre des facteurs environnementaux, et aussi économique. Cet aspect est souligné tout autant dans [Risler \(1894\)](#) :

Or, il en est précisément ainsi des systèmes de culture. Ce sont des faits très complexes qui varient, non seulement avec les nombreux faits que l'on a réunis sous les noms de climat et de sol, mais avec les faits économiques.

La méthode dans la science des sols de cette période historique n'est donc pas une recherche de faits véritables, mais avant tout une volonté de répondre à des besoins fonctionnels par la science. Je donne deux exemples du développement de la science des sols ayant pour intention la résolution d'un problème agricole pratique. Je montre que certaines découvertes sont le fruit d'une sollicitation à dessein purement économique et utilitaire.

Le premier exemple est tiré des écrits de Dokouchaev, rapporté par [Margulis \(1954\)](#). Ce dernier montre que les premiers travaux de Dokouchaev ont une « raison historique et un mobile utilitaire » pour deux raisons (déjà partiellement évoqué lors de la section 2.1.4). La première est l'abolition du servage en Russie en 1861 et l'accession des paysans à la terre. Ces derniers doivent payer une indemnité à l'état qui est calculée en fonction d'une classification qualitative des terres. Cette classification est aussi d'utilité pour la nouvelle imposition foncière. Plusieurs cartographies tentent d'illustrer cette classification à partir de la carte des sols et de leur qualification. Cette dernière n'ayant pas de définition à proprement parlé scientifique, une grande confusion règne sur les valeurs effectives de ces terres.

La deuxième raison est que la Russie souffre de sécheresses périodiques dans ces régions centrales et méridionales. Les terres réputées comme les plus fertiles ne fournissent aucune denrées dans certaines périodes et engendrent des phases de famine. Des études sont dirigées dans les régions concernées, dès 1877 par une commission créée par La société libre Impériale de Saint-Petersbourg. Cette dernière comprend deux sections dont l'une est dirigée par Dokouchaev.

Dans les deux cas énoncés ci-dessus, Dokouchaev avec son étude du chernozem russe répond à un besoin pratique, utilitaire. Il s'agit de comprendre le fonctionnement du sol afin d'en améliorer l'exploitation par les paysans et d'éviter les famines. Cette analyse fournit éventuellement les bases de sa théorie de la formation et de distribution spatiale des sols, mais la cause de ses recherches est purement économique. [Margulis \(1954\)](#) remarque :

On voit que, dès le début, les problèmes que se posait Dokoutchaïev contenait les germes de tout ce qui donne ses caractères propres à la pédologie.

Le deuxième exemple est tiré du premier tome de la *Géologie agricole* de Risler. Il s'agit de montrer que l'auteur voit dans le travail scientifique une manière de servir l'agriculture. Cette idée est partagée à de nombreuses reprises dans l'ouvrage, de l'introduction :

Je prendrai mon point de départ dans le cours de géologie, et je chercherai à me rapprocher de plus en plus du domaine de la pratique, en vous décrivant les caractères agricoles des divers terrains classés par formations géologiques. C'est à la fois la classification la plus scientifique et la plus pratique.

L'ambition de l'auteur est assumée : fournir des bases scientifiques à un étude des sols utilitaire et scientifique, en se basant sur la géologie. Plus loin, il réaffirme son intention :

Les anciennes classifications ne répondent à aucune de ces questions. Mais, en s'appuyant sur la géologie, elles pourront être plus utiles aux agriculteurs en devenant plus réellement scientifiques, elles seront du même coup plus pratiques.

Il manifeste l'utilité de la science pour l'amélioration de la culture des terres arables, en notant toutefois que celle-ci n'est qu'un complément à la connaissance des agriculteurs :

Le bon sens des paysans a devancé la science, il a distingué par un nom particulier chaque étendue offrant le même aspect et la même culture.

Pour Risler, la science des sols est un complément, elle fournit une instruction aux utilisateurs de la terre. La pratique paysanne est l'initiation mais aussi le réceptacle des notions développées dans l'ouvrage. Notons toutefois que Risler ne considère pas seulement les paysans dans son ouvrage, puisque celui-ci s'adresse tout aussi bien aux futurs directeurs des stations agronomiques.

3.3 Les échelles

3.3.1 Des mécanismes d'échelles

En science des sols, l'échelle spatiale de l'analyse joue un rôle évident. Sibirtzev crée les cartes globales des sols en 1905 lorsque certains agronomes français, héritiers des écoles de la chimie agricole, regardent le sol à travers le spectre des molécules et de leurs interactions. [Chatelin \(1979, p. 52\)](#) note que « historiquement, la science du sol a souvent commencé son travail par les structures les plus larges, pour entrer ensuite dans le détail des plus petites ». Dans des termes épistémologiques, ces échelles peuvent se référer respectivement à des systèmes d'ordres supérieurs aux systèmes d'ordres inférieurs. Cette terminologie est déjà employée en épistémologie, et reprise dans [Chatelin \(1979\)](#) pour des phénomènes d'échelle en pédologie, et favoriser une lecture « inclusive ». Je souligne à travers deux exemples que contrairement à la lecture de [Chatelin \(1979\)](#), il me paraît évident que la science des sols s'est développée à partir de théories énoncées sur des faits d'ordres inférieurs pour décrire des systèmes d'ordres supérieurs. De même, je note que des faits décrits à petite échelle peuvent être analysés du fait de causes visibles s'appliquant à une échelle plus large.

Dans la classification naturelle des sols de Sibirtzev ([Margulis, 1954](#)), les divisions essentielles de la classification des sols de Dokouchaev sont conservées (sols zonaux, intrazonaux, etc...), mais en introduisant des facteurs d'évolution supplémentaire. Ceux-ci correspondent à des éléments locaux, des systèmes d'ordres inférieurs, tels que les propriétés chimiques des sols ou leur degrés d'évolution. Sibirtzev, tout autant que Dokouchaev, argue

qu'un certain type de pédogenèse aboutit au chernozem, tout comme une autre pédogenèse aboutit à un autre type naturel de sol. Les facteurs de la pédogenèse ont des influences complexes et peuvent avoir des conséquences variées sur l'évolution des sols. Sibirtzev prend en compte ce principe et définit de multiples sous-types dans sa classification. C'est particulièrement le cas des sols intra-zonaux, semi-zonaux, incomplet ou azonaux. Ceux-ci obéissent à des facteurs autres que zonaux (climatique) pour leur classification. Se retrouvent ici une large partie des sols du monde. Les systèmes d'ordres supérieurs sont plus importants dans la classification que les systèmes d'ordres inférieurs. Ces derniers agissent dans une différenciation de base entre sols zonaux et les autres. Du reste, les propriétés locales de pédogenèse, de propriété morphologique et physico-chimique, d'aspect géobotanique, sont autant de systèmes d'ordres inférieurs majeurs dans la classification des sols, car ceux-ci différencient les sous-types. La carte des sols résultante paraît obéir à des déterminismes d'échelles large, mais il en est tout autre.

D'autres exemples viennent des démarches analytiques de Grandeau ou de Risler. Celles-ci, héritées respectivement des méthodes de la chimie agricole ou de la géologie, extrapolent des résultats d'un système complexe fin (parfois microscopique) vers une autre échelle, vers un autre système complexe. Cette application de résultats d'une échelle à une autre entraîne des risques, tels que la dissimulation de nouveaux phénomènes et de nouveaux processus, qui n'interviennent pas (ou de manière infime) dans un système d'ordre inférieur. À cet égard, Risler dans sa *Géologie agricole* énonce les analyses qu'il entreprend pour comprendre les processus géologiques et agricoles :

L'analyse d'un seul échantillon pour chaque division, bien choisi et accompagné de renseignements sur le mode de culture, sur les engrais qui y sont en usage.

L'échelle d'analyse choisie est bien la plus petite, même si référence est faite aux grandes entités géologiques. Il semble que les intuitions de l'auteur partent d'une observation à large échelle :

Un premier coup d'œil jeté sur la carte géologique de la France fait voir qu'en effet il existe souvent des rapports extrêmement marqués entre les formes extérieures du sol et sa composition intérieure.

Du reste, les mécanismes d'échelles sont très présents dans l'ouvrage de Risler. Une terre avec une composition chimique n'a de limite géographique que celles définies par les ruptures de substrat géologique :

Évidemment, la composition chimique d'une terre n'a, de même que ses propriétés physiques, aucun rapport avec la division du territoire en unités cadastrales, et l'auteur d'ajouter en référence au substrat rocheux dont le sol est lié :

Dès lors que vous saurez d'où la terre vient, vous serez près de savoir ce qu'elle est.

Les systèmes complexes s'imbriquent dans des échelles spatiales différentes ; de la parcelle d'où provient l'échantillon de terre jusqu'au territoire défini par le substrat géologique, unité de mesure commune pour la variabilité des propriétés physico-chimiques des terres arables.

Au vu des éléments énoncés ci-dessus, je me trouve en désaccord avec [Chatelin \(1979\)](#) pour qui la science des sols s'est historiquement développée d'une échelle la plus large vers une

autre plus modeste. La période 1880-1900 a certes vu l'établissement de cartes globales des sols. Du reste, ces cartes sont le fait d'observations faites à plus petites échelles, voir des travaux de liaison entre matière organique et caractéristiques des sols (voir par exemple [Feltz \(1887\)](#)). Pour la période étudiée, il semble que l'observation des systèmes d'ordres inférieurs soient la fondation des découvertes, classification et cartographie des systèmes d'ordres supérieurs. Néanmoins, les intuitions sont le fait d'observations à échelle large, dont les mécanismes sont confirmés par des analyses à échelle fine puis transposés. Cela engendre des risques, tels que l'impossibilité de prendre en compte l'intervention de nouveaux processus intervenant lors du changement d'échelle.

3.3.2 Ramener le sol à un état élémentaire pour le comprendre

Comparable à un changement d'échelle, une pratique courante en science des sols consiste à simplifier un système complexe¹⁴ en une multitude d'éléments simples, plus facile à appréhender. Cette approche considère les unités complexes en tant que simple indicateur. Ceux-ci peuvent être de plusieurs natures, tel que physico-chimique, biologique, morphologique, etc... Ce procédé est souvent épistémologiquement relié au réductionnisme -fragmenter des systèmes complexes en éléments plus simple à analyser, par opposition à l'atomisme, -étudier un système en tant que groupement en particule (atome) ou processus élémentaire. L'atomisme et le réductionnisme sont largement employés en tant que concepts dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Pour le réductionnisme, j'adopte la distinction faite en géologie dans [Guy \(1998\)](#) entre réductionnisme méthodologique et réductionnisme ontologique. Je fournis une courte définition appliquée à la science des sols accompagnée d'un exemple pour chaque distinction.

Le réductionnisme méthodologique est une orientation selon laquelle un processus en science des sols est décrit à l'aide des lois physico-chimiques. Autrement dit, les lois physico-chimiques sont les garants des conditions de formation et d'évolution des sols. Cette orientation est très présente dans les écoles française et allemande de la science des sols, héritière des principes de la chimie agricole. Grandeau en particulier, dans les tomes de *Traité d'analyse des matières agricoles* appuie le rôle de la chimie sur la formation de la terre :

La chimie analytique, appliquée à l'examen des plantes et des animaux, à l'étude des milieux où ils naissent, se développent et meurent, air, sol et eau, doit donc être considérée comme une des branches les plus fécondes et les plus solides de nos connaissances en agriculture.

Il paraît sans doute exagéré de considérer que Grandeau réduit les problèmes de formation des sols à des problèmes d'analyses physico-chimiques. Du moins, il semble à de multiples reprises que la terre, ou sa variabilité, n'est apprécié qu'aux vues de ses propriétés analysées dans le laboratoire. Cela va sans dire que les processus de pédogenèse sont sinon oubliés, pour le moins réduit à des processus plus élémentaires. Grandeau formule une science des sols dont la classification qualitative se base sur des données de l'expérience immédiate.

14. J'utilise la définition donnée par [Mayr \(1989\)](#) pour qui un système complexe est « plus que la somme des parties, non pas dans un sens métaphysique, mais dans un sens pragmatique important, tels que, étant donné les propriétés des parties et les lois de leur interaction, il n'est pas trivial d'en inférer les propriétés du tout ».

Dans un tout autre sens, le réductionnisme ontologique consiste à penser que la science des sols est une science déjà contenue dans une autre. Pour connaître les principes de la science des sols, il suffit de connaître les principes d'une autre science auquel la démarche de la science des sols est extraite. Comme illustration, l'exemple précédant suggère que la chimie suffirait pour établir les lois de formation des sols. Un exemple évident peut être extrait des écrits de [Risler \(1894\)](#). Celui-ci, à travers son ouvrage, défend l'opinion que pour définir une science des sols, une approche géologique suffit. La géologie est à même de prononcer les lois de formation des sols, leur évolution et leur origine. Cette formulation semble aller à l'encontre d'une considération des sols comme entité naturelle, à l'instar des savants de l'école russe. En principe, la science des sols est entièrement contenue dans la géologie selon [Risler \(1894\)](#) :

Mais il fallait commencer par tracer, dans leurs grandes lignes, les rapports entre les formations géologiques et les systèmes de culture et chercher à bien prouver qu'ils sont assez nets pour que la géologie puisse devenir la base de l'agrorologie, affirmant de fait qu'une approche uniquement liée à la science des sols ne saurait être complète sans la connaissance géologique. Ce point de vue de Risler est très débattu, en particulier par ses pairs de l'école russe, lesquels considèrent le sol comme une entité et une science à par entière, la géologie n'étant qu'une partie de la connaissance générale de la science des sols.

Le raisonnement

Le raisonnement suit la méthode. Alors que la méthode fournit une structure de réflexion, le raisonnement en tire les conclusions et analyse. Dans la partie précédente, j'ai montré l'homogénéité relative dans la méthode scientifique. En est-il de même pour le raisonnement en science des sols? Dans ce chapitre, j'analyse le cheminement de la pensée dans une époque, dans des normes sociales. Il s'agit d'étudier comment le raisonnement scientifique s'articule autour d'hypothèses fondamentales, mais que celles-ci sont le fruit d'un contexte environnant le scientifique.

Dans un premier temps j'identifie le contexte, ce que je situe autour du terme de paradigme. Ce paradigme comprend le contexte des normes scientifiques, mais aussi la place des interprétations venues des autres disciplines, c'est-à-dire l'environnement du savant, ce qui façonne le raisonnement. Je continue avec une étude du rôle certain de l'hypothèse au vu des écrits de [Bernard \(1865\)](#). J'étudie de fait les deux options épistémologiques énoncées au second chapitre et la fonction de ces dernières dans la construction des hypothèses. Enfin, j'étudie les logiques de recherches et introduis deux notions; la diffusion des connaissances et son influence sur le raisonnement dans d'autres écoles de pensées et le terme de raisonnement en système.

Je montre que la science des sols s'est développée de manière distincte entre les différents paradigmes de plusieurs sciences naturelles. L'hypothèse joue un rôle majeur dans certaines écoles de pensées mais est complètement évitée dans d'autres, ou une position positiviste forte leur préfère une logique déductive. Enfin, contrairement aux méthodes, le raisonnement en science des sols est largement différencié entre les différentes écoles de pensées, ce qui conduit à l'établissement de conclusions divergentes.

4.1 La démarche

4.1.1 La démarche prend place dans un paradigme

La démarche scientifique en science des sols s'articule autour de faits, auxquels des individus peuvent y rattacher des concepts et des vérifications pour en déduire une conclusion. Par exemple, la matière noire (humus) peut être mesurée quantitativement. Le rôle de la matière noire est analysé dans son action complexe sur l'érosion et la nutrition des plantes, auquel un bilan s'ajoute pour déduire un déficit ou une accumulation. Ces relations faits-conclusions sont le fruit de relations complexes par lequel un raisonnement en montre le fonctionnement et le cheminement. Je note la remarque très juste de [Chatelin \(1979, p. 55\)](#) pour qui :

Le chercheur contrôle rarement la totalité de son véritable itinéraire. Si familière pourtant aux anciennes discussions sur la science, la notion de « preuve » perd alors beaucoup de sa pertinence. Nous [...] préférons présenter comme un « raisonnement » cette opération qui, à défaut de « prouver », doit s'efforcer de « conclure ».

Je m'attache de manière similaire à montrer le cheminement de la pensée, l'argumentation, la dialectique dans la science des sols. Ces notions évoluent dans une époque, dans des normes qui façonnent la vie scientifique. À la fin du XIX^e siècle, l'opposition entre plusieurs courants de pensées et l'émergence de nouveaux travaux offrent des théories, des questions, des pistes de recherche et des méthodes innovantes. [Kuhn \(1983\)](#) propose des pistes de réflexion et je situe commodément ma pensée autour de la notion qu'il définit en tant que « paradigme ». Pour ce dernier, le paradigme est ([Kuhn, 1983, p. 11](#)) :

une découverte scientifique universellement reconnue qui, pour un temps, fournit à la communauté de chercheurs des problèmes type et des solutions.

En ce sens, le paradigme offre des normes (une « boîte conceptuelle ») pour la science d'une époque, sur lesquels les scientifiques accumulent des savoirs. Je montre dans ce chapitre l'avènement d'un changement de paradigme dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle, dont le lecteur a déjà eu l'occasion d'en déduire les prémices à la lecture de l'introduction et du Chapitre 2. Je fournis des exemples variés pour illustrer mes propos, en utilisant particulièrement les travaux des chercheurs de l'école russe.

À la fin du XIX^e siècle, les différentes écoles de pensées décrites dans le Chapitre 2 ont chacune leur propre vision du sol. Elles proposent chacune, aux mots de Kuhn, une science normale « tentative opiniâtre et menée avec dévouement pour forcer la nature à se ranger dans les boîtes conceptuelles fournies ». ¹ J'affine le propos, parlant d'individus autant que de concepts et étends l'interprétation aux « matrices disciplinaires », qui selon [Kuhn \(1983, p. 248\)](#) :

impliquent une possession commune de la part des spécialistes d'une discipline particulière ; matrice, parce que cet ensemble se compose d'éléments ordonnés de diverses sortes, dont chacun demande une étude détaillée. La totalité ou la plupart des éléments faisant l'objet de l'adhésion du groupe [...] en tant que tel, ils forment un tout et fonctionnent ensemble.

1. [Kuhn \(1983, p. 19\)](#)

Du reste, le Chapitre 2 illustre bien ces « matrices disciplinaires ». Les agrogéologues (p.ex. Risler) qui voient le sol comme une dégradation de la couche géologique supérieure de la terre, et dont le sol en tient sa plus importante composition et évolution. Les chimistes agricoles (p.ex. Grandeau), qui étudient le sol en fonction de ses propriétés chimiques avec peu d'intérêt pour son environnement. Les agronomes (p.ex. Grandeau) qui visent à optimiser les propriétés édaphologiques du sol. Ces groupes d'individus ont chacun leur propre « paradigme » auquel une vision nouvelle, celle de Dokouchaev et de ses pairs majoritairement russe, va s'opposer. Il n'est pas facile de classer les idées de Dokouchaev de la fin du XIX^e siècle en tant qu'« anomalie » ou de « révolution scientifique » au sens donné par Kuhn. Kuhn (1983, p. 72) définit l'anomalie comme :

l'impression que la nature, d'une manière ou d'une autre, contredit les résultats attendus dans le cadre du paradigme qui gouverne la science normale.

En ce sens, les travaux de Dokouchaev constatent une anomalie, c'est à dire que les sols ne peuvent pas être représentés par la seule compétence d'une science de la nature (par exemple la chimie agricole). Le terme utilisé par l'école russe le montre bien « pédologie », à la place de science des sols (D'Almeida, 1904, p. 270).

Du reste, Dokouchaev montre par ses écrits qu'il est conscient de l'interaction complexe du sol avec la roche mère, et de l'influence de la chimie sur la formation et l'évolution des sols. Il ne situe pour autant aucun de ses éléments comme unique acteur de la pédogenèse. Margulis (1954, p. 22) rapporte une liste de facteurs de formations du sol selon Dokouchaev : a : le climat, b : la roche-mère, c : la flore et la faune, d : le relief, e : l'âge, et définit le sol s comme fonction des éléments évoqués : $s = f(a, b, c, d, e)$, sans toutefois proposer une quantification exacte de chacun des facteurs. Par déduction, je note que Dokouchaev remarque l'« anomalie » des sciences normales en rapport avec la science des sols. Il propose un nouveau « paradigme » qui n'est pas accepté immédiatement par ses pairs d'autre écoles de pensées. C'est l'état de crise évoqué par Kuhn. Celui-ci se définit en science des sols par une opposition franche, celle des agrogéologues (Risler) et par des remises en cause. Je rappelle à cet égard l'exemple évoqué dans la section 2.3.3 quand H. Hitier, alors élève de Grandeau publie dans le *Journal d'agriculture pratique* un compte rendu du pavillon russe de l'exposition universelle de 1900. L'auteur ne se réfère ni au mot « pédologie », ni aux travaux de Dokouchaev (Boulaine et Feller, 1985), mais permet de rappeler que : « C'est à lui [Grandeau] que l'on doit les plus belles recherches et les plus complètes sur la véritable cause de fertilité de ces terres noires de Russie » (Grandeau, 1900, p. 44).

Une acceptation du nouveau « paradigme » proposé par Dokouchaev est cependant relativement rapide, bien que celle-ci ne soit pas totale. Dès la fin du XIX^e siècle, l'école de chimie agricole française, pourtant d'apparence réticente au départ, reconnaît les qualités du travail de l'école russe. Cela est dû en particulier à une dissémination forte à l'international des travaux russes par de nombreux disciples de Dokouchaev. Certaines sociétés scientifiques acceptent rapidement des idées de Dokouchaev, comme le prouve le compte rendu du *Bulletin of the Geological Society of America* (McGee, 1892, p. 68-81) avec la discussion de Hilgard sur les recherches de A.N. Krassnof (proche des idées de Dokouchaev) rapportée dans Krassnof (1892, p. 80) :

I have been greatly interested in Professor Krassnof's paper, as I have studied the American 'black-prairie soils' in considerable detail; and, on the whole, I

agree entirely with him in his conclusions as to the conditions under which such soils may be formed.²

La notion de « révolution scientifique » pourrait donc s'appliquer dès lors que la fin de la période étudiée est considérée, où les idées de Dokouchaev sont alors largement acceptées. En revenant à Kuhn, le propos de « révolution scientifique » tout juste évoqué peut être contrasté pour signaler que les différentes théories « paradigmes » entre agrogéologues, chimistes et partisans de Dokouchaev ne sont pas totalement inconciliables, ils se côtoient même, et en cela je réfère plutôt à un changement de matrice disciplinaire, dont le paradigme n'en constitue qu'une composante (Kuhn, 1983).

4.1.2 L'observation et le choix

Le raisonnement n'est pas indépendant des choix subjectifs du scientifique travaillant sur les sols. Il convient de remarquer qu'au delà du contexte, le « paradigme » scientifique évoqué précédemment, le raisonnement est ponctué par une suite de choix implicites ou explicites formulés par l'auteur. Il semble que les choix soient guidés par les faits, auxquels tout scientifique y attache une attention particulière, en notant toutefois les différents degrés d'utilisation des faits et leur provenance (Chapitre 3). Or, la science des sols comme plusieurs autres sciences naturelles, particulièrement à la fin du XIX^e siècle, se construit autour de l'élaboration d'une dialectique entre l'observation visuelle (les faits, le réel) et les concepts (l'abstrait, l'opinion, ce qui n'est pas visible immédiatement). Les exemples sont nombreux, citons-en un seul pour illustrer ce propos, extrait de Feltz (1887, p. 190-191) :

M. Kostitscheff n'admet nullement l'opinion des savants qui ne veulent considérer comme terres noires normales que celles qu'on trouve sur des terrains unis. Les observations prouvent au contraire qu'il peut y avoir sur les flancs des collines et sur leurs plateaux supérieurs du tschernozème tout aussi normal, comme épaisseur de couches et comme distribution des matières organiques dans les différentes couches. Il arrive même souvent que dans les endroits montagneux les vallées basses contiennent du tschernozème moins riche en matières organiques ou en couches moins profondes que les flancs des collines ou les plateaux supérieurs.

L'auteur met en lumière la dialectique entre les « opinions » de savants et les « observations » qui « prouvent » le contraire, en notant implicitement la supériorité du visible sur l'abstrait. Le raisonnement par les faits d'observations implique un effacement de l'abstrait, lorsque le raisonnement par concepts explicite l'opinion et, de fait, introduit une part plus grande de subjectivité. La subjectivité et l'opinion peuvent en certains cas être bénéfique, dans le sens où ils comblent des lacunes quand aux manques de preuves ou d'observations directes. Dans cette section je propose de détailler les effets de dépendance à l'observation visuelle sur le raisonnement et je poursuis par une courte étude de l'impact de la subjectivité sur la recherche, en particulier pour combler le manque de preuves lors du raisonnement.

2. Traduction : *J'ai été très intéressé par l'article du Professeur Krassnif, étant donné que j'ai étudié les 'prairies de sol noire' américaine moi-même avec beaucoup d'attention. Globalement, je suis entièrement d'accord avec lui dans ses conclusions sur les conditions par lesquels les sols peuvent se former.*

L'utilisation de l'observation directe intervient par refus de l'abstraction et par la primauté donnée au contact direct avec le sol. L'abstraction est vue comme un écran en face des faits, ce qui limite ou biaise un raisonnement. L'observation peut servir en certains cas à aussi prouver une opinion. En géomorphologie, science naturelle voisine de la science des sols de par sa nature spatiale, Grataloup (1975, p. 66) oppose l'avènement d'une pensée basée sur l'observation directe étayant le monde physique (l'« étape épistémologique »), aux faits subjectifs induits, de fait de rendre l'opinion implicite :

Mais cette étape épistémologique met en évidence l'importance des faits subjectifs dans cette science de l'espace [...] lié au fait qu'il s'agit d'abord d'une discipline dépendante du visuel. Il est donc nécessaire de prendre conscience de cette dépendance, à la fois pour que la science objective de l'espace du relief la surmonte et pour l'étudier en tant que telle, en particulier à travers la notion de paysage.

Les notions d'observations des sols sont très présentes dans les ouvrages sur le sol de la fin du XIX^e siècle. L'ouvrage de Shaler (1892) en est un exemple parmi d'autres du poids de l'observation dans le processus de raisonnement. Il y a peu d'interprétation, la science empirique prend toute son importance. Un simple aperçu de la table des illustrations de Shaler (1892) montre l'importance de l'observation : « View showing the process of rock decay where the material contains solid portions which are not readily corroded »³, ou bien encore « Maps showing comparative development of stream beds in a district when it is forested and when the wood is removed »⁴. Les termes choisis sont caractéristiques de la nature même du raisonnement de Shaler (et beaucoup d'autres) basée sur l'inspection visuelle du sol. Shaler (1892, p. 223-224) organise son propos sur les examens visuels, comme base de la réflexion :

In beginning a study of the soil covering it is well to gain an idea as of the nature of this substance of which it is ordinarily composed. [...] The naked eyes commonly shows us that the mass is composed of two distinct kinds of materials. [...] If the sample has been taken from an old forest bed these bits of rock may be so rare as to escape observation; taken from a lower part of the soil they will always be evident, if not to the eye, at least under a simple microscope, or, if that is not convenient, they may be felt between the teeth as gritty particles⁵.

En matière de manque de preuve lors d'un raisonnement, la subjectivité peut se lier au raisonnement de manière subtil pour parvenir à combler des lacunes de connaissances. Cette subjectivité est parfois explicitement rejetée où implicitement approuvée (voir ci-dessous).

3. Traduction : *Vu montrant le processus de décomposition de la roche où le matériel contient des parties solides qui ne sont pas facilement corrodées.*

4. Traduction : *Cartes montrant le développement comparatif des lits de cours d'eau dans un district lorsqu'il est boisé et lorsque le bois est enlevé.*

5. Traduction : *En commençant une étude de la couverture du sol, il est bon d'avoir une idée de la nature de la substance dont elle est ordinairement composée. [...] Les yeux nus nous montrent communément que la masse est composée de deux type de matériaux [...] Si l'échantillon a été prélevé dans un ancien lit de forêt, les morceaux de roche peuvent être si rares qu'ils échappent à l'observation; pris à partir d'une partie inférieure du sol, ils seront toujours visibles, sinon à l'œil, au moins sous un simple microscope, ou, si cela ne convient pas, ils peuvent être ressentis entre les dents comme des particules graveleuses*

Dans l'optique de l'utilisation de l'observation, la subjectivité intervient lorsque l'observation, forcément à l'échelle humaine, ne peut pas décrire les faits. Une subjectivité induite intervient alors lorsque la temporalité (une échelle de temps trop longue ou trop courte) ou l'échelle spatiale (le processus pédologique) n'est plus à hauteur humaine. Dans un exemple déjà évoqué précédemment, Ramann (1911, p. 101) signale son ignorance quand à la formation des concrétions ferrugineuses du sol en milieu tropical :

Im Laterit der Tropen finden sich weit verbreitet im Boden Eisenkonkretionen, die man meist dem Raseneisenstein zurechnet. Über ihre Bildung ist noch nichts bekannt⁶.

sur les conclusions desquels Ramann ne souhaite spéculer. Ces lacunes sont reconnues à d'autres moments, comme par exemple à la page 158 :

Von der chemischen Wirkung der wildwachsenden Vegetation ist noch nichts bekannt. Die gärtnerischen Erfahrungen lehren aber, daß einzelständige Arten starke Veränderungen im Boden herbeiführen, die die Nachzucht derselben Art erschweren⁷.

Encore une fois, Ramann reconnaît l'impossibilité de continuer son raisonnement faute de faits (de visible). Il ne souhaite pas spéculer et offre un début de réflexion grâce aux expériences horticoles en plein champ, qui ne sauraient être qu'un début de réflexion sans subjectivité apparente. D'autres savants utilisent la spéculation pour avancer dans le raisonnement. Dans un autre registre, Shinkizi (1887, p.96) montre qu'en l'absence de faits la subjectivité et la spéculation permettent un raisonnement afin de déduire une conclusion :

L'apport plusieurs fois répété de petites doses de principes nutritifs nécessaires à la plante, aussi bien, et de la même façon, sur les sols légers et les sols les plus lourds, tout cela amène à penser que la base de ce système pourrait bien trouver son explication dans le climat du Japon. Malheureusement, il n'a été fait jusqu'ici aucune recherche sur la proportion d'azote combiné que l'atmosphère cède au sol à l'époque des pluies. Mais, de ce fait que notre température est plus élevée que celle de l'Allemagne [...] nous pouvons bien espérer que les phénomènes qui se passent dans l'atmosphère et dans le sol, et qui transforment l'azote en ammoniacque et en acides nitreux et nitrique, produiront au moins un effet égal chez nous à celui qu'ils produisent en Europe.

4.1.3 Les interprétations venues des autres disciplines

Les héritages disciplinaires venant de la chimie agricole et de la géologie (Chapitre 2) fournissent une base de réflexion sur les méthodes d'interprétations que les scientifiques s'intéressant au sol peuvent exploiter à la fin du XIX^e siècle. En particulier, les raisonnements survenant d'abord dans la littérature géologique puis dans la science des sols sont nombreux. La géologie est une science spatiale pour laquelle les principes de successions sont

6. Traduction : *Dans les latérites des tropiques se trouvent de manière très répandue des concrétions de fer que l'on impute le plus souvent à la présence de fer des marais. Leur processus de formation n'est pas encore connu.*

7. Traduction : *L'effet chimique de la végétation sauvage [sur les sols] n'est pas encore connu. L'expérience horticole nous enseigne cependant que les espèces uniques induisent de forts changements dans le sol, ce qui rend difficile la progéniture de cette même espèce.*

capitales dans la construction du raisonnement. L'influence de la géologie sur la science des sols se fait à travers de la formation des savants (Dokouchaev est géologue de formation selon [Tandarich et Sprecher \(1994\)](#)), mais aussi à travers des évolutions communes de raisonnements ([Landa et Brevik, 2015](#)). Prenons exemple des raisonnements liés à la vision en trois dimensions du sol. [Tandarich et al. \(2002\)](#) montre que les premières mentions du profil du sol sont variées en termes : « formation, soil layer » ou « layer, vegetable mould, vegetable soil, stratum, substratum » et « level ». ⁸ mais ont pour origine l'intérêt des agro-géologues pour la vision en trois dimensions du sol, en particulier durant la seconde moitié du XIX^e siècle à travers les travaux de Fallou, von Libernau et Orth. La science des sols emprunte sans aucun doute la partie structurelle de la géologie. En ce sens, les agro-géologues ont rapidement fait évoluer les raisonnements après que Dokouchaev les synthétisent et les publient sous la forme du profil en notation A-B-C [Dokuchaev \(1879, p. 25-28\)](#) :

Un siège de trois échantillons : le premier de la couche du sol [A], le second [B]– de la couche de transition, et le troisième [C]– de la roche primitive.

Cette notation renvoie à des termes proches de la géologie. [Tandarich et al. \(2002, p. 336\)](#) rapporte les termes en russe de Dokouchaev : « stroenie chernozem » pour structure du chernozem, « zaleganiya chernozem » pour stratification du chernozem et « ghorizont » pour la couche du sol. Cette notation est similaire chez [Müller \(1889\)](#), mais les concepts de a-b-c ont une autre signification.

Dans les écrits de [Shaler \(1892\)](#), les orientations de raisonnements agro-géologiques sont manifestes. Par exemple, il décrit l'action des racines dans la formation du sol, particulièrement au vu de la dégradation de la roche mère (p. 269) :

When a growing root penetrates into a crevice in the rocks and expands in its further growth, the effect of its action in disrupting the mass may be very great. We may often find fragments of any kind of stone which affords plant food, especially those varieties of limestones of the richer sort, quite interlaced and shot through by the fibers. ⁹

Il fournit une figure montrant distinctement les couches du sol : la partie supérieure (« forest Mould »), la partie du vrai sol (« true soil »), puis enfin un sous-sol (« sub soil ») et la roche mère (« Bed Rock ») (p. 270, Fig. 7). Il introduit des concepts hérités de la géologie pour son analyse du sol, en partant d'une dégradation première de la roche mère, sous l'action de facteurs extérieurs (p.ex. biologique). C'est dans une tendance plus globale qu'il faut comprendre ces analyses. J'ai déjà évoqué précédemment le courant de pensée agro-géologique de la fin du XIX^e siècle, qui s'oppose vivement aux scientifiques pensant le sol comme un corps naturel indépendant. Du reste, Dokouchaev n'est pas considéré comme un défenseur de l'agro-géologie, mais utilise bien ces connaissances géologiques pour construire son raisonnement. La stratification du sol ne serait elle pas, au même titre que la sédimentation en géologie, un processus complexe résultant en une accumulation en couches ? La

8. [Tandarich et al. \(2002, p. 335\)](#) : Traduction : *formation, couche ou couche de sol, moisissure végétale, sol végétal, strate, substrat et niveau.*

9. Traduction : *Quand une racine en croissance pénètre dans l'interstice d'une roche et se développe dans sa croissance ultérieure, l'effet de son action dans la perturbation de la roche peut être très grande. Nous trouvons souvent des fragments de toute sorte de pierres qui donnent de la nourriture aux végétaux, surtout ces variétés riches de calcaires, entrelacés et traversés par les racines fines.*

comparaison est facile, mais les agrogéologues ne se trompent pas, et tôt reconnaissent les différences de concepts. Pour autant, les démarches sont parfois visiblement orientées vers la géologie, puisque cette science offre d'une manière beaucoup plus avancée, une réponse parfois évidente aux processus pédologiques.

Je prends en illustration les écrits de Risler. Ce dernier oriente clairement sa réflexion de par les raisonnements issus de la géologie :

Les anciennes classifications ne répondent à aucune de ces questions [évoquées]. Mais, en s'appuyant sur la géologie, elles pourront être plus utiles aux agriculteurs.¹⁰

Non sans s'appuyer sur des justifications de mise en pratique, Risler justifie son raisonnement :

L'expérience acquise dans les essais de cartes agronomiques, dit M. de Laparent, a démontré que le meilleur travail de ce genre était encore une carte géologique à grande échelle, tant la concordance est parfaite entre la nature du sous-sol et les divisions stratigraphiques qu'on peut y établir.

Je suis entièrement de cet avis.¹¹

En ce sens, Risler montre par avance la justesse et la légitimité de l'emploi d'un raisonnement issu de la géologie. Il ne manque pas, par ailleurs, d'en utiliser les ressources, et ce particulièrement lorsqu'un manque de connaissances sur le sol ne permet pas une explication correcte à première vue :

Dans les terres formées par la décomposition de cette roche [le calcaire coquillier], les eaux chargées d'acide carbonique dépouillent peu à peu ces particules de feldspath et de mica de l'enveloppe calcaire qui les avait recouvertes et amènent la décomposition de ces silicates eux mêmes tandis que la proportion de chaux diminue dans la terre de la surface, celle de la potasse augmente et celle de l'acide phosphorique ne paraît pas diminuer. Ainsi, la culture, loin d'épuiser ces terres privilégiées, semble au contraire augmenter de plus en plus leur fertilité.¹²

L'apport de la chimie agricole à la science des sols est tout autre. Cet apport semble certains mais plus diffus dans les nombreux ouvrages et articles étudiés. Comme pour la géologie, la formation des savants joue un rôle de premier plan dans la transmission de l'héritage d'une discipline. Dans la chimie agricole de la fin du XIX^e siècle, Grandeau est une figure majeure en France. Il est formé en chimie minérale puis chimie organique et physiologie (Boulaine et Feller, 1985), ce qui lui confère immédiatement un raisonnement basé sur la chimie. Une liste de ses travaux en chimie agricole et son influence de chimie sur la science des sols ne serait judicieux. Je me contente de signaler au lecteur que Grandeau est l'initiateur de nombreux travaux sur l'humus, par lesquels il réconcilie chimie minérale et chimie organique en montrant que les plantes ne se nourrissent pas d'humus mais que celui-ci rend simplement assimilable les éléments nutritifs du sol. Ainsi, non seulement la science des sols hérite de la chimie agricole, mais celle-ci est encore prédominante à la fin du XIX^e siècle, comme en prouvent les tomes de méthodologie pour l'analyse des sols édités par Grandeau.

10. Risler (1894, p. 2).

11. Risler (1894, p. 20).

12. Risler (1894, p. 237).

4.2 L'hypothèse

4.2.1 Le rôle de l'hypothèse

Lorsque Kostychev évoque le sol en tant que corps indépendant, il s'oppose à la conception des agrogéologues : « le chernozem est un problème botanique »¹³ déclare-t-il, mais aussi, paradoxalement, à la vision de Dokouchaev sur la formation du chernozem des steppes russes. Kostychev reprend les travaux de Grandeau sur l'humus et son accumulation, mais accorde plus d'importance à son cycle et à l'activité microbiologique du sol qui en découle. La décomposition de la matière organique n'est que partiellement due à la transformation chimique des éléments. Les animaux du sol préparent la décomposition qui s'en suit sous l'action des champignons. Sans l'action presque mécanique des animaux du sol et de certains fouisseurs, la matière organique conserverait sa structure chimique pour un temps long avant la décomposition chimique. Kostychev définit comme un cycle l'action des plantes, de la faune du sol, des champignons et des bactéries dans la décomposition des matières organiques dans les chernozems. Dans son raisonnement, sa conclusion se base sur des faits de laboratoire et de terrain, qui sont interprétés en tant que notion biologique. Il s'agit donc d'une hypothèse, formulée par Kostychev pour définir les notions du système sur lequel il souhaite agir. Une hypothèse peut être simplement définie comme une idée « dont la vérification reste à trouver ».¹⁴ Dans les exemples précédemment évoqués, se retrouvent de manière abondante le rôle des hypothèses dans le raisonnement scientifique et sur l'élaboration des méthodes. L'ouvrage de Bernard (1865) éclaire sur le questionnement scientifique et permet d'expliquer et de comprendre le raisonnement évoqué ci-dessus. Je propose une brève illustration du concept d'hypothèse énoncé par Bernard au regard de la science des sols de la fin du XIX^e siècle et de ses scientifiques.

Bernard (1865) perçoit le raisonnement comme un moyen de déduire les conséquences d'une idée et de la soumettre à l'expérience. Une idée est créée par un fait qui ne rentre pas dans une théorie et dont une hypothèse vise à en expliquer la cause possible :

Instituer une expérience, avons-nous dit, c'est poser une question ; on ne conçoit jamais une question sans l'idée qui sollicite la réponse. Je considère donc, en principe absolu, que l'expérience doit toujours être instituée en vue d'une idée préconçue, peu importe que cette idée soit plus ou moins vague, plus ou moins bien définie.¹⁵

Résumons brièvement la pensée de Bernard. Celui-ci décrit que « c'est l'idée qui est le principe de tout raisonnement et de toute invention, c'est à elle que revient toute espèce d'initiative », puisque « ce n'est pas le fait lui-même qui constitue la découverte, mais bien l'idée nouvelle qui en dérive. »¹⁶ L'idée basée sur un fait nouveau « est donc le point de départ nécessaire de tout raisonnement expérimental. »¹⁷ Bernard (1865, p. 38) souligne le rôle de l'hypothèse :

13. Kostychev (1889).

14. Chatelin (1979, p. 64).

15. Bernard (1865, p. 30).

16. Bernard (1865, p. 55).

17. Bernard (1865, p. 38)

L'hypothèse expérimentale, en un mot, doit toujours être fondée sur une observation antérieure. Une autre condition essentielle de l'hypothèse, c'est qu'elle soit aussi probable que possible et qu'elle soit vérifiable expérimentalement.

En ce sens, un hypothèse acceptée de par sa validité expérimentale devient un théorie. [Bernard](#) (1865, p. 46) nuance l'importance généralement donnée à la théorie et expose leur renouvellement constant :

le progrès réel consiste toujours à changer une théorie ancienne qui renferme moins de faits contre une nouvelle qui en renferme davantage [...] nos idées ne sont que des instruments intellectuels qui nous servent à pénétrer dans les phénomènes; il faut les changer quand elles ont rempli leur rôle, comme on change un bistouri émoussé quand il a servi assez longtemps.

De sorte que Bernard ne conçoit que deux choses immuables en science : les principes et les faits.

Dans ce cadre épistémologique sur le rôle de l'hypothèse offert par [Bernard](#) (1865) et résumé très brièvement ci-dessus, j'approfondis l'exemple précédemment évoqué de Kostychev et de sa matière organique. Pour Kostychev, la théorie énoncée par Dokouchaev n'est pas valide, puisque ce dernier ne reconnaît pas le rôle du climat comme ayant un impact majeur dans la formation des sols. Sont présents ici deux « créations spontanées de l'esprit » qui s'accordent avec la constatation des faits naturels -deux hypothèses transformées en théories. Kostychev s'oppose vivement à Dokouchaev ([Krupenikov et al.](#), 1993, p. 180) de par une première idée lui permettant d'expliquer l'accumulation de l'humus dans les sols de chernozems. Il est pertinent de noter que la théorie de Dokouchaev supplémentée par la théorie de l'humus de Grandeau (voir section 2.1.1), bien que rejetée en partie par Kostychev, a assurément sollicitée des faits nouveaux pour lesquels Kostychev propose une nouvelle théorie. Kostychev rattache une hypothèse à des faits. Il en vient à vouloir affirmer son hypothèse par l'aide des observations de terrain. Kostychev observe que les steppes fournissent les conditions d'accumulation de l'humus. Celles-ci offrent une dégradation rapide des végétaux de surface, contrairement aux forêts qui fournissent beaucoup d'humus mais peu de racines mortes dans les profondeurs du sol ([Krupenikov et al.](#), 1993). Dans les chernozems de steppes, l'accumulation plus rapide que la décomposition est due à la forte densité du sol, son aération limitée, et le déficit en eau durant la période estivale. De ce fait, les résultats des observations et des expérimentations de Kostychev mettent indirectement en lumière le rôle du climat dans l'accumulation de la matière organique des chernozems :

Kostychev's studies experimentally confirmed the validity of many of Dokouchaev's proposals. The denial by Kostychev of the role of climate was not well founded. In conceiving the great importance of temperature and moisture content in the process of accumulation and decomposition of humus, he thereby not only gives due weightage to the role of climate, but elaborates on it.¹⁸

Kostychev reconnaît peu à peu le rôle du climat et la critique vis-à-vis de Dokouchaev perd de sa pertinence. L'hypothèse de Kostychev, initiée par la théorie de Dokouchaev mais non

18. [Krupenikov et al.](#) (1993, p. 180). Traduction : *Les études expérimentales de Kostychev ont confirmé beaucoup des propositions de Dokouchaev. Le déni par Kostychev du rôle du climat n'était pas bien fondé. En concédant l'importance majeure de la température et du contenu en humidité sur les processus d'accumulation et de décomposition de l'humus, il ne donne pas seulement un large poids au climat, mais élabore la-dessus.*

confirmée par l'expérimentation, se retrouve donc à confirmer davantage encore la théorie qu'elle pensait infirmer. Cet exemple montre la méthode expérimentale telle qu'expliquée par [Bernard \(1865\)](#) et appliquée à un exemple concret en science des sols de la fin du XIX^e siècle. Notons toutefois que le cadre choisi pour l'interprétation est volontairement limité à un seul auteur, et que d'autres interprétations sont possibles aux vues des nombreuses définitions de l'hypothèse en science. Les interprétations proposées par [Poincaré \(1902\)](#) et [Hempel \(1967\)](#) retiennent mon attention mais ne sont pas évoquées dans ce mémoire par souci de clarté.

4.2.2 La classification comme hypothèse

Dans une argumentation déductive de leur hypothèse et idées, les auteurs de la fin du XIX^e siècle placent les hypothèses au cœur de leur raisonnement logique. De fait, les hypothèses sont présentes là où l'incertitude est grande. Cette dernière est le résultat d'une volonté d'avancement de la recherche, caractérisée par le nombre important d'ouvrages scientifiques de référence publiés et aux discussions sur les théories de la genèse du sol à la fin du XIX^e siècle. En science des sols, les classifications (section 2.2.3) sont un attribut singulier du haut niveau de conceptualisation et du rôle de l'hypothèse. Les généralisations produites par les classifications, leur pouvoir prédictif, ne sont pas un démenti du rôle de l'hypothèse au cœur des classifications.

Critiquer les hypothèses présentes dans les classifications revient souvent à adopter un point de vue positiviste. J'ai déjà évoqué cette option épistémologique, et je redirige le lecteur vers la section 2.3.3 de ce mémoire. Le rationalisme est souvent évoqué aux regards des classifications en science des sols. Dans la section 2.3.3, je mentionne que les conclusions autour des classifications des sols ne provoquent pas de consensus. La position des positivistes, telle que celle de Grandeau, ne saurait se satisfaire d'une compilation d'hypothèses sur les interactions des facteurs de formation des sols avec leur environnement. Je note donc l'orientation rationaliste des classifications formées par des hypothèses. Par exemple, dans ces « principes de classifications », Dokouchaev (rapporté dans [Margulis \(1954, p. 36\)](#)), montre des critères de classification.¹⁹ Ceux-ci sont basés sur des hypothèses du lien des facteurs de formation du sol avec l'environnement direct. Selon l'hypothèse de Dokouchaev :

Leur caractère général et leurs propriétés principales correspondent entièrement à la combinaison habituelle et normale des particularités physico-géographiques et géologiques de la surface occupée ou de la bande (et qui sont : le climat, la roche-mère, les organismes végétaux et animaux, le relief l'âge des sols).

L'hypothèse est forte, les mots « entièrement », « combinaison habituelle » et « normale » forment une grande partie de l'hypothèse de la classification. Dokouchaev suppose que le sol n'a pas d'autres interactions avec son environnement que celles évoquées dans sa classification, il suppose aussi que ces interactions ne sont pas disproportionnées ou particulières, ce qui restreint fortement les possibilités et forme des hypothèses fortes.

¹⁹ Dokouchaev parle de « principes de la classification ». J'ai précédemment évoqué les principes comme décrit dans [Bernard \(1865\)](#) en tant que chose immuable en sciences avec les faits. J'utilise le terme de principe tel qu'utilisé par Dokouchaev en tant qu'« élément constitutif de quelque chose » et non en tant que proposition fondamentale.

Notons toutefois que les classifications ne sont pas figées dans le temps. Avec l'exemple de Kostychev que j'ai précédemment évoqué, j'ai montré comment une classification rejetée par des scientifiques, par opposition positiviste ou par contestation des hypothèses, peut toutefois être utilisée partiellement et améliorée. Kostychev reprend une partie des faits nouveaux sollicités par la nouvelle théorie (et la classification) de Dokouchaev ainsi que par les théories (plutôt positiviste) de Grandeau. En ce sens, la classification est formée par des hypothèses, et forme une hypothèse *eo ipso*, dont les prédictions peuvent être reprise en partie ou contestées. En reprenant l'illustration de la classification de Dokouchaev, la classification est elle-même une hypothèse selon laquelle le sol peut être décrit par des classes basées sur les facteurs environnementaux.

Enfin, et je l'ai évoqué à de multiples reprises, les classifications, qu'elles soient justes ou non, ont un pouvoir prédictif. À l'évidence, elles peuvent être vues comme des plate-formes et des essais sur les hypothèses fondamentales dans la science des sols. Kostychev reprend des faits de la théorie de Dokouchaev, mais ceux-ci sont le lieu d'une idée et d'une hypothèse différente. En ce sens, la classification est aussi une hypothèse fondamentale.

4.2.3 Déduction ou induction ?

La recherche dans la science des sols ne saurait se baser sur des logiques de pure déductions empiriques. Sans doute peut-on imaginer que les observations sont la clef du raisonnement. Pour autant, plusieurs auteurs montrent que les observations peuvent être utilisées de différentes manières lors du développement des principes de la théorie. Je discerne deux logiques de recherches largement décrites dans la recherche épistémologique : l'induction et la déduction. La déduction fonctionne à travers une logique syllogistique, du général au particulier. L'hypothèse joue un rôle fondamentale en ce sens. Si celle-ci est incorrecte, la conclusion est nécessairement fautive. L'induction au contraire, se construit sur les observations (le particulier) pour faire une généralisation et une prédiction, laquelle peut être validée par l'expérience.

Je remarque au fil de mes lectures que la science des sols de la fin du XIX^e siècle est fortement inductive. Tout comme d'autres sciences naturelles telles que la biologie ou la géologie, la science des sols a une forte propension à la modélisation et à la théorisation. Les théories sont formées par des synthèses abstraites issues des observations de terrain (Dokouchaev et le chernozem), des expérimentations en champ (stations agronomiques de Grandeau) ou encore par les expériences de laboratoire (Grandeau entre autres). L'accent est mis sur les observations plutôt que sur les principes dérivés des observations. Ceci étant dit, Gohau (1992) montre que l'opposition entre déduction et induction est souvent trop simplement employée. En particulier, celui-ci remarque (p. 9) que la conclusion de l'induction a un même degré de généralité que la base d'une déduction et que celle-ci doit être aussi déduite par induction. Gohau (1992, p. 12) met en lumière le rôle de l'invention, qu'il rattache au concept d'« esprit de finesse » de Pascal.²⁰ J'adhère à sa réflexion et j'y associe de fait une courte argumentation en ce sens ayant pour illustration une démonstration commune fournie par Margulis (1954) rapportant les écrits de Dokouchaev.

20. Blaise Pascal, *Pensées*.

Dokouchaev procède en trois phases distinctes pour l'énonciation de sa théorie et sa généralisation. Je les rattache aux concepts précédemment évoqués ci-dessus. La première phase se réduit en une suite d'« observations faites sur le tchernoziome ». ²¹ Pour la démonstration je ne cite que trois des observations faites par Dokouchaev et que j'estime substantielles de sa réflexion (Margulis, 1954, p. 21) :

- un tchernoziome normal, c'est à dire, situé sur une surface plane suffisamment étendue, n'ayant subi ni apport ni érosion, présente une composition chimique et une structure physique en liaison étroite avec la roche mère sur laquelle il repose;
- les éléments minéraux et les éléments organiques sont répartis dans le tchernoziome suivant une loi qui ne souffre pas d'exception;
- il montre une liaison étroite avec une végétation spontanée bien déterminée;

Dans cette première phase, Dokouchaev est entièrement basé sur les observations. Il pose son regard neutre sur le chernozems et en induit des règles générales, des déductions d'ordres supérieurs aux simples observations. Dans une réflexion purement inductive, la prochaine phase se base sur la généralisation de sa déduction. C'est à cela que ses travaux sont connus, à savoir sa conclusion :

le tchernoziome est une formation qui s'est créée sur place par la transformation in situ de la roche-mère sur laquelle il repose actuellement, sous l'action des agents atmosphériques et par mélange avec la matière organique résultant de la décomposition de la végétation steppique. ²²

qui induit la généralisation suivante :

tout les sols sont formés sur place comme le tchernoziome et sous l'influence des mêmes facteurs de formations :

- le climat
- la roche mère
- la flore et la faune ²³

J'observe que Dokouchaev pose de nouvelles vérités, par l'utilisation du syllogisme à partir d'un nombre limité d'observations. En cela le raisonnement de Dokouchaev ressemble à ce que Gohau (1992, p. 11) enseigne, à savoir que « toute inférence se compose d'une phase d'invention et d'une phase d'application brutale de règles ». Dokouchaev fait appel à toutes ses connaissances antérieures pour décrire le chernozem et faire déductions d'observations, il analyse. À cet égard, l'« esprit de finesse » qui introduit un « inductivisme pratique » décrit par Gohau (1992, p. 12) prend pleinement sens. Dokouchaev est guidé par une armature de contraintes, ce qui confiné « par tout le savoir déjà constitué et par la précision du problème à résoudre ». Il n'y a pas de difficulté à imaginer que les insectes, vers de terre, et autres animaux fousisseurs peuvent, de par leurs activités permanentes dans le sol, perturber la distribution minéralogique et organique. Pour autant, certains douteraient que tous les insectes et vers ont une influence sur le sol, et à raison. Il y a beaucoup de variétés d'insectes

21. Margulis (1954, p. 21).

22. Margulis (1954, p. 22)

23. Margulis (1954, p. 22).

et de vers et il est probable que certains insectes se tiennent à l'écart du sol. Cet exemple est dérivé à partir de [Gohau \(1992\)](#).

Enfin, j'oppose tout radicalité dans le raisonnement inductif, comme je le décris ci-dessus. À un « inductivisme pratique » s'ajoute une troisième phase dans la réflexion de Dokouchaev. Celle-ci s'apparente à une déduction, ce qui rejoint ce que [Gohau \(1992\)](#) mentionnait en se posant la question ; « d'où sort l'induction ? » Il semble que chez Dokouchaev, la proposition de sa déduction est fondée d'une précédente induction. Donnons maintenant l'exemple qui m'amène à cette réflexion. Dokouchaev déduit l'action cumulative des facteurs de formation des sols énoncés ci-dessus. J'en ai énoncés trois des cinq rapportés dans [Margulis \(1954\)](#). Cheminant dans sa réflexion, Dokouchaev déduit que si les sols qu'il connaît varient selon ces lois, alors les variations dans la nature et dans l'amplitude des facteurs de formation des sols permettent d'imaginer le type de sol dans une région différente. C'est la prédiction, se basant sur un postulat, à savoir que la théorie est correcte. Je rapporte un exemple en rapport au climat :

Supposons qu'un sol de type donné, un tchernoziome par exemple, avec sa roche-mère et sa végétation caractéristique, soit transporté dans une région plus septentrionale à la fois plus froide et plus pluvieuse. Il est évident que son évolution changera, même en admettant (ce qui est d'ailleurs absurde) qu'il puisse conserver sa végétation primitive. Le changement de climat va forcément modifier l'accroissement annuel de la végétation et, chose bien plus important encore, la température.²⁴

Cette prédiction claire donne lieu à une vérification sur des observations de terrain, comme mentionné alors :

Un cas très proche de celui qui vient d'être envisagé est effectivement réalisé sur la limite septentrionale du tchernoziome. Le changement de climat dans le sens indiqué à eu pour conséquence la création d'une zone de passage entre celle du tchernoziome et celle du podzol - c'est la zone des sols gris ou bruns forestiers.

Je note toutefois que cette déduction logique apparente ne donne pas d'informations sur la construction de la pensée de Dokouchaev. A-t-il prédit les sols bruns forestiers par déduction comme il le laisse entendre (déduction), ou bien l'observation de terrain des sols bruns forestiers l'a conforté dans l'énonciation des facteurs de formation des sols (donc un inductivisme) ? Il est difficile de répondre à cette question au vu des informations dont je dispose. Je note néanmoins que la logique de recherche se fait souvent par des aller-retour entre observation et construction/consolidation de la théorie. Cette idée conforte encore [Gohau \(1992\)](#) qui rejette les visions binaires des positions déductivistes ou inductivistes seules.

4.2.4 Réfutation contre vérification

La logique inductive décrite à la section précédente a des limitations et ne saurait satisfaire toutes les réflexions. Je fais un aparté pour amener la critique principale vis-à-vis de la

24. [Margulis \(1954, p. 22-23\)](#).

logique inductive, fournie par Popper (1973) qui reproche à celle-ci de considérer les énoncés scientifiques comme ne pouvant être vérifiés comme tels de manière décisive. Popper affirme qu'il est impossible de vérifier ou d'infirmer de manière définitive les lois scientifiques, parce que celles-ci peuvent toujours résister aux tests au vues de stratagèmes *ad hoc*. Popper propose que :

au lieu de débattre de la probabilité d'une hypothèse nous devrions essayer d'évaluer les tests, les épreuves, qu'elle a passé, c'est-à-dire que nous devrions essayer d'évaluer jusqu'à quel point elle a pu prouver son aptitude à survivre en résistant aux tests. Bref, nous devrions essayer d'estimer jusqu'à quel point elle a été corroborée.²⁵

Pour Popper, les théories scientifiques ont la possibilité d'être vérifiées (corroborées) ou réfutées (en français : « falsifiées »). La vérification intervient lorsque les faits empiriques viennent corroborer une lois scientifique. Pour Popper, la vérification est fragile car celle-ci ne prouve pas que la loi est valide en général. De plus, la pratique montre que les faits ne corroborant pas la loi sont considérés comme invalides et écartés. En conséquence, la vérification n'est selon Popper pas fiable : « si ce sont des confirmations que l'on recherche, il n'est pas difficile de trouver, pour la grande majorité des théories, des confirmations ou des vérifications. »²⁶ Popper y oppose la réfutation, qui vise à montrer la validité d'une loi vis-à-vis de sa résistance au démenti :

Toute mise à l'épreuve véritable d'une théorie par des tests constitue une tentative pour en démontrer la fausseté ou pour la réfuter. Pouvoir être testée c'est pouvoir être réfutée ; mais cette propriété comporte des degrés : certaines théories se prêtent plus aux tests, s'exposent davantage à la réfutation que les autres, elles prennent, en quelque sorte, de plus grands risques.²⁷

Ayant exposé de manière très succincte la vision critique de Popper sur la vérification, étudions comment la réfutation s'appliquerait à l'exemple précédemment évoqué de la théorie de Dokouchaev, si tant soit peu qu'elle puisse y être appliquée.

Lorsque Dokouchaev évoque l'âge (géologique) des sols de chernozem, celui-ci émet l'hypothèse que les sols d'altitudes élevés sont les sols les plus anciens. Il attribue cette ancienneté au fait que ces lieux sont les premiers à avoir émergé des fonds marins et « aussi les premiers à réaliser les conditions nécessaires à la formation du sol (lorsque, bien entendu, celui repose sur une roche-mère de nature sédimentaire) ». Cette hypothèse formulée, Dokouchaev remarque que de fait, les sols de chernozems les plus « épais et gras » se trouvent sur les hauts plateaux. Son idée n'est pas facilement vérifiable et d'aucuns souligneront que les sols les plus anciens se confondent avec l'altitude. L'idée de Dokouchaev n'est alors pas « vérifiée » mais est acceptée car celle-ci n'est pas « réfutable » dans le sens où l'influence de l'altitude ne vient pas montrer que l'âge des sols n'est pas important dans leur épaisseur et leur contenu en matière noire. Dokouchaev vient asseoir son idée en spécifiant que le relief « n'est pas un facteur créateur de type, mais c'est un facteur qui modifie les caractères d'un type de sol ». Cet exemple succinct rend faible l'idée d'une vision purement binaire de la construction de la science des sols à la fin du XIX^e siècle.

25. Popper (1973, p. 256).

26. Popper (1973, p. 64).

27. Popper (1973, p. 65).

De fait, je note que les réflexions de Popper en particulier ne sont pas exemptes de critiques. Une opinion intéressante vient de Gohau (1992) pour qui la vérification tient dans la certitude que les hypothèses habillant les théories sont validées. Il note judicieusement que la validité des hypothèses n'est possible que lorsque la théorie est elle-même correcte. Or, celle-ci n'est pas directement vérifiable et les hypothèses s'y attachant ne sont finalement démasquées comme fausses que lorsque la théorie elle-même est supplantée.

4.3 Les logiques de recherche

4.3.1 Le réseau et le social

Le lecteur se trouvera peut-être étonné de quelques répétitions sur l'influence du contexte social de la construction scientifique. Ce sujet est en effet déjà abordé précédemment dans la section 4.1.1 à travers les notions de « paradigme » et de « matrices disciplinaires » de Kuhn. J'ai voulu développer davantage le thème et l'élargir au contexte plus large de la société afin de comprendre la contribution du réseau social dans la construction et la diffusion des idées scientifiques. Inkpen et Wilson (2013, p. 138) montrent qu'il serait réducteur de considérer qu'il n'y a qu'« une » société et qu'« une » influence sociale : « The assumption of a single and easy to identify 'society' with, likewise, simple and singular 'social influences' is a fallacy that requires some correction ».²⁸ De la même manière, les scientifiques ne sont pas des agents passifs répondant à une simple idéologie ou mouvement, mais au contraire des individus qui interagissent avec des réseaux d'échelles différentes. La plus petite échelle serait celle du laboratoire et de l'interaction avec les collègues. Cette échelle est largement décrite dans la sociologie des sciences, par exemple dans Latour et Woolgar (2013). Les autres relations ne disparaissent pas pour autant et le scientifique est aussi influencé par les réseaux autres que professionnels. Enfin, notons que des réseaux asociaux existent, et l'individu se situe dans une classe économique et un réseau international de professionnels (Inkpen et Wilson, 2013). C'est cette dernière situation que je présente dans cette section, du fait de la rareté des informations disponibles pour caractériser les deux autres niveaux d'interactions. Cela demanderait assurément beaucoup d'efforts pour récolter des informations sur les interactions quotidiennes au sein du laboratoire des scientifiques du sol de la fin du XIX^e siècle, ou encore de révéler l'influence des relations extérieures au cercle professionnel, tant les sources viennent à manquer et ne sont pas à ma disposition pour ce mémoire. À cet égard, j'observe les interactions professionnelles internationales avec une attention particulière pour le réseau et la façon dont celui-ci contribue à la création et à la diffusion des connaissances sur les sols. Je prends comme illustration la dissémination des travaux de l'école russe à la fin du XIX^e siècle, par une formidable combinaison de conférences et d'exhibitions, d'échanges de scientifiques russes à l'étranger et de correspondances avec les scientifiques étrangers.

Dokouchaev et son étudiant V.I. Vernadskii ont eu l'occasion de présenter leur travail à l'exposition universelle de 1889 à Paris. Celle-ci leur donne la possibilité de présenter leur ré-

28. Traduction : *L'hypothèse d'une seule et simple « société » avec, de même, des simple et singulières « influences sociales » est une idée fausse qui demande quelques corrections.*

centes recherches à leurs pairs français et étrangers. Dokouchaev était au courant de l'attrait de ses recherches parmi les scientifiques français (Moon, 2018, p. 4) et présente de nombreux travaux traduits en français, parmi lesquels l'affichage des objets présentés. L'objet de la présence de Dokouchaev à l'exposition universelle était autant de présenter ses travaux, de les disséminer, que de nouer des contacts avec les scientifiques français. Les rapports de l'exposition laissent penser que l'entreprise fut un échec, tant la partie agricole du pavillon russe est ignorée. Pourtant, c'est bien par les contacts établis par Dokouchaev à ce moment que des scientifiques français découvrent alors son travail sur les sols. C'est le cas, je l'ai déjà signalé, du géologue De Margerie qui rend un rapport enthousiaste de sa rencontre avec Dokouchaev (De Margerie et Raveneau, 1900), mais aussi par la parution peu après d'une note dans le *Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie* par M. Rutot (Société belge de géologie et d'hydrologie, 1890, p. 112-117). Cette note détaille succinctement les travaux de Dokouchaev. Cette note est sans doute le fruit d'un échange lors de l'exposition de Paris, mais peut être aussi de par l'intermédiaire de Loewinson-Lessig, ancien élève de Dokouchaev, qui lui aussi fournit une note bibliographique dans le même ouvrage (p. 117-125). Quoi qu'il en soit, Dokouchaev a certainement influencé ses pairs à partir des contacts noués à l'exposition universelle. Notons que celui-ci est probablement très réceptif aux travaux de Grandeau sur l'humus (la matière noire), même si la paternité de certaines recherches est discutée (voir la note de bas de page dans Grandeau (1900, p. 44)).

Voyons maintenant un autre aspect du réseau dans la création et la dissémination du savoir scientifique. Je l'ai évoqué quelques fois déjà, Dokouchaev a de nombreux élèves qui ont travaillé activement pour développer ses idées à l'étranger. Loewinson-Lessig entre autres, participe pleinement à l'édition des *Bulletins de la société belge de pédologie*, il en est aussi l'un des fondateurs. Aux États-Unis, Moon (2018) nous apprend que Niels Hansen, agronome, rencontre V. R. Vil'iams alors membre de la délégation russe à l'exhibition de sols à Chicago en 1893. Ces derniers échangent énormément sur la science des sols et Hansen participe ensuite à la diffusion des idées de Dokouchaev en regrettant qu'il n'y ait pas une plus large diffusion des travaux russes : « It would be of great benefit to American students to have at least abstracts of these publications put into English »²⁹.

Enfin, le rôle des communications entre scientifiques est souvent présenté comme majeur dans la création scientifique. Hilgard a très rapidement échangé des correspondances avec certains scientifiques russes (d'après Moon (2018)). Dès 1870, il correspond avec le géographe A.I. Voeikov qui lui conseille vers 1892 de prendre contact avec Dokouchaev. Hilgard ne comprend pas le russe et pense écrire en Allemand, sa langue natale. Il ne le fait cependant pas mais continue sa correspondance avec Voeikov qui l'encourage à visiter la Russie et à approfondir ses connaissances sur la science des sols russe. Hilgard écrit aussi à P.V. Ototskii, éditeur de la revue russe *Pochvovedenie* pour lui demander de fournir des résumés des publications en Français ou Allemand, ce qui est chose faite en 1911. Je vois avec cet exemple le rôle important de la correspondance dans la diffusion du savoir scientifique. Hilgard apprend l'existence de Dokouchaev à travers une correspondance avec un géographe russe. C'est encore à travers une correspondance que Hilgard obtient que des résumés en langue étrangère soient ajoutés aux publications du journal russe. Cela a de manière certaine aidé

29. Moon (2018, p. 12). Traduction : *Il serait d'un grand bénéfice pour les étudiants américains d'avoir au moins les résumés de ces publications ajoutés en Anglais.*

à la diffusion des travaux de l'école russe aux États-Unis.

4.3.2 La raisonnement en système

Dans la section 2.3.2 j'évoque l'utilisation assez courante des modèles, version simplifiés de la réalité, pour décrire les phénomènes pédologiques à différentes échelles spatiales. Mon raisonnement m'amène à traiter des systèmes et de leur emploi en science des sols à la fin du XIX^e siècle. Un système peut être défini par (Bennett et Chorley, 2015, p. 1) :

a set of logical operations acting upon, and acted upon by, one or more inputs. These inputs lead to the production of outputs from the system and this process of throughput is capable of either sustaining the operational structure of the system, or of transforming it, perhaps catastrophically.³⁰

Une définition plus proche de mon propos est fourni par Chorley et Kennedy (1971) et une classification est proposée et reprise dans Inkpen et Wilson (2013, p. 103). Un système propose une structure globale qui induit que la réalité peut être comprise dans une structure commune. Dans le système, la réalité va se comporter toujours de la même manière et les prévisions sont possibles. Dans ce cadre, le système peut être compris comme un concept intégrant les différentes entités de l'environnement dans une structure analytique commune. Je dresse volontairement une définition claire du système car cette terminologie n'est pas employée dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle, de même que reconnaître que cette science s'organise en système est nouveau. Pour ne pas altérer le raisonnement, je simplifie et j'ignore volontairement la différence entre système inductif et déductif, contrairement à Bennett et Chorley (2015).

Alors, quelle différence se dresse entre système et modèle ? Les deux peuvent paraître interchangeable. Un système a une vocation plus universelle qu'un modèle, celui-ci servant un but bien particulier. Un système environnemental est supposé existant dans la réalité, même si les relations entre entités sont définies par l'utilisateur. Tout au contraire, je reprends l'idée évoquée dans la section 2.3.2 selon laquelle le modèle n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité, mais n'est pas a priori sensé avoir une nature véritable en lui-même. Des modèles de la réalité à plusieurs échelles spatiales décrit dans la section 3.3.1, j'appuie la distinction avec les paramètres ou facteurs environnementaux qui aident au raisonnement et permettent d'établir un lien de causalité entre des facteurs de formation du sol. Pour ce faire, je montre comment les raisonnements de Dokouchaev sur la formation des sols de chernozems sont un exemple de pensée en système. La valeur de raisonnement en système dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle n'a jusqu'alors pas été évoqué, je fournis au lecteur les clefs de mon raisonnement ci-dessous.

Dans l'exemple donné en section 4.2.3, les théories de Dokouchaev apparaissent liées autour de la formation des terres de chernozems, et le sujet est divisé en plusieurs facteurs environnementaux qui, chacun, est évoqué tour à tour. Par exemple le relief, le climat, la flore,

30. Traduction : un ensemble d'opérations logiques agissant sur, et ayant agit sur, une ou plusieurs entrées. Ces entrées conduisent à la production de sorties du système et ce processus de production est capable soit de maintenir la structure opérationnelle du système, soit de la transformer, peut-être de manière catastrophique.

etc... Ces derniers sont étudiés en fonction de leur fonctionnement propre et de leur réaction supposée à un changement, mais aussi à leurs réactions aux changements des autres composantes et de la réaction des autres composantes face à leur propre changement. Ce système de comportement est visible dans ce que rapporte [Margulis \(1954\)](#) sur les travaux de Dokouchaev. Citons seulement le vocabulaire utilisé dans sa définition nouvelle des sols : « transformation de », « sous l'action de », « par le mélange de » qui montre l'intérêt porté aux facteurs extérieurs dans la formation du sol et de leur interdépendance et évolution commune. Pour cela, j'utilise le mot de « système » pour définir la contribution de l'interaction de chacun des composants environnementaux définis par Dokouchaev dans la formation des sols.

L'avantage du système est sa forte capacité de prédiction. J'ai déjà évoqué dans la section 2.1.4 l'héritage de Dokouchaev et ses liens avec Mendéléev. Ce dernier montre le pouvoir d'une classification performante sur la prédiction d'un nouvel élément pas encore observé dans la nature. Il en va de même pour la théorie de Dokouchaev, le système, dont ce dernier en assemble les composantes. La difficulté réside dans l'analyse des changements des composantes du système. A ce propos, [Inkpen et Wilson \(2013, p. 107\)](#) note que :

a more complex system is one where the entities and relationships are dynamic in the sense of being specified and identified and measured as they change. Full understanding of the system implies that explanation can be generalized and applied to all systems with the same entities and relationships.³¹

Dokouchaev ne paraît pas connaître la contribution relative de chacune des composantes environnementales. Au mieux, il en connaît les relations entre elles et la façon dont celles-ci évoluent. Par exemple, une région septentrionale plus froide et pluvieuse que les steppes de chernozems génère une végétation différente. Dokouchaev reconnaît, dans ce que j'appelle système, cinq composantes environnementales. Celles-ci sont le climat, la roche-mère, la flore, le relief et l'âge. Chacune de ces composantes fait partie du système. Celui-ci fournit une prédiction de la réalité. Aux mêmes conditions surgit le même type de sol.

Enfin, je note que Dokouchaev parle d'un système fermé, c'est à dire que d'autres possibles facteurs environnementaux qu'il n'aurait pas décrit ne peuvent pas rentrer en compte dans une prédiction. Toute type de sol peut être expliqué par le système, de par l'infini combinaison de la variation de ces composantes. Dans ce contexte, je note que le système ne peut être compris en dehors des théories qui l'ont vu naître. Dokouchaev de par sa théorie fournit une explication de la formation des sols mais aussi une prédiction comprise dans la structure du système.

4.3.3 Un décryptage par omission

Il est habituellement reconnu que les explications invoquent des relations simples de causes à effets. Les structures d'explications s'en trouvent largement simplifiées car un événement

31. Traduction : un système plus complexe est celui où les entités et les relations sont dynamiques dans le sens où elles sont spécifiées et identifiées et mesurées lorsqu'elles changent. La pleine compréhension du système implique que l'explication peut être généralisée et appliquée à tous les systèmes ayant les mêmes entités et relations.

particulier engendre un résultat particulier. Je ne saurais me satisfaire de ces structures simplistes au vu de mes lectures. Le décryptage des faits engendre des connaissances par des relations de causes à effets complexes, qui ne sauraient être réduites à la simple notion de successions ou de générations. La succession se produit quand un événement produit une cause dont le lien entre elles n'a pas d'existence propre. Dans la génération, la cause et l'effet sont reliés et interagissent. En sciences naturelles et plus particulièrement en science des sols, la causalité générative a toute sa place car les éléments forment le plus souvent un système (voir section précédente) et le scientifique ne saurait se satisfaire d'une causalité de successions, qui avouerait son ignorance du phénomène naturelle.

Les relations de causes à effets peuvent être représentés par des liens. Le plus simple, déjà évoqué est celui qui lie deux phénomènes dans un lien direct. La cause précède l'effet. Par exemple, Hilgard (1918, p. 17) expose l'action de l'eau sur la dégradation chimique des roches dans la formation des sols. L'action de l'eau « engendre » la dégradation chimique de la roche. Par souci de compréhension, Hilgard omet certains faits mais ne s'en satisfait pas et continue son raisonnement en expliquant que l'eau pourrait dissoudre la roche, mais que certaines roches resteraient insolubles, même avec une eau pure. De plus, « strictly pure water does not occur, it being difficult to obtain it even artificially. »³² Il rajoute en conséquence des intermédiaires entre l'eau et la dégradation chimique de la roche. L'eau elle-même ne dégrade pas la roche, mais l'action de solvants (dioxyde de carbone, carbonates, oxygène) dont l'eau est chargée engendre la dégradation chimique évoquée :

Among the "impurities" almost always contained in natural water, there are several that materially increase its solvent power.³³

La raisonnement d'Hilgard prend forme. Une fois encore, celui-ci remarque que les phénomènes sont plus complexes que la simple causalité entre eau-solvants-dégradation. La chaîne causale se met en place, la possible cause (l'eau ?), se propage en une multitude d'effets qui résultent en un événement : la dégradation de la roche. Dans mon exemple, Hilgard omet volontairement les causes intermédiaires pour parfaire son raisonnement. Une fois identifiée l'eau qui, par l'action intermédiaire des solvants contenus dans l'eau, dégrade la roche, Hilgard poursuit son argumentation dans la chaîne de causalité qu'il décrit. Ainsi, le dioxyde de carbone dégrade la roche indirectement, par le contact avec les acides carboniques contenus dans l'eau. Sans ces derniers, l'action de dégradation est très limitée. De plus, le dioxyde de carbone est contenu en grande proportion dans l'air. Il en résulte que l'air n'est pas une condition, mais sa présence dans les sols rend la présence du dioxyde de carbone plus probable. Pour l'action de l'eau carbonaté, celle-ci se fait par la présence de certaines bases dans les roches, tels que la potasse. Enfin l'oxygène ne peut dégrader la roche que si la roche elle-même présente des minéraux capables d'oxydation, tels que les monoxydes de fer. Auxquels cas, la transformation des minéraux par l'action de l'oxygène de l'air entraîne une augmentation du volume du sol qui résulte en une dégradation de la roche physiquement, par les craquements et fissures qu'elles provoquent. D'un raisonnement simple, par omission de faits et en utilisant les principes de causalité déductifs,

32. Hilgard (1918, p. 17). Traduction : *trouver de l'eau strictement pure ne se produit pas, il est même difficile d'en produire artificiellement.*

33. Hilgard (1918, p. 17). Traduction : *Parmi les « impuretés » presque toujours contenues dans l'eau naturelle, il y en a plusieurs qui augmentent matériellement son pouvoir dissolvant.*

Hilgard étoffe son argumentation en faisant intervenir de nombreux nouveaux événements entre l'eau et la dégradation de la roche. Ces événements ne sont pas simplement linéaires et des processus de rétroactions sont aussi à l'œuvre.

Signalons plus encore la différence entre les structures de causalité déductives et inductives, dont le lecteur trouvera les références correspondantes dans la section 4.2.3. Dans l'exemple précédent de la dégradation de la roche, Hilgard fait intervenir des processus déductifs. Une cause est connue, sa conséquence aussi. Dans l'interprétation de cette exemple dans une forme inductive, Hilgard connaîtrait la cause de la dégradation, ainsi que ces conséquences (la roche se décompose), mais en ignorerait les liens qui unissent les deux événements. Enfin, notons que les deux cas ci-dessus sont plausibles, mais qu'il faudrait regarder du côté de ce que [Inkpen et Wilson \(2013\)](#) appelle abduction et qui me paraît appropriée dans l'exemple énoncé. Dans l'abduction, l'effet (la roche se dégrade) se produit sous l'action connus des solvants (p.ex. dioxyde de carbone). La cause peut être recherchée : ou les solvants se trouvent-ils contenus en quantité dans les sols ? La réponse : l'eau, en partie est la plus plausible, mais d'autre composantes peuvent contenir du dioxyde de carbone, tels que les roches calcaires qui elles-mêmes libèrent du dioxyde de carbone dans leur dégradation. La cause est donc recherchée « a posteriori » à l'effet. Les causes sont acceptées étant donné leur probabilité de se produire. Il n'est pas possible de savoir à partir des écrits de Hilgard comment son raisonnement s'est réalisé. A t-il d'abord remarqué l'action de l'eau sur la dégradation de la roche ou bien a t-il d'abord compris l'action des solvants sur la dégradation chimique de la roche. Ses textes suggèrent la première option, mais rien ne vient le confirmer avec certitude et il paraît vraisemblable que c'est l'action des deux options qui amène Hilgard à conclure sur l'action de l'eau sur la dégradation de la roche, par l'aller-retour permanent entre causes, effets, et événements. j'en reviens aux principes de construction de la connaissance de manière circulaire, tels qu'évoqués dans la section 4.2.3.

Analyse de textes

Dans les deux précédents chapitres j'analyse les méthodes puis le raisonnement dans la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Je montre que les méthodes sont relativement homogènes entre écoles de pensées lorsque les raisonnements et les conclusions diffèrent de manière importante. Je complète ce travail avec une étude du lexique qui ouvre une nouvelle perspective sur ces recherches.

Pour ce faire, je divise mon travail sur le lexique en deux parties, lesquelles s'appuient sur deux textes provenant de deux écoles de pensées. La première partie consiste à fournir une analyse quantitative simple alors que la seconde fournit une analyse contextuelle des unités lexicales. Les deux textes proviennent de [Feltz \(1887\)](#) et de [Risler \(1894\)](#) afin de déceler les différences flagrantes entre les écoles de pensées russes et les agrogéologues français, tant du point de vue de l'analyse quantitative des mots, que des différences qualitatives dans l'utilisation des unités lexicales.

Je montre que les différences entre vision utilitaire du sol et vision globale sont flagrantes. L'analyse lexicale montre que les différences majeures résident dans l'origine des disciplines respectives des auteurs, à savoir la biologie/chimie agricole pour Kostycheff et la géologie pour Risler. De plus, je note que les mots de sens commun sont très présents, ce qui montre une science nouvelle dont le vocabulaire n'est pas fixé.

5.1 Les définitions du sol

Les définitions donnent une version synthétisée du lexique et de la formulation propre à une école de pensée, mais aussi à un groupe de scientifiques à un moment donné. Il se retrouveraient des définitions différentes selon que l'on s'adresse aux paysans, aux scientifiques ou à un public de non-spécialistes. Le dictionnaire de Littré offre une première indication contextuelle, qu'est-il compris du sol à ce moment ? La réponse est plutôt agronomique (Littré, 1874, p. 1111) :

La couche supérieure des terrains agricoles, le terroir considéré par rapport à sa nature, à sa qualité. Un sol fertile.

Cette définition concise montre l'intérêt certain pour le sol dans sa fonction édaphologique. Un rapide regard à la définition de « terre » indique que la confusion n'est pas présente entre « terre » et « sol ». Le terme de « couche supérieure » implique une « couche inférieure » ou un « sous-sol » composé d'une roche inaltérée. La couche supérieure, la terre agricole, n'a qu'une fonction productrice pour les plantes cultivées. Une définition similaire mais plus approfondie est fournie dans les livres de seconde édité par Vidal de la Blache et Camena d'Almeida en 1900. Ceux-ci sont un bon exemple de ce qui est su, et diffusé dans la société sur les sols. La définition est la suivante :

On appelle écorce terrestre la partie du globe qui est accessible à l'observation [...] C'est de toutes ces actions, mécaniques et chimiques, que résulte la décomposition de la surface de l'écorce. Quand la végétation s'est emparée de ces terres ameublées, ses résidus y constituent l'humus, terre végétale plus ou moins riche en débris organiques.

Enfin y vient la définition du sol, ce que Camena d'Almeida nomme « terre végétale » :

Les débris des végétaux tombent à terre, pourrissent, forment de l'humus ou terreau, et se mélangent avec les poussières apportées par le vent, quelquefois avec les parties mobiles entraînées par le ruissellement des eaux, enfin avec des résidus d'altération du sous-sol, pour constituer une couche superficielle légère, meuble, brunie ou noircie par les matières organiques, sur laquelle portent spécialement les travaux agricoles¹ [...].

Les deux définitions évoquées ci-dessus sont proches par la fonctionnalité qu'elles attribuent aux sols. Les sols sont des supports de l'agriculture, la « terre végétale » sert la croissance des plantes et est formée par l'accumulation de cette dernière, le sous-sol est une formation dure étudiée par les géologues. Cette conception du sol est concordante avec les explications fournies dans la section 2.1.1 avec le prépondérance des géologues dans la science des sols en France.

Une toute autre vision est proposée par Dokouchaev et sa définition large mais schématisée du sol qui est très différente d'une vision purement édaphologique :

Le tchernoziome [c'est à dire par extension le sol pour Dokouchaev] est une formation qui s'est créée sur place par la transformation in situ de la roche mère

1. Camena d'Almeida (1903, p. 180).

sur laquelle il repose actuellement, sous l'action des agents atmosphériques et par mélange avec la matière organique avec résultant de la décomposition de la végétation steppique.²

Cette définition englobe un spectre beaucoup plus large d'actions environnementales sur les sols. Il n'est pas mentionné le rôle que les sols ont pour les hommes, mais Dokouchaev ne différencie pas le sous-sol de la surface meuble. Les deux couches font parties du sol. Ramann offre une définition plus générale et concise : « Der Boden (Erdboden) ist die obere Verwitterungsschicht der festen Erdrinde »³ (Ramann, 1911, p. 5), mais ne s'aventure pas au delà et semble reprendre à son compte la définition de Fallou :

Böden sind die losen Massen mineralischer und organischer Bestandteile, die durch Verwitterung und Umbildung an der Erdoberfläche entstehen.⁴

En notant toutefois les différences de conceptions entre agrogéologues et ceux qui voient le sol comme un support pour les plantes, en reprenant le définition de Bjørlykke (scientifique norvégien) :

Bodenkunde ist die Lehre vom Boden als Wohnstätte der Pflanzen. Es ist ein Gebiet des Wissens, das nach der einen Seite an die Geologie, nach der anderen an die Botanik angrenzt.⁵

L'utilisation du sol, non par l'homme pour la croissance des cultures, mais pour les plantes en général comme support de leur croissance est reporté dans les travaux de Hilgard. Ces derniers montrent une vision plus large des sols, mais n'acceptent pas alors la définition proposée par Dokouchaev. L'étude des sols est un problème botanique (Yarilov, reporté dans (Krupenikov *et al.*, 1993)) plutôt que géologique. En ce sens les deux conceptions s'affrontent dans la définition même du sol.

A soil is the more or less loose and friable material in which, by means of their roots, plants may or do find a foothold and nourishment, as well as other conditions of growth. Soils form the uppermost layer of the earth's crust; but the term does not indicate any such definite average texture as is sometimes implied by its popular use to designate certain loose, loamy materials found in older geological formations.⁶

Notons toutefois l'emploi du mot « sol » chez Dokouchaev et Hilgard, se réfère aux mots de « terre », « terre végétale » et « couche superficielle » chez Camena d'Almeida et dans le dictionnaire de Littré. Caractériser la science des sols comme un objet d'étude propre commence par l'utilisation d'un lexique approprié. J'étudie plus en détail ces unités lexicales dans les sections suivantes. Enfin, dans deux autres ouvrages à ma disposition, une

2. Margulis (1954, p. 22).

3. Traduction : *Le sol (terre) est la couche d'altération supérieure de la croûte terrestre solide.*

4. Ramann (1911, p. 5). Traduction : *Les sols sont les masses en vrac de constituants minéraux et organiques qui résultent de l'altération et du remodelage à la surface de la terre.*

5. Traduction : *La science du sol est l'étude du sol comme habitation des plantes. C'est un domaine de connaissances qui a une frontière avec la géologie, d'une part, et la botanique, d'autre part.*

6. Hilgard (1918). Traduction : *Un sol est le matériel plus ou moins meuble et friable dans lequel, par le biais de leurs racines, les plantes peuvent ou trouvent un pied et une nourriture, ainsi que d'autres conditions de croissance. Les sols forment la couche supérieure de la croûte terrestre; mais le terme n'indique pas une telle texture moyenne qui est parfois utilisée dans le langage populaire pour désigner certains matériaux lâches et limoneux trouvés dans des formations géologiques plus anciennes.*

définition succincte n'est pas disponible. Risler (1894) ne donne pas de définition précise, mais emploie une conception similaire à celle de Camena d'Almeida (1903) en différenciant la terre végétale et la roche dégradée. Il énonce peu le terme de sol en lui-même et lui préfère le terme de terre auquel le contexte voue une définition claire (matière végétale pour l'agriculture). Dans Grandeau (1897b) une définition n'est pas donnée, mais le terme de sol n'est pas usité, contrairement au terme de matière agricole. La chimie agricole utilise plus « la matière », contrairement à un ensemble, un « sol ».

5.2 Examen quantitatif

5.2.1 La méthode

Un examen quantitatif simple du lexique se doit de relever les terminologies récurrentes dans un texte. Une importance particulière est fournie pour l'analyse des mots et de leur fréquence dans le texte. Il ne s'agit pas recenser les verbes, substantifs ou adverbess, mais bien de comptabiliser les mots (par opposition aux groupes lexicaux évoqués par la suite). Pour ce faire, je propose une analyse de lexique lemmatisée, dans lequel la racine grammaticale des mots est privilégiée. Par exemple, un pluriel est ramené au singulier et les formes conjuguées sont ramenées à l'infinitif. Ce vocabulaire épuré est comptabilisé et présenté pour chaque texte. De plus, je fournis une liste succincte du nombre d'apparition des mots, résultat de la seule étude des chiffres. J'analyse deux textes. Le premier vient de Feltz (1887), article scientifique publié en 1887 dans les *Annales des sciences agronomiques*. Il s'agit d'un compte-rendu/traduction d'un texte de M. Kostychev. Plus d'informations sur Kostychev sont disponibles dans la section 2.1.4. Le second texte est le premier chapitre du Tome 1 de la *Géologie agricole* de E. Risler. Cet ouvrage paraît en 1894 et forme la base de nombreuses études sur la science des sols en France. Plus d'informations sur Risler sont disponibles dans la section 2.1.1. Ces deux textes sont choisis pour illustrer les différences au sein d'une même époque. Le texte de Feltz (voir Annexe A) est un article scientifique, traitant du sujet de la terre noire dans les chernozems, et vise un public de spécialistes. Le texte de Risler (voir Annexe B) est un chapitre d'ouvrage, traitant des sols en fonction de leur composante géologique, et s'adresse aussi bien aux spécialistes qu'aux gestionnaires des stations agronomiques. Enfin, les deux textes représentent deux courants de pensées largement évoqués dans ce mémoire. L'un propose une vision génétique des sols, globaliste, quand le second est issu du courant des agrogéologues. J'analyse ces deux textes séparément puis conjointement.

5.2.2 Article de Feltz (1887)

L'analyse lemmatisée des mots de l'article de Feltz informe de la récurrence des mots suivants. Le mot « terre noire » apparaît le plus souvent avec 166 récurrences. Le mot « matière » est aussi très présent avec 135 répétitions. S'en suivent les mots de « décomposition » (70 fois), « organique » (66 fois), « sol » (49 fois), « année » (32 fois), « quantité » (32 fois),

TABLE 5.1 – Tableau de fréquence d'apparition des mots dans le texte de Feltz (1887).

Mot	Fréquence d'apparition	Mot	Fréquence d'apparition
terre noire	166	surface	16
matière	135	question	15
décomposition	70	accumulation	14
organiques	66	eau	14
sol	49	forêts	14
année	32	humidité	14
quantité	32	acide	13
Kostitscheff	31	air	12
expériences	31	ballon	12
végétal	23	foin	12
couche	23	bactérie	11
kilogramme	23	steppe	11
feuille	22	carbonique	10
production	21	action	9
produit	21	bouleau	9
température	21	herbe	9
tschernozyème	21	substance	8
hectare	19	climat	8
végétation	19	supérieur	8
racine	18	colline	8
condition	17	couverture	8
<i>Stipa pennata</i>	17	épaisseur	8

« Kostycheff » (31 fois) et « expérience » (31 fois), pour ne citer que les plus fréquents. Le Tableau 5.1 offre une visualisation des mots les plus récurrents dans l'article de Feltz. Les mots avec une apparition supérieure ou égale à huit fois sont représentés.

Il est délicat de tirer des conclusions d'une analyse lexicale quantitative. Néanmoins je peux déduire l'emploi de certains groupes de mots récurrents. De cette manière il est possible d'obtenir des informations sur le texte. Par exemple, je groupe les mots de « terre noire », de « matière » et de « tschernozyème » qui sont produit par des processus de « décomposition », d'« accumulation ». Ces derniers ont une forte connotation temporelle « année », « annuelle », « jour » et spatiale « surface », « profondeur », « couches ». La fonction édaphologique du « sol » est présente « produire », « quantité », « richesse ». Enfin, le milieu environnemental est très présent « climat », « forêt », « conditions », « steppe », « *stipa pennata* », « végétation ». Je suis forcé cependant de reconnaître les faiblesses d'une analyse seulement fondée sur la récurrence des termes. Les mots par leur récurrence seule ne fournissent pas assez d'informations et des difficultés d'interprétations apparaissent. Par exemple, le terme « richesse » peut tout aussi bien signifier « richesse » monétaire ou montrer une proportion de matière dans un sol, la « richesse » du sol en matière organique. A cet égard, je ne pourrais pas davantage l'analyse lexicale quantitative, en dehors de la simple comptabilité des mots.

5.2.3 Premier chapitre de Risler (1894)

L'analyse lemmatisée des mots de l'article de Risler informe de la récurrence des mots suivants. Le mot « terre » apparaît le plus souvent avec 65 récurrences. Le mot « eau » est aussi très présent avec 40 répétitions. S'en suivent les mots de « sol » (39 fois), « terrain » (34 fois), « géologique » (33 fois), « carte » (29 fois), « engrais » (29 fois), « analyse » (22 fois), « travail » (21 fois), « composition » (19 fois) et « formation » (19 fois) pour ne citer que les plus fréquents.

Le Tableau 5.2 offre une visualisation des mots les plus récurrents dans l'article de Risler. Les mots avec une apparition supérieure ou égale à huit fois sont représentés. Encore une fois, il est délicat de tirer des conclusions d'une analyse lexicale quantitative. Néanmoins je peux déduire l'emploi de certains groupes de mots récurrents. De cette manière il est possible d'obtenir des informations sur le texte. Par exemple, distinguons les mots savants des mots communs dans leur emploi par Risler. Les mots communs de langage regroupent les termes généraux du territoire « agriculture », « carte », « France », « département » avec de nombreuses notions d'agriculture et d'utilisation du sol, les « engrais », la « potasse », aident aux « récolte(s) ». Des termes géologiques tels que « couche », « composition », « minérale » et « formation » sont plus présents que des termes référant aux sols telles que « sol » ou « terre ».

TABLE 5.2 – Tableau de fréquence d'apparition des mots dans le texte de Risler (1894).

Mot	Fréquence d'apparition	Mot	Fréquence d'apparition
terre	65	rapport	12
eau	40	dépôt	11
sol	39	méthode	11
terrain	34	minéral	11
géologique	33	nature	11
carte	29	essai	10
engrais	29	agriculture	9
analyse	22	beaucoup	9
travail	21	département	9
composition	19	exemple	9
formation	19	jour	9
géologie	17	nombre	9
pays	17	phosphorique	9
étude	15	récolte	9
France	15	source	9
vallée	15	chimique	8
culture	14	couche	8
potasse	14	cours d'eau	8
surface	13	détail	8
acide	12	bassin	8
matière	12	calcaire	8

5.3 Groupes lexicaux et analyse

5.3.1 La méthode

Ayant conduit une analyse lexicale simple sur les mots, je relève plusieurs limitations. En particulier, l'analyse simple des mots ne permet pas une différenciation autre qu'entre mots scientifiques et mots savants. Je m'en trouve limité et me déplace vers l'analyse des unités lexicales, « élément linguistique fondamental et ses dérivés » (Chatelin, 1979, p. 81), par opposition à l'utilisation des mots. Cette fois cependant, j'omets l'analyse quantitative simple et poursuis mon raisonnement en recherchant les constantes dans les emplois d'unités lexicales afin de les classer. Cette classification permet de mettre en lumière la spécialisation du vocabulaire, le recours aux termes venant d'autres disciplines ou encore l'utilisation importante des termes de laboratoire. Cette analyse est très utile pour la compréhension du raisonnement et de l'épistémologie de la science des sols de la fin du XIX^e siècle. À défaut de conduire cette analyse au début de ce mémoire, celle-ci est faite à la fin pour deux raisons. La première est que le Chapitre 4 se suffit en lui-même pour rajouter encore une analyse lexicale. La seconde raison est que je veux conduire une analyse lexicale *stricto sensu* et ne pas en tirer des conclusions sur le raisonnement (comme dans le Chapitre 4) mais sur l'utilisation du langage à proprement parlé. C'est à dire que je ne cherche pas à savoir comment l'unité lexicale « couche » est utilisée pour caractériser les horizons verticaux du sols, mais comment le terme « couche » réfère à un mot du langage courant qui montre un manque de spécialisation du lexique pédologique. Pour ce faire, je classe manuellement les unités lexicales de chacun des textes. Notons que toutes les possibles unités lexicales ne sont pas comptabilisées car il s'agirait d'un travail trop fastidieux sans réel intérêt pour la compréhension. À la place, je classe la majorité des unités lexicales selon dix catégories, en retirant les mots parfaitement commun de cette classification. Les catégories sont en partie tirées de l'ouvrage de Chatelin (1979) avec certaines adaptations, omissions et rajouts. Je les définis comme suit :

- i) Les unités lexicales spécifiques à la science des sols de la fin du XIX^e siècle, celles que Chatelin (1979) appelle « unités lexicales savantes ». Elles peuvent être liées à des termes de classification des sols ou bien des termes anciens déjà présents dans la littérature de la science des sols.
- ii) Les unités lexicales savantes liées à la science des sols mais moins spécialisées que celles précédemment évoquées. En font partie les mots composés et les mots à préfixes. Ces derniers font références à des notions savantes mais trahissent le manque de vocabulaire pleinement adapté. Je retiens par exemple les mots commençant par un préfixe accolé à un mot utilisé dans d'autres sciences ou domaines. Par exemple, les unités lexicales commençant par *a-*, *para-*, *pré-*, *pédo-*, *pseudo-*.
- iii) Les unités lexicales qui ont acquis un sens à travers leur auteur. Celles-ci sont souvent reprises dans leur langue originale et leur auteur y est mentionné. Ces termes montrent une certaine interaction entre scientifiques et un échange de savoir. Ces termes représentent souvent des notions très spécifiques. C'est le cas par exemple des *mor*, *moder* et *mull* d'Emil Ramann dans la classification de l'humus.

- iv) Les mots qui définissent une méthode de laboratoire. Je classe dans cette catégorie les noms des auteurs quand ils sont cités pour leur méthode analytique, par exemple « telle que la méthode de Corenwieder ». Cette classe permet de retrouver l'influence des méthodes positivistes dans le discours.
- v) Les unités lexicales provenant de la géologie ou de la minéralogie. Il est attendu que la science des sols emprunte beaucoup de vocabulaire à la géologie, science plus établie à la fin du XIX^e siècle. Dans cette catégorie je peux estimer la proportion des unités lexicales venant de la géologie.
- vi) Les unités lexicales qui se rapportent à la chimie ou à la biologie. Tout comme dans la catégorie précédente, la chimie et la biologie ont un rôle particulier dans la science des sols. Cette catégorie me permet de mesurer l'apport lexical de la chimie agricole et de la biologie en science des sols.
- vii) Les unités lexicales du langage courant mais utilisées dans la science des sols. Il s'agit de mots telles que « sable » ou « matière » qui peuvent être compris en dehors du contexte du texte étudié mais ont alors une signification différente. Ces unités lexicales permettent d'apprécier le manque de maturité d'une discipline et son degré de spécialisation.
- viii) Les unités lexicales étrangères. Cette catégorie comprend les mots non-traduits et utilisés dans leur sens propre, tel que défini par leur auteur. Par exemple, le terme de « tschernoziome » est le terme non-traduit du chernozem. Je me réfère éventuellement au *Dictionnaire trilingue des sciences du sol* de [Plaisance \(1958\)](#) pour la traduction.
- ix) Les unités lexicales du langage commun de description. Ces termes sont très usités mais ne sont pas particulier à la science des sols. Ces termes se retrouvent facilement dans d'autres contextes du langage courant et peuvent avoir de nombreuses significations. Il s'agit par exemple des termes de « grand », « chacun », « dessus ».
- x) Les unités lexicales qui réfèrent au langage spécialisé du laboratoire. Par exemple le terme de « ballon ». Ces termes montrent un emploi certains des méthodes analytiques et une volonté de précision dans la description. Notons que certains de ces termes peuvent se soumettre à plusieurs catégories, le contexte montre laquelle est la plus juste.

5.3.2 Article de [Feltz \(1887\)](#)

Les catégories précédemment évoquées sont utilisées pour classer le lexique du texte de [Feltz \(1887\)](#). Dans la première catégorie (i), les unités lexicales savantes et spécifique à la science des sols sont très peu nombreuses, j'en tire seulement quatre :

tschernozème, lactique, labour, solonntschek,

ce qui est similaire à la catégorie suivante (ii), c'est à dire les mots savants moins informatifs :

fragment, hygroscopique, poussière, putréfaction, saturer, sablonneux, triba-sique.

Les unités lexicales qui ont une valeur descriptive de par leur auteur (catégorie (iii)) n'ont pas été trouvés dans le texte, contrairement aux nombreux noms d'auteurs du à l'utilisation de

leur méthode analytique dans le texte. Ces noms sont référencés dans la quatrième catégorie (iv) :

Kostitscheff, Dokoutschaeff, Darwin, Grandeau, Hellriegel, Moeller, Wolny, Fédore, Petersen, Corenwinder, Ismaïlski.

Du côté des unités lexicales venant de la géologie (catégorie (v)), plusieurs unités sont découvertes, telles que :

décomposition, terrain, flanc, glaise, débris, dépôt, lavin, morphologiques, ravin,

qui sont peu nombreuses en comparaison avec les unités lexicales venant de la chimie agricole ou de la biologie (catégorie (vi)), les méthodes analytiques de laboratoire sont exclues :

végétal, *Stipa pennata*, bactérie, carbonique, substance, organisme, capsule, chimique, échantillon, chloroforme, chlorure, koril, *Triticum*, *Bromus inermis*, Legos, *Hierochloa borealis*, *Stipa capillata*, *festuca ovina*, *Koehleria cristata*, *Caragana frutescens*, graminé, ammoniacque, bain marie, capsule, oxydant, phosphate, spore.

Les noms communs dérivés pour leur utilisation en pédologie sont aussi multiples (catégorie (vii)) :

terre noire, matière, organique, sol, air, couche, feuille, température, hectare, racine, eau, forêt, climat, couverture, fermentations, fertilité.

Les mots étrangers répertoriés aussi dans le dictionnaire trilingue (Plaisance *et al.*, 1958) sont au nombre de deux (catégorie (viii)) :

tschernozone, solonntschek.

Enfin, le langage commun de description est présent de manière abondante (catégorie (ix)) :

produire, supérieur, épaisseur, fraîche, grand, sec, analogue, beaucoup, humide.

De même que le langage de laboratoire peu usité autrement que dans la science des sols (catégorie (x)) :

ballon, expérience, kilogramme, capsule, gramme, tube de Marchand, flacons de Mariotte, tubulure.

5.3.3 Premier chapitre de Risler (1894)

Le texte de Risler (1894) montre une toute autre utilisation des unités lexicales. Les termes savants, parfaitement spécifique à la science des sols sont inexistantes (catégorie (i)), bien que l'on retrouve certaines unités de la catégorie (ii), moins savants mais ayant une forte valeur informative :

arable, assolement, agronomique.

De même, les unités lexicales se rapportant à leur auteur (catégorie (iii)) sont manquantes, et les noms d'auteurs pour leur méthode analytique de laboratoire sont seulement au nombre de trois :

Gasparin, Corenwinder, Contamine.

Les unités lexicales venant de la géologie et de la minéralogie (catégorie (v)) sont sans surprise en grand nombre, j'en extrais les suivantes :

terrain, géologique, formation, géologie, vallée, surface, dépôts, minérales, couche, granitiques, bassin, calcaire, plateaux, calcaires, chaux, marnes, roches, masses, mines, montagnes, minéralogique, sable, sels, argile, craie, division, drainage, fer, jurassique.

Le vocabulaire ayant pour origine une utilisation en biologie (catégorie (vi)) est aussi assez présent, mais dans une moindre mesure :

phosphorique, chimique, phosphates, chimiques, azote, base, ammoniacque, nitrate, potasse.

La catégorie (vii) qui représente les noms communs dérivés pour leur utilisation en pédologie sont très présents :

terre, eau, sol, carte, engrais, travail, culture, matière, agriculture, récoltes, cours d'eau, agriculteurs, transport, cultures, divisions, physiques, production, cultivateurs, échantillon, amendements, céréales, champs, classification, laboratoire, milieu, prairies, riche, substance, agronomiques, alimentation, champ, fertiles, gras, imperméables, matériaux.

Le texte ne comporte pas d'unités lexicales étrangères (catégorie (viii)) mais fait une large place aux unités lexicales de la description (catégorie (ix)) :

analyse, rapports, beaucoup, exemple, nombre, sources, détail, caractères, indiquer, plusieurs, contraire, effet, forme, grand, partout, plupart, presque, produit, propriétés, certaine, chacune, chercher, constitution, contient, continuité, davantage, emploi, étendue, intérieur, limites, manquent, profondeur, quantité, renseignement, action, aucune, centaine, conséquent, contiennent, général, intermédiaire, ordre, origine, procurer, rien, éléments, employé, pentes, petite, plan.

Finalement, les autres unités lexicales appartenant au vocabulaire du laboratoire (catégorie (x)) sont absentes du texte de Risler, même si référence au laboratoire est faite à de nombreuses reprises, il n'y a pas de précisions sur les méthodes et donc sur les procédés de laboratoire.

5.4 Comparaison et discussion

5.4.1 Un héritage des grandes disciplines

Dans les deux textes étudiés, de large différences sont facilement visibles. La première est l'utilisation des mots et unités lexicales des autres disciplines. Les principales disciplines ponctionnées sont la géologie et la chimie agricole, auxquelles se rattachent respectivement la minéralogie et la biologie. Chaque texte offre une quantité variable d'emprunts. Le texte de Feltz (1887) emprunte de nombreux termes à la biologie et à la chimie. Certains termes sont attendus tels que « phosphate », mais d'autres, tels que « *Stipa pennata* » sont moins

communs et réfèrent à une volonté de précision venant des sciences végétales. Plusieurs termes appartiennent aussi à la géologie, ils sont cependant moins nombreux. Je note même que les termes employés tiennent davantage du langage qui rapporte des formes de structures géologiques, par exemple « flanc ». De manière générale, l'impression d'un texte plutôt orienté vers les sciences végétales est très présent. C'est sans rappeler la méfiance de Kostycheff pour les idées de Dokouchaev quand à la place du climat dans la formation des sols, et l'importante place que Kostycheff accorde à la végétation dans la formation des sols.

Dans le texte de Risler (1894), les termes d'emprunts ne sont que quelques fois extrait de la biologie ou la chimie. C'est le cas de certains termes, tel que « phosphorique ». Le contexte du texte permet de comprendre que ces termes sont utilisés dans un langage purement agricole et utilitaire, mettant en lumière une vision édaphologique du sol. C'est le cas des termes de « phosphorique », de « potasse » ou bien de « nitrate », qui sont certes des termes provenant de la chimie agricole, mais surtout des termes référant à des engrais utiles à la croissance des végétaux. Dans une claire opposition au texte de Feltz (1887), les termes provenant de la géologie sont nombreux. Ceux-ci proviennent du langage de la forme des structures géologiques, tels que « vallée » ou « plateau », mais aussi de la formation (« jurassique ») ou encore de la composition « minéralogique » des roches, tels que les termes de « sable », ou « fer ». Je rappelle encore au lecteur que c'est un résultat attendu à la lecture des précédents chapitres de ce mémoire. Les idées de Risler sont en faveur d'un développement des sols comme simple dégradation de la roche-mère (voir aussi section 2.1.1).

Les différences de langage entre les deux textes sont le fait des idées et des héritages des auteurs respectifs. Sans répéter le premier chapitre de ce mémoire, je note, en simplifiant le fait, que Risler s'apparente aux géologues ou agrogéologues quand Kostycheff (traduit par Feltz) a une conception plus globale de la formation des sols, particulièrement orientée vers l'influence de la végétation sur la formation et l'évolution des sols. Ces différences sont visibles par une simple analyse lexicale.

5.4.2 Le sens des mots

Les différences de conceptions précédemment évoqués entraînent des difficultés lors de la lecture des deux textes. En particulier, nombreux sont les termes qui présentent un sens différent selon l'auteur et le contexte, appelé termes polysémiques. Les termes polysémiques sont caractéristiques des termes du langage plus commun employés à des fins scientifiques. Ces derniers montrent qu'une science est nouvelle, tant les mots manquent pour en définir les subtilités. J'oppose les termes polysémiques aux termes monosémiques d'après Guilbert (1965) :

Le trait spécifique de la terminologie scientifique technique est la recherche de la monosémie par opposition à la polysémie généralisée des termes du lexique général de la langue.

La présence de termes polysémiques indique donc le degré de spécialisation du lexique et l'absence d'harmonisation linguistique entre auteurs et écoles de pensées. Je trouve plusieurs termes polysémiques dans les textes étudiés. Le mot « terre » a une signification différente dans Risler (1894) ou Feltz (1887) que le contexte aide à comprendre. Pour Feltz

(1887), la « terre » est le « sol sur lequel on marche, et qui produit les végétaux. » (Littre, 1874, p. 1182), alors que pour Risler (1894) la « terre » est plutôt une étendu de terrain, qui a vocation de culture ou d'habitation.

Enfin, notons qu'une définition claire d'un terme permet de résoudre les confusions. C'est le cas du mot « argile » qui est définie dans Littre (1874) par « une terre blanchâtre, douce au toucher, composée principalement de silice et d'alumine; on l'appelle communément glaise. » Toutefois, cette définition n'est reprise qu'en partie par les deux auteurs (douce au toucher) qui lui préfèrent la définition de terre composée de sédiments fins. Cette définition est saluée dans les deux textes. Feltz (1887) répond de la méthode de Corenwinder quand Risler (1894) mentionne que l'argile est extraite par « l'analyse physique grâce au tamis ». L'utilisation d'une méthode analytique commune et des expériences de laboratoire ont permis l'émergence de l'utilisation d'un terme commun à plusieurs auteurs.

5.4.3 Du langage commun

Les deux textes surprennent par l'utilisation abondante des mots commun du langage. D'autre part, le lecteur pourrait s'étonner de l'emploi de ces derniers dans des fonctions imagées sur le sol, offrant une fonction esthétisante. Celle-ci est aussi décrite dans Chatelin (1979, p. 108) en référant à une expression de l'anthropocentrisme, en particulier les mots « évocateurs de la vie humaine ». J'en retrouve les traces dans les textes étudiés.

Dans Feltz (1887), les termes se rapportant à la vie humaine sont nombreux. Par exemple le sol montre sa « fertilité » lorsqu'il contient un pourcentage important de matière noire. Ce dernier est d'ailleurs considéré comme « riche », auquel cas le cultivateur doit procéder à son « enrichissement ». Le sol est « dénudé » lorsqu'il n'est pas couvert de végétation ou lorsque sa couche « protectrice » est « entamée » (comme une peau humaine). Enfin, les éléments naturels « attaquent » la surface du sol.

Dans Risler (1894), un vocabulaire similaire est employé mais dans une moindre mesure. Ainsi référence est encore faite à un sol « riche » quand il contient un à deux demi-millièmes d'acide phosphorique et est « pauvre » quand il en contient moins de un demi-millième. De même, un sol change en fonction de son utilisation, il peut y avoir une altération de sa « manière d'être extérieure ». Un calcaire est dit « grossier » s'il contient une importante proportion de graviers. Si les terres manquent de matières organiques elle sont « incomplètes ». De même, les terres peuvent être « fortes », « légères », « chaudes » ou « froides ».

Les termes proches de la vie humaine ou du moins se référant à des actions humaines sont présents dans les deux textes étudiés. Les termes employés se rapportent à des qualités du sol et de la terre, de la manière que l'on décrirait les qualités d'une personne.

Conclusion

6.1 Conclusion par chapitre

Dans le Chapitre 2 je dresse un état des lieux du contexte historique de la science des sols de la fin du XIX^e siècle. Je montre que différentes conceptions sur la formation et l'évolution des sols existent, ce qui correspond à différentes écoles de pensées. L'école de pensée française est marquée par des personnalités telles que Grandeau et Risler, qui tout deux montrent une vision respectivement orientée vers la chimie agricole et la géologie. La chimie agricole est aussi très présente dans la science des sols anglo-saxonne et s'articule en particulier autour de la station agronomique de Rothamsted. Une vision plus globaliste est présente chez Hilgard aux États-Unis, mais celui-ci est principalement lu par ses pairs à l'étranger, notamment par ceux de l'école russe. En Russie, une nouvelle vision émerge à partir des besoins pratiques de l'agriculture et des sécheresses de 1873 et 1875 dans les grandes plaines fertiles de l'ouest. Dokouchaev, de par l'étude du chernozem, propose une nouvelle théorie de la formation et de l'évolution des sols. Celle-ci se heurte à des nombreuses réticences, la plupart émanant de scientifiques proches des conceptions agrogéologiques. Dans ce premier chapitre je montre qu'il est possible de classer les modes de pensées des savants de la science des sols de la fin du XIX^e siècle en deux catégories, la première étant les rationalistes et la seconde les positivistes. Les rationalistes, caractérisés par la recherche des causes et des lois de la nature, s'opposent aux positivistes qui visent à une démarche purement empirique et inducto-déductive. De plus, je montre comment, proche du rationalisme, une vision génétique du sols émerge, en particulier à partir de l'école russe ou de certains savants états-uniens (Hilgard) et allemands (Muller).

Dans le Chapitre 3 je dresse un portrait des méthodes utilisées par les savants de la fin du XIX^e siècle en science des sols. Je montre la place importante de l'empirisme par le recours systématique à l'expérimentation, au laboratoire et à l'expérience visuelle. Ces méthodes sont ordinairement très présentes dans les sciences agronomiques avant la fin du XIX^e siècle, mais la nouveauté réside dans l'utilisation de plusieurs types de méthodes venant pour beaucoup de la chimie agricole, mais aussi des conceptions géologiques des sols, tels que dans les principes de successions ou de bilans. Le rôle pratique de la science des sols est aussi mis en avant, comme une forme de justification vis-à-vis de l'utilité des sciences agronomiques.

Les méthodes peuvent être classées en trois parties. La première montre des méthodes purement empiriques telles que les comparaisons entre des facteurs de formations du sol ou l'observation des formes du sol. La deuxième comprend les expérimentations. Celles-ci se font en laboratoire par des analyses chimiques ou physiques, à travers les bilans ouverts ou fermés, et enfin à travers les expériences en plein champs. La troisième s'articule autour des mécanismes d'échelles qui sont un héritage de la chimie agricole mais aussi de la géologie.

Le Chapitre 4 montre la démarche du savant dans l'étude des sols. Je montre comment le paradigme, décrit par Kuhn, s'applique aux raisonnements et à l'interprétation des faits. La science normale connaît une évolution qui fait que les théories sur les sols évoluent et changent. L'hypothèse joue aussi un rôle primordiale, en cherchant à expliquer la cause possible de faits ne rentrant pas dans la théorie. L'hypothèse des savants de l'école russe a permis de mettre en lumière des incohérences dans le raisonnement de par l'inadéquation des faits. Ces raisonnements sont la base d'une nouvelle théorie. Je montre aussi comment les classifications rentrent dans ce schéma, mais que ces logiques sont le faits de raisonnements aussi bien déductifs que inductifs. À travers l'opposition entre réfutation et vérification, je montre que la logique déductive doit être nuancée. Enfin, dans les logiques du raisonnement scientifique, je montre que les connexions sociales jouent un rôle majeur dans la diffusion et l'élaboration des savoirs et théories nouvelles sur les sols à la fin du XIX^e siècle. Je poursuis avec la raisonnement en système qui, bien que le terme soit apparue plus tard dans la terminologie, est bien présent dans la science des sols.

Dans le Chapitre 5 le lexique est analysé de plusieurs manières. Les définitions du sol sont extraites de différents ouvrages et analysées. Je vois que les définitions permettent de noter des grandes différences de vision du sol, entre les termes proches de l'agronomie, d'une vision simplement utilitaire, ou bien d'une vision parfois plus globale. La poursuite de l'analyse avec le décryptage quantitatif puis qualitatif du lexique de deux textes montre que l'analyse quantitative simple ne permet pas de tirer des conclusions claires sur les orientations du lexique. Au contraire, en classant les groupes lexicaux des deux textes j'observe que les textes se différencient par l'emploi des mots venant de deux disciplines différentes, à savoir la géologie et la biologie/chimie agricole. De plus, les unités lexicales ont souvent un sens différent entre les auteurs, ce qui rends l'analyse difficile sans le contexte du texte. Enfin, beaucoup d'unités lexicales viennent du langage commun ayant une fonction esthétisante. Ces derniers montrent une science nouvelle dont le vocabulaire n'est pas encore fixé.

6.2 Conclusion générale

L'origine de ce présent travail réside dans la volonté d'analyser l'émergence et la diffusion d'une théorie scientifique. Cette nouvelle théorie, conçu principalement par l'école russe mais rapidement complétée par les apports d'autres scientifiques, se heurte aux théories existantes et émanant de l'héritage de la chimie agricole ou de l'agrogéologie. Cette théorie nouvelle s'impose rapidement, bien que dans notre période d'étude de nombreux ouvrages apparaissent et font totalement abstraction de la théorie de l'école russe.

Dans un premier temps, j'ai montré que les acteurs du changement ne sont pas isolés, bien

que les écoles de pensées soient bien définies. Ils interagissent avec leurs pairs dans plusieurs pays. En dehors des écoles de pensées, les différences se font surtout par la vision que les scientifiques portent sur la science. Certains on recourt aux faits, défendant une science empirique émanant de l'observation et de l'expérience. D'autres veulent une approche plus globale en recherchant les grandes lois de la nature. Ce sont ces derniers qui développent la pédologie génétique. Les deux options paraissent irréconciliable.

Cependant, je montre dans un second temps que les méthodes employées sont similaires pour les deux options précédemment évoquées. Il semble que de nombreuses méthodes venant de la chimie agricole, en particulier l'analyse de laboratoire et les mécanismes d'échelles, se retrouvent dans les différentes écoles de pensées. Autour de certaines publications les accords sont flagrants, par exemple autour de la théorie de l'humus où les agronomes français reconnaissent et citent les travaux russes. J'approfondis mon propos en cherchant les similitudes entre géologie et science des sols. Les principes de successions si chère à la géologie semblent aussi prendre place dans les travaux russes et d'Hilgard aux États-Unis. De même, l'analyse des formes du sol est similaire à la recherche des origines des minéraux en minéralogie. Je nuance mon propos cependant, à savoir que les similarités entre les écoles de pensées ne vont pas plus loin que dans l'exercice méthodologique.

Dans un troisième temps, je montre comment la science des sols se développe dans un paradigme, que les travaux de l'école russe remettent en cause. C'est une partie importante de mon travail, à savoir que les raisonnements entre les différentes écoles de pensées sont bien différents en fonction du paradigme dans lequel ils se trouvent. Je mets aussi en exergue les matrices disciplinaires, auxquelles les scientifiques appartiennent et qui influent sur les choix implicites du savant. Je note le rôle des hypothèses, mais que l'utilisation de celles-ci renvoient à l'opposition entre positivistes et rationalistes. L'école russe formule des hypothèses fortes sur la formation des sols de chernozems, celles-ci ne sont pas démenties et s'imposent. Les distinctions entre les écoles de pensées sont donc fondamentales au point de vue du raisonnement, mais mineures au point de vue méthodologique.

Je finis mon propos par la visualisation et par une analyse du lexique pour deux textes de deux écoles différentes. Là encore, les distinctions sont flagrantes, tant le lexique met en lumière l'héritage scientifiques des deux auteurs. L'imposante utilisation des mots du langage courant montre que la science des sols est une science nouvelle et que celle-ci manque de vocabulaire spécialisé.

Que nous apprend ce mémoire et quel en serait le message ? La paternité de la science des sols est souvent attribuée à la géologie. Les écrits récents tendent à vouloir prouver l'hérédité supposée de la géologie sur la science des sols. J'ai montré dans ce mémoire que cela est en partie vrai. Dokouchaev est géologue de formation, ainsi que Risler et bien d'autres pédologues allemands et états-uniens. Pourtant, ce mémoire nous informe que cela n'est qu'une vérité toute relative puisque les chimistes du sol, ainsi que les biologistes ont tout autant contribué au développement de la science des sols à la fin du XIX^e siècle. D'un point de vue méthodologique et d'analyse, la chimie apporte la rigueur des méthodes analytiques et les analyses de laboratoire. D'un point de vue du raisonnement, les principes de classification font sans aucun doute référence à la classification de Mendéléev, proche de Dokouchaev.

Il est intéressant de chercher les raisons pour lesquels la croyance actuelle attribut aux géo-

logues la paternité de la science des sols. J'en reviens au débat de construction de la mémoire historique. Qui écrit l'histoire, dans quel but ? Comme est diffusé cette connaissance historique et quelles en sont les auteurs ? Il ne s'agit pas de répondre dans ces quelques lignes mais bien d'attirer l'attention sur la partialité (volontaire ou inconsciente) des écrits historiques. Ce que d'aucuns appelleront une entreprise de promotion revêt en fait une forme de construction de la mémoire d'une discipline scientifique. J'ai essayé dans ce mémoire de replacer les faits historiques dans leur contexte direct sans attribuer de valeur vis-à-vis des normes des connaissances actuelles. Ce travail n'est sans doute qu'une ébauche, mais fournit toutefois une contribution novatrice d'épistémologie historique sur les sols qui gagne à être complétée.

Références

- Bachelard, G., 1934. *Le nouvel esprit scientifique*. Paris, Alcan.
- Bennett, R. J., Chorley, R. J., 2015. *Environmental systems : philosophy, analysis and control*. Princeton University Press.
- Bernard, C., 1865. Introduction à l'étude de la médecine expérimentale par m. Claude Bernard. Baillière.
- Boulaine, J., 1984. Le contrepoint et le cortège de Dokouchaev : quelques contemporains du fondateur de la pédologie génétique. *Pédologie* 34 (1), 5-22.
- Boulaine, J., 1989. *Histoire des pédologues et de la science des sols*. Editions Quae.
- Boulaine, J., 1994. Boussingault, Jean-Baptiste (1802-1887). Professeur d'Agriculture (1845-1848), de Chimie agricole (1851-1887). *Histoire biographique de l'enseignement* 19 (1), 246-258.
- Boulaine, J., 1996. *Histoire de l'agronomie en France*. Technique et Documentation Lavoisier.
- Boulaine, J., Feller, C., 1985. L. Grandeau (1834-1911). Professeur à l'Ecole forestière.
- Brevik, E. C., Hartemink, A. E., 2010. History, philosophy, and sociology of soil science. *Encyclopedia of life supporting system (EOLSS)*. UNESCO EOLSS Publishers, Oxford.
- Camena d'Almeida, P., 1903. *La terre, Géographie générale*. A. Colin.
- Chatelin, Y., 1979. Une épistémologie des sciences du sol. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.
- Chorley, R. J., Kennedy, B. A., 1971. *Physical geography : a systems approach*. Prentice Hall.
- D'Almeida, P. C., 1904. La carte des sols de la Russie publiée par le département de l'agriculture. Dans : *Annales de Géographie*. Vol. 13. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, p. 270-275.
- Darwin, C., 1882. Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale. Traduit de l'anglais par M. Levêque. Préface de M. Edmond Perrier. C. Reinwald Libr. Ed., Paris, XXVIII.
- Darwin, F., Seward, A., 1903. More letters of Charles Darwin. A record of his work in a series of hitherto unpublished letters. D. Appleton, New York, New York, USA.
- De Margerie, E., Raveneau, L., 1900. La cartographie à l'Exposition Universelle de 1900 : Second article pays étrangers. Dans : *Annales de géographie*. Vol. 9. JSTOR, p. 385-412.
- Dokouchaev, V., 1879. Tchernozem (terre noire) de la Russie d'Europe (Chernozem of European Russia). Société Impériale Libre Economique. Imprimerie, Trenke & Fusnot, St. Petersburg (in French).
- Dufrény, A., de Beaumont, L. E., 1848. Explication de la carte géologique de la France. Vol. 2. Imprimerie nationale.
- Dumas, J.-L., 1965. Liebig et son empreinte sur l'agronomie moderne : Biographie sommaire de Liebig. *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* 18 (1), 73-108.
- Feller, C., Blanchart, E., Yaalon, D., 2006. Some major scientists (Palissy, Buffon, Thaer, Darwin and Muller) Have. *Footprints in the soil : people and ideas in soil history*, 85.
- Feller, C., Brown, G., Blanchart, E., 2000. Darwin et le biofonctionnement des sols. *Étude et Gestion des Sols* 7, 395-402.
- Feltz, E., 1887. Les terres noires de Russie. Leur origine, leur composition et leurs propriétés, d'après un ouvrage récent de M. P. Kostitscheff. Vol. 2. Berger-Levrault, Paris, p. 165-181.
- Gohau, G., 1992. *Esprit déductif versus esprit inductif*. Institut national de recherche pédagogique, Paris (FRA).
- Grandeau, L., 1897a. *Annales de la science agronomique française et étrangère*. Berger-Levrault.
- Grandeau, L., 1897b. *Traité d'analyse des matières agricoles. Sols, eaux, amendements, engrais*. Vol. 1. Berger-Levrault.
- Grandeau, L., 1900. *Journal d'agriculture pratique, de jardinage et d'économie domestique*. Vol. 2. Librairie de la Maison rustique du XIXe siècle (Paris).
- Granger, G. G., 1992. A quoi sert l'épistémologie ? *Droit et société* 20 (1), 39-44.
- Grataloup, C., 1975. Le fond et la forme. De l'épistémologie de la géomorphologie à la subjectivité spatiale. *Espaces Temps* 1 (1), 66-72.
- Guilbert, L., 1965. *La formation du vocabulaire de l'aviation*. Vol. 1. Larousse (Mayenne, impr. Floch).
- Guy, B., 1998. Réflexions sur les notions de faits et de lois géologiques. *Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie* 3 (tome 12), 25-37.
- Hartemink, A. E., Bockheim, J., 2013. Soil genesis and classification. *Catena* 104, 251-256.
- Hempel, C. G., 1967. *Philosophy of natural science*. Prentice-Hall.
- Hilgard, E. W., 1884. Report on the Physical and Agricultural Features of the State of California : With a Discussion of the Present and Future of Cotton Production in the State : Also, Remarks on Cotton Culture in New Mexico, Utah, Arizona, and Mexico. Department of the Interior, Census Office.
- Hilgard, E. W., 1918. *Soils : their formation, properties, composition, and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions*. Macmillan.
- Inkpen, R., Wilson, G., 2013. *Science, philosophy and physical geography*. Routledge.
- Joffe, J. S., 1949. *Pedology. With an Introduction*. Pedology Publications.

- Kostychev, P. A., 1889. The formation and properties of humus. Trudy S. Pbg Obshch. Estestvoispyt., 20, Otd. Bot. Voir aussi : (1940) *Istoriya agrikuVtury*, Izd. Akad. Nauk.
- Krasilnikov, P., Arnold, R., Ibáñez, J., *et al.*, 2010. Soil classifications : their origin, the state-of-the-art and perspectives. Dans : *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science : Soil solutions for a changing world*, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Symposium 1.4. 2 Soil classification benefits and constraints to pedology. International Union of Soil Sciences (IUSS), c/o Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, p. 19–22.
- Krassnof, A., 1892. The 'Black earth' of the steppes of Southern Russia. *Bulletin of the Geological Society of America* 3, 68–81.
- Krupenikov, I. A., *et al.*, 1993. *History of soil science : from its inception to the present*. AA Balkema.
- Kuhn, T. S., 1983. *La structure des révolutions scientifiques*. Flammarion Paris.
- Landa, E. R., Brevik, E. C., 2015. Soil science and its interface with the history of geology community. *Earth Sciences History* 34 (2), 296–309.
- Latour, B., Woolgar, S., 2013. *Laboratory life : The construction of scientific facts*. Princeton University Press.
- Legros, J.-P., 2012. *Major Soil Groups of the World : Ecology, Genesis, Properties and Classification*. CRC Press.
- Leroy-Beaulieu, A., 1880. La Russie et les Russes. *Revue des Deux Mondes* 37, 761–789.
- Littré, E., 1874. *Dictionnaire de la langue française*. Vol. 4. L. Hachette et Cie.
- Margulis, H., 1954. *Aux sources de la pédologie*. Tech. rep., INRA.
- Mayr, E., 1989. *Histoire de la biologie : diversité, évolution et hérédité*. Fayard.
- McGee, W. J., 1892. *Bulletin of the Geological Society of America*. Vol. 3. Geological Society of America.
- Monnier, G., 1966. Le concept de sol et son évolution. *Science du Sol* 1, 89–111.
- Moon, D., 1 2018. Mezhdunarodnyi transfer idei rossiiskogo geneticheskoga pochvovedeniia v 1870-1914 gg. *Historia provinciae* 2018 (1).
- Müller, P. E., 1889. *Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol*. Impr. Berger-Levrault et cie.
- Piaget, J., 1967. *Logique et connaissance scientifique*. Encyclopédie de la Pléiade.
- Plaisance, G., 1958. *Lexique pédologique trilingue*. Vol. 86. LWW.
- Plaisance, G., Cailleux, A., *et al.*, 1958. *Dictionnaire des sols*. Maison rustique.
- Poincaré, H., 1902. *La science et l'hypothèse*. Flammarion, Paris.
- Popper, K., 1973. *La logique de la découverte scientifique*. Paris Payot.
- Ramann, E., 1893. *Forstliche Bodenkunde und Standortslehre*. Springer-Verlag.
- Ramann, E., 1911. *Bodenkunde*. Springer-Verlag.
- Risler, E., 1894. *Géologie agricole*. Vol. 1. Berger-Levrault.
- Risler, E., 1895. *Géologie agricole*. Vol. 3. Berger-Levrault.
- Robin, P., Aeschlimann, J.-P., Feller, C., 2007. *Histoire et agronomie : entre ruptures et durée*. IRD Editions.
- Shaler, N. S., 1892. *The origin and nature of soils*. US Government Printing Office.
- Shinkizi, N., 1887. *L'agriculture au Japon. Son état actuel et son avenir*, traduit de l'Allemand par M. H. Grandeau. Vol. 2. Berger-Levrault, Paris, p. 73–152.
- Société belge de géologie, d. p., d'hydrologie, 1890. *Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie*. Vol. 4. Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie.
- Stremme, H., *et al.*, 1926. *Grundzuge der praktischen Bodenkunde*. Gebruder Borntraegar.
- Tandarich, J. P., Darmody, R. G., Follmer, L. R., Johnson, D. L., 2002. Historical development of soil and weathering profile concepts from europe to the united states of america. *Soil Science Society of America Journal* 66 (2), 335–346.
- Tandarich, J. P., Sprecher, S. W., 1994. The intellectual background for the factors of soil formation. *Factors of Soil Formation : A Fiftieth Anniversary Retrospective (factorsofsoilfo)*, 1–13.

Texte extrait de [Feltz \(1887\)](#)

LES
TERRES NOIRES DE RUSSIE

LEUR ORIGINE, LEUR COMPOSITION ET LEURS PROPRIÉTÉS

D'APRÈS

Un ouvrage récent de M. P. KOSTITSSCHEFF¹

Des millions d'hectares de terres présentent en Russie des caractères spéciaux de fertilité qui ont depuis longtemps appelé sur elles l'attention des savants. Ces terres, connues sous le nom russe de *tchernozième* (terres noires), se distinguent tout d'abord par la couleur plus ou moins foncée qu'elles doivent aux matières organiques dont elles sont imprégnées et qui sont la cause de leur fertilité presque inépuisable. M. L. Grandeau, dans un travail magistral publié en 1872², a donné l'explication du rôle que jouent les matières organiques noires dans la fertilité de ces sols. Mais l'origine de ces matières noires est restée, jusque dans ces derniers temps, l'objet de discussions et d'hypothèses nombreuses. On peut se faire une idée de l'importance de cette question en remarquant qu'un sol contenant 10 p. 100 de matière noire renferme, sur une épaisseur d'un pied, plus de 500,000 kilogr. de matières organiques par hectare.

1. *Potschi tchernoziemskoi oblasti Rossii*. Saint-Petersbourg, 1886.

2. Voir *Annales de la Station agronomique de l'Est*. In-8°. Berger-Levrault et C^{ie}. 1878.

J'ai continué, depuis la publication de mon travail sur Uladowka, à m'occuper de l'étude des terres noires de Russie, dont je possède aujourd'hui un grand nombre d'analyses d'échantillons d'origines géologiques diverses. Je publierai prochainement dans ces *Annales* un travail sur la composition du tchernozième, dont le mémoire de M. Feltz discute les origines.

L. G.

M. P. Kostitscheff, professeur à l'Institut forestier de Saint-Pétersbourg, a commencé la publication d'un ouvrage complet sur les terres noires. La première partie, qui vient de paraître, est consacrée presque entièrement à la question de leur origine. Je me propose ici de rendre compte de ce travail.

Voici comment M. Kostitscheff résume les qualités distinctives des terres noires :

1. — Les terres noires se distinguent par les quantités considérables de matières organiques qu'elles renferment et qui donnent naissance à leur couleur foncée.

On ne rencontre pas cette richesse en matières organiques dans d'autres sols voisins de terres noires et soumis en apparence aux mêmes influences que celles-ci.

2. — Les matières organiques ne sont pas uniformément réparties dans les diverses couches du tchernozième; elles diminuent graduellement de haut en bas et il est impossible d'établir une limite tranchée entre les couches franchement noires et les couches à peine teintées.

3. — Les matières noires du tchernozième sont amorphes. Leur examen microscopique permet seulement d'affirmer qu'elles sont d'origine végétale sans qu'il soit possible de spécifier de quelles espèces végétales elles proviennent.

4. — Le tchernozième ne présente pas de couches sédimentaires et l'on ne peut attribuer sa formation à des dépôts par l'eau. C'est du reste ce que prouve aussi la diminution graduelle de la richesse en humus de haut en bas.

De ce qui précède on conclut que :

5. — Le tchernozième s'est formé sur place par la décomposition de plantes semblables à celles qui croissent encore aujourd'hui sur le tchernozième et dans des conditions analogues à celles qui règnent actuellement.

Ce sont là des faits positifs, généralement admis par tous les savants qui se sont occupés des terres noires. Il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit de la distribution géographique du tchernozième et de sa richesse variable en matières organiques. Les opinions les plus diverses ont été soutenues pour expliquer les accumulations de

matières organiques dans les sols en général et surtout dans les terres noires. Nous ne suivrons pas M. Kostitscheff dans l'exposé qu'il fait de toutes ces hypothèses, nous bornant à résumer sa propre théorie.

M. Kostitscheff part de l'idée suivante : sur toute parcelle de tchernozième il se produit chaque année une certaine quantité de matières organiques sous forme d'organes végétaux souterrains et aériens. En même temps, sur cette parcelle de tchernozième, il se produit une transformation de matières organiques en matières minérales sous l'effet de la décomposition connue sous le nom de putréfaction.

Il est clair qu'il ne peut y avoir enrichissement du sol en matières organiques que si la décomposition des matières végétales est moins rapide que leur production par la végétation. Dès qu'il se décompose annuellement autant de matières végétales qu'il s'en produit, il ne peut plus se former de terre noire.

La science nous fournit, en nombre suffisant, des données pour évaluer les quantités de matières organiques que peut produire un hectare de terre dans les conditions déterminées. Il n'en est plus de même lorsque nous cherchons à évaluer les quantités de matières organiques décomposées par la même surface du sol. Nous connaissons beaucoup de processus de transformation de composés organiques complexes en combinaisons plus simples, mais jamais nous n'observons, dans ces cas, la formation de composés organiques de couleur brune ou noire. M. Kostitscheff s'est appliqué tout d'abord à déterminer expérimentalement les conditions qui influent sur la rapidité de la décomposition des matières végétales.

Le chapitre I de son ouvrage est consacré aux expériences sur la décomposition des matières végétales. Il passe d'abord en revue et discute les expériences de Moeller, de Wolny, de Fédore et de Petersen.

Les expériences faites, sous la direction de M. Kostitscheff, dans le laboratoire de l'Institut forestier ont porté sur des matières végétales fraîches et sur des matières déjà en voie de décomposition. On a pris, comme mesure de la rapidité de la décomposition, la quantité d'acide carbonique dégagée. Les substances fraîches étaient préala-

blement séchées, puis réduites en poudre aussi fine que possible. Les essais se faisaient dans des tubes de verre dont le fond était rempli d'ouate de verre sur laquelle on plaçait la matière à étudier, soit à l'état sec, soit préalablement mouillée. La matière était ensuite recouverte d'une couche d'ouate. L'air circulait dans les tubes de bas en haut et traversait préalablement des tubes contenant de la potasse caustique ou des solutions de potasse. On s'arrangeait toujours de façon à ce que l'appareil à solution de potasse se trouvât dans les mêmes conditions de température que le tube à essai. De cette manière l'air était saturé d'humidité et ne pouvait dessécher la substance en décomposition.

Au sortir du tube d'essai, l'air traversait un vase à acide sulfurique, dans lequel il abandonnait la majeure partie de son humidité ; il achevait de se dessécher dans un tube à chlorure de calcium. L'acide carbonique produit est absorbé par deux tubes de Marchand contenant, dans leur partie antérieure, de la chaux sodée et, dans la seconde partie, du chlorure de calcium. Le système était complété par un tube témoin renfermant aussi de la chaux sodée et du chlorure de calcium. Les aspirateurs, de la contenance de 60 litres, disposés de façon à fonctionner comme des flacons de Mariotte, laissaient échapper de 450 à 500 centimètres cubes d'eau par heure.

La première série d'expériences a été faite avec des feuilles de bouleau fraîches, c'est-à-dire n'ayant pas encore subi de commencement de décomposition. Voici comme exemple le tableau résumant les observations relatives à cette première série. Les autres sont analogues :

TEMPÉRATURE.		HUMIDITÉ P. 100.					
		78.9	64.1	38.7	11.7	3.6	
1)	0° à 5°	1 ^{er} jour } CO ² en dixièmes de milligr.	1907	2138	2119	40	0
		2 ^e jour. } pour 100 gr. de matière	2026	2112	2208	46	0
		3 ^e jour. } sèche.	1914	2020	2432	43	0
		Moyennes.	1950	2088	2254	43	0
2)	17°	1 ^{er} jour } CO ² en dixièmes de milligr.	4554	4349	5369	16	0
		2 ^e jour. } pour 100 gr. de matière	2934	2713	4343	30	0
		3 ^e jour. } sèche.	3864	3270	5841	23	0
		Moyennes.	3785	3445	5184	23	0

TEMPÉRATURE.	HUMIDITÉ P. 100.						
	78.8	64.1	38.7	11.7	3.6		
3) 35°	1 ^{er} jour	CO ² en dixièmes de milligr. pour 100 gr. de matière sèche.	20371	22093	20506	231	0
	2 ^e jour.		15097	16728	16837	122	0
	3 ^e jour.		11755	13157	12375	66	0
	4 ^e jour.		10124	9678	10045	82	0
	Moyennes.		14913	15441	15022	122	0
4) 50°	1 ^{er} jour	CO ² en dixièmes de milligr. pour 100 gr. de matière sèche.	3993	4435	4749	337	56
	2 ^e jour.		5643	3907	3274	514	76
	3 ^e jour.		5923	8141	8613	257	40
	Moyennes.			5188	5494	5544	379
	5) 65°	1 ^{er} jour	CO ² en dixièmes de milligr. pour 100 gr. de matière sèche.	5818	5993	4755	726
2 ^e jour.		3399		3396	5122	634	112
3 ^e jour.		3598		3105	4273	808	144
4 ^e jour.		2468		3300	2379	459	79
Moyennes.			3821	3957	4132	657	102

Une deuxième série d'essais, faits sur du foin frais, a donné des résultats analogues.

M. Kostitscheff tire de ces deux séries les conclusions suivantes:

1° La décomposition des matières végétales commence à des températures basses, dans le voisinage de zéro, et lorsque l'humidité est suffisante, la décomposition est assez rapide. Lorsque l'humidité varie entre 40 et 50 p. 100, la quantité d'acide carbonique qui se dégage en un jour atteint parfois jusqu'à 2 p. 100 de la quantité totale d'acide carbonique que peut produire la matière en décomposition.

2° La décomposition augmente rapidement avec la température; celle de 35° à 37° paraît la plus favorable. Au-dessus, la décomposition devient plus faible.

3° Lorsque les matières végétales ne conservent comme humidité que leur eau hygroscopique (11,7 p. 100 pour les feuilles de bouleau et 10,9 pour le foin), elles se décomposent fort lentement. Dans ces conditions, la température n'exerce pas une influence notable. Cependant lorsque la température s'élève jusqu'à 50 et même 65°, on remarque une légère augmentation dans la décomposition.

4° Lorsqu'on opère sur des substances desséchées plus complètement (sur des feuilles contenant, par exemple, 3,6 p. 100 d'eau) et

qu'on les fait traverser par un courant d'air préalablement desséché sur des morceaux de potasse caustique, la décomposition ne commence qu'au-dessus de 50° et reste toujours faible.

Les aiguilles de pin ont donné à peu près les mêmes résultats que les feuilles de bouleau et le foin, avec la seule différence que le maximum d'activité de la décomposition s'est produit vers 48° de température au lieu de 35°.

Plusieurs séries d'essais ont été faites avec des matières déjà en voie de décomposition depuis un temps plus ou moins long. Ces substances avaient été abandonnées à la décomposition dans de grandes capsules couvertes seulement d'une feuille de papier pour les préserver de la poussière. Les expériences ont été faites avec des feuilles de bouleau en décomposition depuis 8 mois, avec des feuilles en décomposition depuis un an, avec du foin se décomposant depuis 1 an et 37 jours et avec des aiguilles de pin en décomposition depuis 1 an et 23 jours.

On a obtenu des résultats tout à fait analogues à ceux qu'on donnés les substances fraîches, avec cette seule différence que le maximum d'accélération de la décomposition s'observe vers 50° ou 60°.

M. Kostitschef a cherché à déterminer par des expériences directes le poids de substance organique qui disparaît pendant la décomposition. Il a opéré sur des feuilles de bouleau et sur du foin; ces substances étaient placées dans de grandes capsules recouvertes de papier. On les maintenait à un degré d'humidité convenable, à la température ordinaire. Trois capsules contenaient du foin et trois autres des feuilles de bouleau; on a déterminé les quantités de substance sèche restant au bout de 6 mois, au bout d'un an et au bout de 18 mois.

De 200 grammes de matière sèche il est resté :

	FOIN.	FEUILLES de bouleau.
	— Grammes.	— Grammes.
Après 6 mois.	119,3	124,7
Après 12 mois	70,8	75,5
Après 18 mois	43,0	47,6

En calculant la perte de substance pendant chaque période, en

pour-cent de la matière existant au commencement de la période, on obtient :

	FOIN.	FEUILLES de bouleau.
	P. 100.	P. 100.
Dans les premiers 6 mois, 200 gr. ont perdu	40.35	37.65
Dans les autres 6 mois, 119 ^{gr} ,3 de foin ont perdu 48 ^{gr} ,5, ou.	40.74	
De même les 124 gr. de feuilles ont perdu 49 ^{gr} ,2 dans ces seconds 6 mois, ou		39.45
Les 70 ^{gr} ,8 de foin restants ont perdu 27 ^{gr} ,2 dans les derniers 6 mois, ou	39.26	
Les 75 ^{gr} ,5 de feuilles restants ont perdu 27 ^{gr} ,9 ou		37.0

En résumé, si l'on désigne par A la quantité initiale de matière sèche et par a la fraction qui reste non décomposée après une période déterminée, il restera après la première période Aa , après la deuxième Aa^2 , après la troisième Aa^3 et ainsi de suite. De sorte que l'on peut dire qu'une substance organique en décomposition ne disparaît jamais complètement.

Deux expériences comparatives ont été faites dans les tubes d'essai, l'une avec du foin en décomposition depuis trois ans, l'autre avec un échantillon de terre noire contenant 10.885 p. 100 de matières organiques. On a opéré sur 56^{gr},70 de foin et sur 50 grammes de terre noire contenant, comme le foin, 50^{gr},44 de substance sèche. Le dégagement de CO_2 a été de 1975 dixièmes de milligramme pour la terre noire par jour, pendant 6 jours, et de 2156 dix-milligrammes pour le foin. Ces deux expériences confirment ce fait important, qu'une matière déjà en décomposition depuis fort longtemps se décompose absolument comme une matière fraîche ou comme une matière en décomposition depuis un petit nombre d'années. Il est clair qu'il n'est question ici que de décomposition en présence de l'air.

M. Kostitscheff relate encore trois autres séries d'expériences faites dans différentes conditions avec des feuilles de bouleau fraîches et des feuilles déjà en décomposition. Nous ne citerons que les conclusions qu'il en a tirées.

1° Pour des substances organiques *complètement desséchées* à l'air, la décomposition ne s'arrête pas complètement, mais se ralentit beaucoup.

2° A des *températures voisines de zéro*, la décomposition peut se produire avec une grande rapidité lorsque les substances sont suffisamment humides.

3° Une *température de 100°* non seulement n'arrête pas la décomposition, mais l'active au contraire beaucoup.

Le chapitre II est consacré à l'étude de l'influence que peut exercer sur la décomposition des matières organiques, leur mélange avec différentes matières minérales. Contrairement à l'opinion établie par les expériences de Petersen, M. Kostitscheff prouve, par ses propres expériences que le mélange de carbonate de chaux n'active pas la décomposition des matières organiques, en présence de l'air. Le mélange avec du sable ou de la terre glaise ne produit aucun effet non plus¹.

Le chapitre III est consacré à la détermination des quantités de matières organiques qui peuvent se décomposer en 24 heures sur un hectare de terre. C'est Corenwinder qui, le premier, a sérieusement étudié cette question. Pour trois terres argileuses il a trouvé, dans des conditions différentes, qu'il se décomposait 47 kilogr., 32^{kg},9 et 150 kilogr de matières organiques par hectare et par 24 heures².

Peters a fait des expériences plus complètes. Il a déterminé à la fois combien il s'est produit de matières organiques par une végétation de trois mois et combien il a disparu de matières organiques du sol pendant ces mêmes trois mois. Ces expériences ont mis en évidence ce fait remarquable, que lorsque la terre est suffisamment humide et la température assez élevée, la décomposition des matières organiques du sol peut être assez active pour qu'il disparaisse plus de matières organiques qu'il ne s'en produit par la végétation. Peters a soigneusement pesé les racines et les parties aériennes; il avait semé un mélange de diverses herbes et obtenu une végétation touffue. A la température ordinaire de l'été, à Tharand, où ont été exécu-

1. L'action indispensable des microbes pour que la décomposition s'effectue activement est tout à fait en accord avec cette observation. L. G.

2. Les chiffres donnés par Corenwinder sont trop élevés s'il s'agit de cultures. La combustion dans les sols non remués, en place ne paraît guère, d'après les expériences culturales de Boussingault, à Bechelbroun, donner plus de 6 mètres cubes d'acide carbonique par hectare et par 24 heures, ainsi que l'a fait remarquer M. Th. Schløsing. L. G.

tées les expériences, l'accroissement par la végétation est plus grand que la déperdition par décomposition qui n'est alors que de 50 à 60 p. 100 de l'accroissement.

M. Kostitscheff a repris la question et a fait faire de nouvelles expériences dans son laboratoire, pour déterminer les quantités de matières organiques détruites par hectare et par 24 heures. Il a opéré sur deux terres noires dont l'une *a* contenait 10.022 p. 100 et l'autre *b* 10.105 p. 100 de matières organiques. Les terres étaient placées dans des verres profonds ayant une section de 89 à 90 centimètres carrés. Ces verres, posés sur des plaques de verre, étaient recouverts de cloches de verre parfaitement rôdées sur les plaques. Une couche de vaseline interceptait toute communication avec l'air extérieur. Chaque cloche portait à sa partie supérieure une tubulure par laquelle entraient deux tubes de verre destinés à l'entrée et à la sortie de l'air. Le tuyau d'arrivée se terminait un peu au-dessus de la surface de la terre par un coude horizontal, de façon à laisser échapper l'air sous forme d'un léger courant balayant la surface.

L'orifice du tuyau d'évacuation de l'air se trouvait un peu au-dessus des bords supérieurs du verre. L'acide carbonique était dosé comme à l'ordinaire et toutes les précautions étaient prises pour que l'air introduit n'en contint pas.

Le tableau suivant résume les résultats de ces essais.

	NOMBRE DE KILOGR. de matière noire décomposée par hectare et par 24 heures.	
	Terre (a).	Terre (b).
I. Terres sous forme de petites mottes, humidité de 25 à 29 p. 100.		
A 8° de température	11.2	7.3
A 17° de température	23.3	27.6
De 25° à 27° de température	36.2	39.1
II. Mêmes terres, tassées de façon à n'occuper que la moitié de la hauteur, soit 8 centimètres au lieu de 16. Même humidité que dans I.		
A 17° de température	14.2	15.11
De 25° à 27° de température	26.6	33
III. Mêmes terres réduites en poudre fine. Même humidité que I et II.		
A 17° de température	11.5	17.5
De 25° à 27° de température	27.9	24.6

IV. Mêmes terres en petites mottes séchées à l'air jusqu'à ne contenir que 11 et 12 p. 100 d'humidité. Il n'y a aucune décomposition.

V. Expérience faite avec des tranches de gazon découpées sur un pré et retournées l'herbe en dessous :

	TRANCHES de 3 cent. d'épaisseur.		TRANCHES de 8 cent. d'épaisseur.	
	Kilogr.		Kilogr.	
A l'état humide	112	par 24 heures et par hectare	92	
La surface ayant été desséchée.	46	—	—	41
La surface de nouveau mouillée.	63	—	—	53

Ces expériences montrent quelles quantités considérables de matières organiques peuvent se décomposer dans le sol et surtout dans ses couches supérieures, lorsque certaines conditions de température et d'humidité se trouvent réunies. En calculant pour sept mois d'une température moyenne de 17°, on trouve qu'un hectare de terre peut décomposer ainsi jusqu'à 24 000 kilogr. de matière organique par 24 heures sur un couche de 1 pied de profondeur. Cette quantité dépasse de beaucoup la quantité de matière organique (substance sèche) produite par la végétation annuelle sur les steppes des terres noires.

Lorsque le sol est tout à fait desséché la décomposition s'arrête. Entre les limites d'humidité qui se présentent dans la nature, le phénomène varie d'intensité. Pour qu'il puisse y avoir accumulation de matières organiques dans le sol, il faut évidemment que la production annuelle dépasse la quantité annuellement détruite. Mais, même dans ce cas, l'accumulation n'est pas illimitée.

Si nous désignons par A la production végétale annuelle sur un hectare de terre et si nous admettons que la décomposition enlève chaque année la moitié de la matière végétale existant au commencement de cette année, nous trouverons que la quantité de matière organique ou la réserve organique sera en automne.

$$\begin{aligned}
 \text{Après la 1}^{\text{re}} \text{ année.} & \quad A \\
 \text{Après la 2}^{\text{e}} \text{ année.} & \quad A + A \times 0,5 \\
 \text{Après la 3}^{\text{e}} \text{ année.} & \quad A + A \times 0,5 + A \times 0,5^2 \\
 \text{Après la 4}^{\text{e}} \text{ année.} & \quad A + A \times 0,5 + A \times 0,5^2 - A + 0,5^{-(n-1)}
 \end{aligned}$$

La réserve de matière organique augmente chaque année, mais en même temps augmente aussi la quantité de matière détruite dans le

cours de l'année. L'accumulation s'arrêtera forcément lorsque la décomposition annuelle sera devenue égale à la production annuelle, c'est-à-dire lorsque $A + 0,5A + 0,5^2A + \dots + 0,5^{n-1}A = A$.

En tirant n de cette équation, on trouve une valeur infinie; mais en prenant $n = 10$, la différence entre la somme des termes et A devient déjà petite, $A - \frac{A}{1024}$.

Si l'on admet que l'accroissement annuel par la végétation est de 3000 kilogr. par hectare, cette différence devient au bout de 10 ans ($n = 10$) de 3 kilogr. seulement et au bout de 20 ans de 3 grammes, et la décomposition peut alors être considérée comme égale à la production.

Si nous admettons maintenant que les conditions de température et d'humidité soient telles qu'il ne se décompose chaque année que la centième partie de la production, l'équation deviendra :

$$A + 0,99A + 0,99^2A + \dots + 0,99^{n-1}A = A.$$

Au bout de 100 ans, la différence sera encore 0,366 A et au bout de 1000 ans, 0,00004 A .

Ce n'est qu'au bout de 1000 ans que l'accumulation cessera de se produire.

On peut de même se rendre compte *grosso modo* du nombre d'années qui a été nécessaire pour produire une terre noire de richesse déterminée en matières organiques. Supposons une terre noire à 10 p. 100 de matières organiques, soit 510 000 kilogr. par hectare sur un pied de profondeur. Admettons deux cas, celui d'une production annuelle de 1500 kilogr. de matière organique (substance sèche) et celui d'une production de 375 kilogr. seulement. Un calcul facile montre que dans le premier cas, il a fallu 25000 ans pour amener une accumulation de 10 p. 100 et dans le second seulement 11400 ans. On admet pour cela qu'à l'époque actuelle l'accumulation a cessé, c'est-à-dire que la décomposition est devenue égale à la production, soit $\frac{1}{370}$ et $\frac{1}{1360}$ de la quantité totale.

M. Kostitscheff a soin de faire remarquer combien ces calculs sont

élastiques, basés, comme ils le sont, sur des conclusions tirées d'expériences peu nombreuses et de courte durée. Aussi ne leur faut-il demander que des aperçus plus ou moins exacts.

En réfléchissant aux considérations précédentes, on arrive à la conclusion qu'il n'est pas nécessaire qu'une terre soit bien fertile pour devenir noire. Ce n'est pas la quantité absolue de matière végétale produite chaque année qui joue le rôle principal dans l'accumulation ; celle-ci dépend surtout de la fraction de la réserve organique qui résiste chaque année à la décomposition. Un sol qui produirait 15000 kilogr. de matières organiques par an, mais qui en décomposerait les neuf dixièmes ne pourrait accumuler plus de 18000 kilogr. à l'hectare et l'accumulation s'arrêterait au bout de 4 ans. Un sol peu fertile, ne produisant que 375 kilogr. de matière organique par an, mais qui ne décomposerait qu'un millième de sa réserve organique par an, finirait par emmagasiner jusqu'à 375 000 kilogr. et deviendrait terre noire.

Dans le chapitre IV, M. Kostitscheff cherche à déterminer les causes premières de la production des matières noires.

Lorsqu'on abandonne à elles-mêmes des matières végétales pour les laisser se décomposer librement à l'air, on reconnaît bientôt que la décomposition ne commence pas toujours de la même manière. Tantôt ce sont des bactéries qui apparaissent d'abord et, dans ce cas, la matière se couvre d'une espèce de mucosité. D'autres fois on voit d'abord apparaître les cryptogames et la mucosité ne se produit pas. Les diverses parties d'un même fragment de substance végétale ne se décomposent pas toujours de la même manière. M. Kostitscheff a bien vite reconnu qu'il lui serait impossible d'étudier d'une façon complète l'action de chaque espèce de bactéries ; il s'est donc borné à observer les changements d'aspect et de couleur produit par les bactéries trouvées dans le sol et isolées par des cultures pures à l'aide de la méthode de Koch. Deux sortes de matières ont été soumises à l'action de ces bactéries : des matières végétales fraîches (fragments de navets, de raves, de carottes, feuilles fraîches de choux) et des matières préalablement soumises à une température élevée (grains de blé, pois, fèves, maïs, sarrasin). Dans tous ces essais, au nombre d'environ 150, les bactéries ont toujours donné des produits de

décomposition soit incolores, soit blanches ou jaunes ou même rouges, mais jamais bruns ou noirs.

M. Kostitscheff a fait aussi des cultures de mélanges de bactéries sur de la gélatine, introduisant ensuite le mélange dans les ballons d'essai. Il ne s'est pas produit non plus de matières brunes. Enfin, des cultures de bactéries, à l'abri du contact de l'air, ne conduisirent pas à un meilleur résultat au point de vue de la production des matières brunes. Des fermentations en présence du carbonate de chaux et du phosphate de chaux tribasique, ont aussi donné des résultats négatifs. On peut donc conclure que la production des matières organiques noires n'est pas due aux bactéries.

Pendant ces essais, il est arrivé que des spores de cryptogames sont tombés accidentellement dans les cultures de bactéries et ont donné lieu au développement de *mycéliums*. Presque toujours il se produisait autour des *mycéliums* une tache brun foncé. On a répété plusieurs fois cette expérience avec succès et l'on peut affirmer que si le développement des cryptogames n'est pas toujours accompagné de la production de combinaisons foncées en couleur, il n'y a, par contre, jamais production de composés foncés en l'absence des cryptogames.

M. Kostitscheff n'a pu poursuivre plus loin ses expériences dans ce sens, faute de temps. Il émet seulement l'opinion que ce sont les cryptogames qui jouent le principal rôle dans la production des matières noires. L'observation suivante vient à l'appui de cette opinion. En examinant les silos dans lesquels on conserve, pour l'alimentation du bétail, de grandes quantités de matières végétales, il a observé que les matières centrales restent blanches. Il se produit dans l'intérieur de la masse des fermentations lactique, butyrique et autres fermentations bactériques qui s'arrêtent au bout d'un certain temps, parce que les produits de ces fermentations s'accumulent et enrayent toute décomposition ultérieure. Les parties supérieures de ces silos, en contact direct avec l'air, se couvrent de cryptogames et prennent une couleur foncée.

La décomposition des matières organiques n'est pas exclusivement produite par les organismes inférieurs; elle est quelquefois purement chimique.

Wolny a fait passer à travers une terre riche en matières organiques, un courant d'air chargé de vapeur de chloroforme; il a pu constater qu'il se produit ainsi beaucoup moins d'acide carbonique que lorsqu'on fait passer de l'air pur. La décomposition est plus lente parce que les organismes inférieurs sont paralysés par le chloroforme et que les actions chimiques sont les seules à se continuer.

M. Dehérain a fait une observation analogue en traitant du fumier de ferme par du chloroforme; il en a conclu qu'une partie de la décomposition est due à des actions chimiques. Il a cherché à confirmer cette conclusion à l'aide d'expériences spéciales qui ne paraissent pas avoir été concluantes. M. U. Gayon ne décrit pas les expériences qu'il a faites sur ce sujet et se borne à dire que ses expériences confirment celle de M. Dehérain.

Nous avons vu que dans les expériences de M. Kostitscheff la décomposition des substances organiques ne s'est pas arrêtée à des températures voisines de 100°; or, on peut admettre qu'à ces températures élevées les bactéries sont toutes détruites. M. Kostitscheff a institué une expérience spéciale pour décider la question.

Dans un ballon de 500 centimètres cubes de capacité, on a introduit des feuilles de bouleau entières, préalablement desséchées à l'air et ensuite mouillées dans le ballon. Celui-ci fut abandonné pendant quelques jours à lui-même, à la température ordinaire, de façon à laisser la décomposition se bien établir. Le ballon fut ensuite relié à un système assez complexe de ballons et de tubes convenablement stérilisés et disposés de façon à permettre l'arrivée dans le ballon contenant les feuilles, d'un courant d'air privé de tout germe. Un ballon témoin, contenant une solution de peptone dans du bouillon (solution très favorable au développement des organismes inférieurs) précédait le ballon d'essai et était traversé par le courant d'air avant l'entrée de celui-ci dans le ballon d'essai. Aucune trace d'altération ne parut dans ce ballon témoin, pendant la durée de l'expérience.

On commença par doser l'acide carbonique pendant trois jours en maintenant tout l'appareil à la température ordinaire. Il se dégagait ainsi, le premier jour, 473 dixièmes de milligramme, le deuxième jour 536 et le troisième jour 324.

Au bout de trois jours, l'appareil fut placé sur un bain-marie de

manière à faire chauffer le ballon avec les feuilles, le ballon avec la peptone et le ballon précédant celui-ci. Pendant le jour, on avait élevé la température jusqu'à 90° à 95°, en faisant plonger pendant un moment dans l'eau le ballon avec les feuilles ; ordinairement la température se maintenait entre 70° et 75°, température suffisante pour stériliser les matières organiques.

Les quantités d'acide carbonique dégagé furent trouvées :

	DIX-MILLIGRAMMES.
Le 4 ^e jour.	4345
Le 5 ^e jour.	3483
Le 6 ^e jour.	5130
Le 7 ^e jour.	3540
Le 8 ^e jour.	3870
Le 9 ^e jour	4200

La température était maintenue entre 70° et 75° pendant le jour et l'appareil entier se refroidissait pendant la nuit. Le dixième jour, l'appareil fut enlevé du bain-marie et on continua encore à observer le dégagement de CO² à la température ambiante. On trouva ainsi :

	DIX-MILLIGRAMMES DE CO ² .
Le 10 ^e jour.	732
Le 11 ^e jour.	145
Le 12 ^e jour.	201
Le 13 ^e jour.	173
Le 14 ^e jour.	187
Le 15 ^e jour.	169

On voit que l'acide carbonique a continué à se dégager sous la seule influence des actions chimiques, toutes les précautions ayant été prises pour empêcher le développement des organismes inférieurs. Il est à remarquer cependant que, dans ce cas, la décomposition des matières organiques à la température ordinaire ne se fait que très lentement, en l'absence des bactéries et des cryptogames.

Dans toutes les expériences sur la décomposition des matières végétales abandonnées à l'air, on est frappé de ce fait que ces matières conservent en partie leur aspect et leur structure. Ainsi, du foin en décomposition depuis trois et quatre ans se reconnaît tou-

jours pour du foin. Il n'en est plus de même lorsque dans la matière en décomposition se développent des insectes ou autres petits êtres. Dans ce cas, on voit en très peu de jours toute la matière se transformer en une masse amorphe complètement semblable à la terre noire. Dans une capsule contenant 450 grammes de feuilles de bouleau en décomposition à l'air, on a remarqué un beau jour que les feuilles s'étaient transformées en une poudre noire uniforme dans laquelle on trouva une infinité de petites mouches du genre *Sciara*. Dans les autres capsules, les feuilles avaient gardé leur structure; il suffit d'y transporter quelques-unes des mouches de la précédente capsule pour voir les feuilles se réduire aussi en poudre uniforme en peu de jours.

Les observations faites sur la terre noire ne confirment pas celles de Darwin sur l'action des vers de terre. D'après Darwin, les vers ramènent constamment à la surface les parties inférieures du sol; s'il en était ainsi, les matières organiques devraient être uniformément distribuées dans le sol, ce qui n'est pas. Par contre, les vers et les insectes qui vivent dans les sols secs et bien aérés comme les terres noires, paraissent jouer un grand rôle en divisant à l'infini les végétaux en décomposition qu'ils transforment en substances amorphes. Il est à remarquer que dans les endroits humides, les matières végétales conservent toujours une apparence de structure, comme dans les tourbières.

Dans le chapitre V, M. Kostitcheff étudie spécialement les terres sous forêts.

On a depuis longtemps observé que les terres sous forêts ne contiennent jamais des quantités notables de matières noires. C'est ainsi que dans le voisinage de terres noires contenant de 8 à 10 p. 100 de matières organiques, on trouve des sols sous forêts à peine colorés sur une épaisseur de deux à trois pouces. Cette pauvreté en matières organiques des sols sous forêts a été diversement expliquée. M. Kostitcheff l'attribue à la rapidité de la décomposition des matières végétales sous l'influence des conditions spéciales d'humidité qui se rencontrent dans les forêts.

D'après les observations d'Ebermayer, la quantité de feuilles et de bois mort qui constitue ce que l'on appelle la couverture annuelle, serait d'environ 4100 kilogr. par hectare, dans une forêt de

hêtres. Au bout de trois ans, le poids de la couverture s'élève à 8160 kilogr. et au bout de six ans à 8470 kilogr. Enfin dans des parties de forêt où la couverture n'a pas été touchée pendant de longues années, son poids total s'est élevé à 10420 kilogr. par hectare, quantité égale environ à 2 fois et demie la production annuelle. Cela revient à dire qu'il se décompose annuellement 40 p. 100 de la réserve organique.

Admettons le poids de 4500 kilogr. comme poids moyen de la couverture annuelle pour les forêts en général, ce qui est exagéré ; supposons de plus que 10 p. 100 seulement de la réserve organique se décomposent annuellement. Dans ces conditions, la masse totale de la couverture peut finalement atteindre un poids de 45000 kilogr. à l'hectare. Cette quantité de matières organiques suffirait à peine pour enrichir de 1 p. 100 la couche supérieure du sol sur une épaisseur de un pied. On voit qu'on reste encore loin de la production de la terre noire, quoique l'on ait admis des conditions plus favorables que celles qui se présentent dans la réalité.

M. Kostitscheff a déterminé le poids de la couverture dans une forêt de 30 à 35 ans. Il a trouvé comme poids maximum 14100 kilogr., et comme poids moyen, 6270 kilogr. à l'hectare. Il fait remarquer que la couverture était en grande partie formée par des débris de bois mort et contenait relativement peu de feuilles. On pourrait ajouter aux feuilles tout le bois produit pendant une année, sans pour cela arriver à d'autres conclusions. Quelles que soient les quantités de matières organiques produites par la végétation forestière, jamais elles ne seront en quantité suffisante pour enrichir le sol en matières organiques assez pour produire de la terre noire.

Le chapitre VI est consacré à l'étude de l'influence qu'exerce le climat sur la production des terres noires.

D'après plusieurs savants et surtout d'après M. Dokoutschaeff, le climat joue le rôle principal dans la formation et la distribution géographique des terres noires. M. Dokoutschaeff, auteur d'un ouvrage très complet sur les terres noires, a même déterminé des lignes et des zones isohumiques analogues aux lignes isothermiques. M. Kostitscheff ne nie pas l'influence du climat sur la décomposition plus ou moins rapide des matières végétales, mais, se basant sur les cou-

sidérations et observations exposées dans les chapitres précédents, il démontre que les conditions climatériques de la Russie sont telles, qu'en aucune région de ce pays il n'a pu et il ne peut se produire d'accumulation considérable de matières organiques provenant de matières végétales de la surface du sol.

Nous avons vu avec quelle rapidité se décomposent les végétaux, lorsque les conditions de chaleur et d'humidité favorables sont réunies. En admettant que cette décomposition n'a lieu que pendant les 50 jours de pluie annuellement observés, il se détruirait encore 1800 kilogr. de matières organiques (substance sèche) par hectare, quantité supérieure à la production annuelle moyenne sur un hectare de steppe. Mais la décomposition ne se borne pas aux jours de pluie ; chaque nuit, d'abondantes rosées couvrent les steppes et l'humidité qui en provient suffit pour entretenir la décomposition qui marche ainsi d'une façon presque ininterrompue pendant sept mois. Aussi, nulle part on ne découvre sur la surface de la steppe de traces de la végétation des années précédentes.

Si les matières végétales de la surface se décomposent avec une grande rapidité, il n'en est pas de même des racines ou parties végétales souterraines. Le terrain des steppes est en général très dense ; lorsque la couche supérieure est desséchée par les rayons du soleil, elle devient très dure et ne se laisse presque plus pénétrer par les eaux de pluie. Celles-ci coulent à la surface du sol, n'imbibant que les couches les plus superficielles. On sait que la densité de la terre noire est due principalement à l'extrême division de ses parties constituantes. Tant que ces terres ne sont pas labourées, elles ne s'imbibent d'eau que jusqu'à une faible profondeur. M. Ismaïlski a dosé au printemps l'eau contenue dans de la terre de steppe non cultivée. Il n'y a trouvé que 7 p. 100 d'eau, alors que la terre de steppe cultivée en contenait 20 p. 100, au même moment. Sous l'influence des journées chaudes, la terre de la steppe se dessèche de plus en plus et, comme les pluies de l'été ne la pénètrent pas, elle ne contient guère plus d'humidité que de la terre complètement desséchée à l'air. Or, nous avons vu que dans ces conditions toute décomposition s'arrête.

Les matières végétales souterraines, les racines, se trouvent donc

pendant la plus grande partie de l'année dans les conditions les plus défavorables à la décomposition. Les pluies et les rosées qui activent la décomposition des matières végétales de la surface du sol n'ont aucune action sur les racines. Celles-ci n'ont que quelques semaines au printemps et quelques semaines en automne pour se décomposer activement. Elles se trouvent donc dans les conditions voulues pour produire peu à peu une accumulation de matières organiques et par suite de la terre noire. Le climat n'est pas le facteur le plus important : les propriétés physiques du sol, sa densité, sa composition et surtout son relief, jouent le rôle principal.

Dans le chapitre VII, l'auteur étudie les raisons pour lesquelles les terres noires sont en général couvertes d'herbes et non de forêts. Celles-ci sont si rares dans les régions de terres noires qu'on a pensé que le climat des terres noires est défavorable à la végétation forestière. Nous verrons plus loin qu'il n'en est rien.

De l'extrémité sud-ouest de la Russie jusqu'aux parties septentrionales d'Orenbourg, nous observons, sur tous les terrains élevés et non labourés, une seule flore dont la stipe pennée (*Stipa pennata*) peut être considérée comme le représentant principal. La même flore s'étend jusqu'au Caucase. Il serait téméraire d'attribuer à une uniformité de climat cette uniformité de flore. La nature du sol et surtout ses propriétés physiques jouent un plus grand rôle ici que le climat. En effet, il suffit de labourer la steppe, c'est-à-dire d'ameublir son sol, pour voir aussitôt changer la flore. La *Stipa pennata*, en russe le *koril*, disparaît et l'on voit apparaître le chiendent (*Triticum repens*), le *Bromus inermis*, le *Legos* ou *Hierochloa borealis*. Cela ne veut pas dire que la stipe pennée préfère les terrains durs et secs ; cela prouve seulement qu'elle résiste mieux que les autres plantes, ses concurrentes, à la sécheresse des steppes non cultivées.

A côté de la *Stipa pennata*, on observe encore les *Stipa capillata*, *Festuca ovina*, *Köhleria cristata* et *Caragana frutescens*. Ces graminées se trouvent dans toutes les régions de steppes. Tantôt c'est la *Festuca ovina* qui domine, tantôt *Stipa pennata*. Lorsqu'on abandonne à elle-même une terre de steppe cultivée depuis plusieurs années, on voit reparaître de nouveau ces graminées au bout de quelques années. Les plantes des steppes de terre noire ne se rencontrent que

dans les endroits où la culture n'est pas encore parvenue (presque toujours sur les terrains en pente raide et non labourés). On a voulu considérer ces plantes comme spéciales aux terres noires. Or, jamais on ne les voit apparaître sur les terres noires humides et, par contre, elles prospèrent sur tous les sols secs, sur la marne ou la glaise, ainsi que sur des terrains calcaires contenant moins de 2 p. 100 d'humus.

Pourquoi les forêts sont-elles si rares dans la région des terres noires? Faut-il admettre avec certains auteurs qu'elles ne peuvent grandir dans ces régions à cause du manque d'humidité? Les forêts résistent au contraire mieux que les herbes aux grandes sécheresses. De nombreuses plantations de forêts ont été faites depuis une quarantaine d'années en pleine terre noire et leur vigoureuse végétation est là pour prouver que les terres noires sont très favorables aux forêts. On compte déjà des dizaines de milliers d'hectares de forêts plantées par les soins de l'administration forestière russe.

Si les forêts n'ont pas apparu jusqu'ici sur les terres noires et n'y apparaissent jamais spontanément, cela tient tout simplement à ce que les herbes de la steppe sont plus vigoureuses que les jeunes pousses d'arbres et étouffent celles-ci. Les jeunes arbres ne peuvent supporter la concurrence vitale que leur font les herbes. Mais partout où la main de l'homme protège les jeunes plants, les arbres prennent bien vite le dessus et ne cèdent alors plus jamais la place aux herbes de la steppe.

Dans le chapitre VIII, M. Kostitscheff examine la possibilité de l'infiltration des matières organiques de la surface pour expliquer la coloration des couches inférieures.

En 1876, après avoir lu les travaux bien connus de M. L. Grandeau sur les terres noires, M. Kostitscheff avait exprimé l'opinion que les matières organiques produites par la décomposition des matières végétales de la surface du sol, peuvent s'infiltrer dans les couches inférieures à l'état de solution dans les sels ammoniacaux. Cette opinion n'a pu résister à une étude approfondie de la question. M. Kostitscheff discute les nombreuses expériences publiées sur l'absorption et la décomposition par les couches supérieures du sol, de toutes les matières organiques en dissolution dans l'eau. Une couche de terre

de un millimètre d'épaisseur suffirait pour absorber les 10 ou 15 kilogr. d'ammoniaque qui tombent annuellement sur un hectare de terre, en dissolution dans l'eau de pluie. On ne peut donc admettre que cette ammoniaque puisse dissoudre les matières noires de la surface et les entraîner dans les couches inférieures.

De tout ce qui précède, on peut conclure que les matières organiques qui se décomposent à la surface du sol ne peuvent en aucun cas contribuer sérieusement à la production des terres noires. On est forcé de recourir aux parties souterraines, aux racines, pour trouver la cause de l'accumulation de matières organiques et de l'origine des terres noires. Lorsqu'on observe une tranchée dans la terre noire, on constate que les racines ne descendent pas au-dessous des couches de terre encore sensiblement teintées de noir et l'on voit diminuer avec la profondeur le nombre des racines ainsi que l'intensité de la coloration.

On doit à Hellriegel des expériences assez complètes sur la distribution des racines dans le sol. Quoique ces expériences n'aient pas été faites sur de la terre noire, les résultats obtenus ont un grand intérêt pour la solution de la question qui nous occupe.

En divisant le sol en couches d'épaisseur sensiblement égales et en déterminant le poids des racines contenues dans chacune de ces couches, Hellriegel a obtenu un certain nombre de données qu'il a groupées en tableau. En prenant pour 100 le poids des racines dans la couche supérieure, les quantités contenues dans les autres couches ont été :

	POUR le froment.	POUR l'avoine.	POUR la luzerne.
Couche n° 1.	100	100	100
— n° 2.	79.6	85.6	82.2
— n° 3.	34.5	30.2	37.4
— n° 4.	27.5	5.9	2.0
— n° 5.	22.7	0	0.7

M. Kostitscheff a établi un tableau semblable en égalant à 100 la quantité de matières organiques contenues dans 100 grammes de la couche supérieure de plusieurs terres noires. Les couches avaient

6 pouces d'épaisseur. Nous ne citerons que trois colonnes de ce tableau.

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
Couche n° 1	100	100	100
— n° 2	89.1	63.9	80.3
— n° 3	66.9	48.3	70.0
— n° 4	47.3	35.0	58.4
— n° 5	47.3	26.0	38.2
— n° 6	34.6	18.1	33.0
— n° 7	23.9	6.3	16.2
— n° 8	14.4		
— n° 9	6.7		

Ces terres contenaient en réalité, sur 100 parties de terre, les quantités suivantes de matières noires, dans les diverses couches successives :

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
	P. 100.	P. 100.	P. 100.
Couche n° 1	5.418	8.112	9.636
— n° 2	4.830	5.192	7.706
— n° 3	3.620	3.920	6.714
— n° 4	2.561	2.842	5.605
— n° 5	2.587	2.112	3.565
— n° 6	1.876	1.467	3.175
— n° 7	1.294	0.513	1.555
— n° 8	0.778	0.703	
— n° 9	0.364		

Les expériences de M. Dehérain confirmeraient aussi l'hypothèse qui considère les racines comme les seuls facteurs de la production de la terre noire. Il résulterait en effet de ces expériences qu'une terre cultivée chaque année s'appauvrit en matières organiques, quelle que soit la quantité d'engrais qu'on lui donne, et cet appauvrissement ne s'arrête que quand on cesse de cultiver la terre et qu'on la transforme en prairie ou en herbage.

Dans les célèbres expériences de Rothamsted, on a observé que sur des prairies naturelles fumées exclusivement à l'aide de sels ammoniacaux, il se développe surtout des herbes à racines courtes. Au contraire, sur des prairies amendées à l'aide de nitrate, les herbes à racines longues prennent le dessus. En examinant le sol au

bout de quelques années de cette fumure exclusive, on a constaté que, sur la parcelle fumée avec les sels ammoniacaux, la couche supérieure du sol avait seule noirci, tandis que sur la parcelle qui avait reçu le nitrate de soude, la terre avait, au contraire, noirci sur une grande profondeur correspondant à la profondeur atteinte par les racines.

La théorie de la formation de la terre noire donnée par M. Kostitscheff est la seule, d'après lui, qui puisse expliquer :

- a) Pourquoi sous les forêts il ne se produit pas de terres noires ;
- b) Pourquoi dans le nord de la Russie et, en général, sur tous les sols humides, il ne se produit jamais de tschernozème ;
- c) Pourquoi, sur les sols sablonneux, la coloration s'observe sur des couches plus profondes ;
- d) Pourquoi la coloration cesse à la limite inférieure atteinte par les racines ;
- e) Pourquoi la richesse en matières organiques diminue avec la profondeur des couches ;
- f) Pourquoi à une végétation plus active en un endroit donné correspond toujours une richesse en matières noires plus grande, même lorsque les deux endroits comparés sont à des distances très rapprochées.

Le chapitre IX est consacré à l'examen des terres noires au point de vue de leur richesse en matières organiques ; cette richesse varie avec la nature de la végétation. M. Kostitscheff a réuni dans ce chapitre les résultats de 234 dosages de matières organiques dans des échantillons de terre noire pris dans toutes les parties de la région du tschernozème en Russie. Tous ces échantillons ont été préalablement desséchés entre 105 et 110 degrés. La matière organique a été déterminée d'après la quantité d'acide carbonique obtenue en oxydant la matière par l'acide chromique en présence de l'acide sulfurique. Cette méthode a l'avantage d'être assez rapide et exacte par là ce qu'elle peut laisser à désirer sous le rapport de l'exactitude.

Lorsqu'on observe la végétation qui recouvre la steppe, on la voit parfois conserver un caractère uniforme sur des étendues de 10 à 15 kilomètres. D'autres fois, on constate des différences frappantes

dans la nature ou dans la vigueur des plantes, à quelques mètres de distance. Toute variation dans la végétation correspond à une variation de richesse du sol. Ainsi les échantillons de terre noire classés sous les numéros d'ordre 118 et 120, dans le tableau des dosages de matière noire, ont été pris à une distance de moins de cent mètres l'un de l'autre. Le premier contient 8.4 p. 100 et le second 4.4 p. 100 de matières organiques. Il est clair que ce n'est pas là un effet du climat. L'explication est donnée par ce fait qu'à l'endroit où a été prélevé l'échantillon 118, pousse le koril, *Stipa pennata*, tandis que le numéro 120 a été pris en un endroit occupé par *Linosyris villosa*. Règle générale, c'est toujours sous la *Stipa pennata* que se trouve la meilleure terre noire. Parfois on rencontre au milieu de la terre noire une parcelle de quelques mètres de diamètre formée par ce que l'on appelle en russe un *solountschek*, terrain salé. Sur ces taches salées, pousse surtout *Linosyris villosa*. L'échantillon 104 a été pris sur une telle tache salée ; il ne contient que 2.99 p. 100 de matière organique. Le n° 105 a été pris au centre de cette même tache salée, sur une espèce d'îlot d'à peine un mètre de diamètre recouvert de koril, *Stipa pennata*. Il contient 4.37 p. 100 de matière organique. L'échantillon 174 contient 3.65 p. 100 et le n° 175, prélevé 6 mètres plus loin, contient 9.3 p. 100 de matière noire. A l'endroit où a été prélevé le n° 174, pousse un peu de *Stipa pennata* et de *Festuca ovina*, mais le *Ceratocarpus arenarius* domine. Le n° 176 a été pris sous une belle végétation de *Stipa pennata* sans trace de *Ceratocarpus*. On pourrait multiplier les exemples de ce genre. Partout la richesse en matières organiques est en rapport direct avec le développement de la végétation. A l'origine, lorsque les plantes ont pris possession d'un terrain purement minéral, il n'a pu y avoir de différence dans la végétation que par suite de différences dans la composition du sol, dans sa profondeur ou dans sa position. Plus tard, à ces différences originelles s'ajoutent celles qui proviennent des quantités différentes de matières organiques accumulées dans le sol. On comprend que ces différences ont pu devenir de plus en plus grandes.

L'accumulation de matières organiques, ainsi qu'on l'a vu plus haut, ne se produit que quand la plus grande partie des matières

végétales souterraines échappe à la décomposition annuelle. Il est clair que cette accumulation est d'autant plus rapide que la production annuelle de racines est elle-même plus grande. Prenons comme exemple deux sols dans lesquels se décompose annuellement un millièbre seulement de la réserve organique souterraine, mais dont l'un produit 300 kilogr. de matière végétale par hectare et l'autre 1500 kilogr. Les deux sols s'enrichiront en matières organiques et deviendront terre noire ; mais le premier ne pourra jamais contenir plus de 300 000 kilogr. de matières organiques à l'hectare, tandis que le second pourra arriver à en contenir 1 500 000 kilogr.

Dans le chapitre X et dernier, M. Kostitscheff étudie les modifications qu'éprouve la surface des terres noires sous l'action des eaux.

Dans les steppes non touchées par l'homme, c'est-à-dire non cultivées, l'action de l'eau sur la surface du sol est presque nulle. La couche d'herbe et l'enchevêtrement de racines innombrables protègent le sol et empêchent tout ravinement. Il n'en est plus de même si, pour une raison quelconque, la couche protectrice est entamée. Sous l'influence de la sécheresse, il se produit quelquefois d'assez grandes fentes en été ; si l'automne est aussi sec, ces fentes ne se referment pas et, au printemps, la fonte des neiges les élargit en minant leurs parois toujours dénudées. La partie supérieure résiste et surplombe les parois jusqu'à ce que son propre poids l'entraîne au fond de la fente, devenue ravin. Dans ce cas, le ravinement se fait avec une rapidité surprenante. C'est ainsi que M. Kostitscheff a pu voir un ravin de 8 mètres de largeur et de 9 à 10 mètres de profondeur, s'agrandir en un seul printemps de 12 mètres dans sa longueur tout en gardant la même profondeur.

Lorsque la steppe est couverte d'herbes, les pluies les plus violentes ne peuvent attaquer la surface du sol, même sur des pentes très inclinées. On ne saurait donc, avec M. Dokoutschaeff, attribuer à l'action de l'eau les différences de richesse en matières organiques observées sur des échantillons pris à de faibles distances les uns des autres.

Dans un seul cas, l'action de l'eau peut contribuer à augmenter l'épaisseur de la couche de terre noire. C'est lorsque le fond d'une vallée se recouvre successivement de couches minces de matières

minérales détachées par les eaux des flancs des collines non couvertes de végétation. Mais, dans ce cas encore, la terre noire se produit sur place par la décomposition des racines qui se développent successivement dans chacune de ces couches.

Dans le gouvernement de Karkhoff, à côté de collines et de montagnes calcaires complètement dénudées, on trouve des collines semblables, mais recouvertes de gazon. Sur ces dernières collines, il s'est formé du tchernozone sur la craie même, car dans la couche supérieure on observe encore de petits morceaux de craie et le sol est de teinte plus claire que le tchernozone. Aussi pourrait-on s'attendre à le trouver moins riche en matières organiques que la terre noire ordinaire. Mais l'analyse montre qu'il en est tout autrement.

	P. 100.		P. 100.
Échelle n° 47. Tschernozone d'une colline calcaire, couche supérieure. . .	7.81	de matière organique et	9.71 de CaO, CO ² .
Échelle n° 48. Couche inférieure de la même.	4.48	—	21.65 —
Échelle n° 49. Tschernozone de la même colline, mais sur un sol argileux.	7.93	—	0.71 —

On pourrait multiplier les exemples de ce genre ; ils prouveraient tous que sur une terre bien couverte de gazon, le tchernozone est toujours riche en matières organiques, quelle que soit la position du sol. Il n'en est plus de même lorsqu'on laboure les collines ; dans ce cas, sous l'action répétée de l'eau, une partie des matières organiques du sol des terrains inclinés est entraînée vers le pied de la colline et peu à peu le tchernozone disparaît vers le sommet.

M. Kostitscheff n'admet nullement l'opinion des savants qui ne veulent considérer comme terres noires normales que celles qu'on trouve sur des terrains unis. Les observations prouvent au contraire qu'il peut y avoir sur les flancs des collines et sur leurs plateaux supérieurs du tchernozone tout aussi normal, comme épaisseur de couches et comme distribution des matières organiques dans les différentes couches. Il arrive même souvent que dans les endroits montagneux les vallées basses contiennent du tchernozone moins riche

en matières organiques ou en couches moins profondes que les flanes des collines ou les plateaux supérieurs.

Nous terminerons le compte rendu de la première partie de l'ouvrage de M. Kostitschew en traduisant le passage suivant de la préface qui indique clairement le but que s'est proposé l'auteur et le plan de son travail : « La formation du tschernozème est une question de botanique, a dit Ruprecht. Cette proposition a aujourd'hui une signification plus profonde et plus vaste que quand elle fut formulée. La géologie n'a qu'une importance secondaire dans la question du tschernozème, parce que l'accumulation des matières organiques se produit dans les couches supérieures du sol, parfois très différentes au point de vue géologique. La question de la terre noire est une question de géographie et de physiologie des végétaux supérieurs et une question de physiologie des organismes inférieurs qui produisent la décomposition des matières végétales. En examinant la question sous ce point de vue, il est facile de voir combien doivent être nombreuses et variées les expériences destinées à élucider la question de la formation des terres noires. Dans cette première partie de mon ouvrage, je n'ai pu examiner que les questions les plus générales et je n'ai cherché à les élucider qu'à gros traits. La composition des matières organiques du tschernozème, les modifications chimiques et morphologiques des résidus végétaux pendant leur transformation en matières noires, seront examinées dans la troisième partie. Ces questions n'ont été qu'effleurées dans le chapitre IV de la première partie. La seconde partie sera consacrée aux recherches sur la composition de la partie minérale des terres noires et sur leurs propriétés physiques. »

Orlowetz, juillet 1887.

E. FELTZ.

Texte extrait de **Risler (1894)**

GÉOLOGIE AGRICOLE

CHAPITRE I^{er}

UTILITÉ DE LA GÉOLOGIE POUR L'ÉTUDE DES TERRES ARABLES

Les classifications que donnent la plupart des traités d'agriculture, par exemple celle de M. Masure, qui est la plus logique et la plus simple, divisent les terres en terres franches, terres argileuses, terres sablonneuses, terres calcaires, terres argilo-calcaires, etc. Mais cela ne suffit pas.

Il y a sable et sable. Il y a toutes sortes d'argiles. Il y a également toutes sortes de calcaires : la craie ne ressemble pas au calcaire corallien et le calcaire corallien ne ressemble pas davantage au calcaire grossier des environs de Paris. Les terres qui dérivent des uns ou des autres diffèrent par leur composition chimique comme par leurs propriétés physiques; elles n'ont ni la même profondeur, ni le même sous-sol.

La plupart des agriculteurs emploient seulement les termes de *terres fortes* ou *terres légères*, *terres chaudes* ou *terres froides* qui sont connus partout, ou ces dénominations locales qui sont très caractéristiques, comme, par exemple, *diot* pour l'argile glaciaire en Savoie, *arène* pour sable granitique dans le Morvan et le Limousin, *groix* pour terres de calcaires oolithiques dans le Poitou, etc., dénominations qui varient d'un pays à l'autre, mais qui correspondent presque toujours à certaines formations géologi-

ques et que la géologie seule peut réunir dans une classification générale.

Les marnages et les chaulages sont, depuis longtemps, usités dans certaines parties de la France. Mais aujourd'hui le progrès des moyens de transport permet de les étendre à des régions où ils coûtaient trop cher autrefois. Quelles sont les terres auxquelles ils conviennent? à quelle dose faut-il les employer, suivant qu'ils sont plus ou moins riches en chaux pure?

Si les engrais chimiques peuvent rarement remplacer le fumier de ferme, il est aujourd'hui démontré que, dans beaucoup de terres, on ne peut arriver aux rendements maxima de la culture intensive et souvent faire une culture quelconque avec chances de bénéfice, qu'en employant des phosphates comme addition au fumier, comme engrais complémentaire. Les terres sont incomplètes, il faut aller prendre dans certaines couches les phosphates qui y sont en excès pour les porter dans les terres qui en manquent. Quelles sont ces terres? — Ailleurs, c'est la potasse qui fait défaut; comment le savoir?

Les anciennes classifications ne répondent à aucune de ces questions. Mais, en s'appuyant sur la géologie, elles pourront être plus utiles aux agriculteurs; en devenant plus réellement scientifiques, elles seront du même coup plus pratiques.

Pourquoi la géologie ne deviendrait-elle pas aussi utile pour les agriculteurs qu'elle l'a été pour les métallurgistes et les ingénieurs? Les minerais de fer et les matériaux de construction ne sont pas plus régulièrement répartis que les marnes, les phosphates et les sels de potasse.

Et, si l'on peut indiquer les formations dans lesquelles il y a quelque probabilité de trouver des dépôts d'amendements ou d'engrais exploitables, pourquoi ne pourrait-on pas indiquer tout aussi bien celles où ils peuvent être employés avec le plus de profit, celles qui manquent le plus de chaux, de phosphate, etc.?

« C'est dans la constitution géologique du sol, disait Antoine Passy, qu'il faut chercher les raisons des dénominations spéciales affectées à certaines étendues du pays.

« Le bon sens des paysans a devancé la science; il a distingué par

un nom particulier chaque étendue offrant le même aspect et la même culture ¹. »

Ces rapports ont été indiqués d'une manière plus précise encore par Élie de Beaumont et Dufrénoy, les savants auteurs de la Carte géologique de la France :

« Le mot *pays*, dans le langage des naturalistes, disent-ils dans leur Introduction, est très significatif et présente à l'esprit une tout autre idée que celle qu'on y attache dans le langage ordinaire. Il désigne un ordre tout particulier de terrain dans une certaine étendue. On se tromperait fort si l'on croyait que tout est confondu dans notre globe, et cette manière de s'exprimer qu'ont adoptée les naturalistes prouve le contraire. Ceux qui voyageront en naturalistes verront qu'il est tout à fait dans l'ordre de dire : *pays à craie*, *pays à marbre*, *pays à ardoise*, etc., car ils verront que, pendant telle ou telle étendue, le fonds du terrain est formé de telle ou telle matière, et que, s'il y a quelque variété pendant une certaine étendue, ou quelque matière particulière, le fonds du terrain est caractérisé constamment par l'une ou l'autre des matières minérales qui y est prédominante.

« Les contours de chacun de ces *pays*, d'une composition spéciale, sont ordinairement assez faciles à saisir, parce que chacune des matières minérales qui constituent les différents compartiments de l'écorce terrestre imprime généralement à la partie correspondante de la surface des caractères particuliers : d'où il résulte que leurs limites respectives se décèlent extérieurement par des circonstances plus ou moins frappantes, que l'œil saisit avec facilité dès que l'esprit en est prévenu.

« Un premier coup d'œil jeté sur la carte géologique de la France fait voir qu'en effet il existe souvent des rapports extrêmement marqués entre les formes extérieures du sol et sa composition intérieure.

« L'immense quantité de vallées et de petits ruisseaux qui sillonnent dans toutes les directions les montagnes granitiques du Limousin et de l'Auvergne, se reproduisent dans la partie de la Vendée, de la Bretagne et des Vosges dont le sol appartient aux terrains

1. *Description géologique du département de la Seine-Inférieure.*

créatés. Cette disposition est si prononcée, qu'on peut tracer approximativement les limites de ces terrains par la seule considération des cours d'eau.

« Cette considération des cours d'eau et des vallées qu'ils occupent est encore un guide presque certain pour distinguer les contrées dont le sol est formé par les divers terrains de sédiment. En effet, l'on voit que dans les départements de la Dordogne, du Lot, de l'Aveyron et du Tarn, où le calcaire du Jura domine, les vallées sont rares et profondes. La forme abrupte de leurs escarpements nous montre, en outre, que ces vallées sont le produit de fentes qui ont coupé le terrain sur une épaisseur considérable. Il en résulte que ces contrées, lorsqu'elles n'ont pas éprouvé de bouleversements très violents, présentent de vastes plateaux bordés de murs presque verticaux. Le simple passage de l'un des bords d'une vallée à l'autre bord exige plusieurs heures. Telles sont, par exemple, les *Causse*s du midi de la France, dont la surface, élevée au-dessus de la mer de plusieurs centaines de mètres, se tient au même niveau sur 12 à 15 lieues de longueur, sans autre accident de terrain que des crevasses énormes qui les traversent dans toute leur longueur. Ces terrains ne présentent pas partout des plateaux aussi étendus ; mais le petit nombre de vallées qui les arrosent, et leur profondeur, sont des caractères qui les distinguent constamment.

« Les contrées formées de terrains créacés ont une certaine analogie avec les pays de calcaire jurassique dont nous venons de parler ; mais les premiers admettent toujours, outre les vallées de déchirement, un certain nombre de vallées à formes plus douces et creusées simplement par l'action des eaux : les ruisseaux y sont alors plus nombreux, et les coupes des montagnes, quoique fortement allongées, sont en général arrondies. Enfin, les couches argileuses, si abondantes dans les terrains tertiaires, donnent souvent à ces terrains la propriété de retenir les eaux ; aussi leur surface est-elle fréquemment couverte d'une quantité prodigieuse de petits étangs qui donnent au pays une physionomie toute particulière. Les départements d'Indre-et-Loire, de Loir-et-Cher, du Loiret, ainsi que les plaines si fertiles de la Bresse, nous offrent des exemples de cette disposition.

« Plusieurs des relations que nous venons de signaler entre les formes extérieures du sol et la nature intérieure du terrain sont d'un ordre infiniment supérieur aux modifications que les travaux des hommes peuvent opérer. On ne saurait nier, sans doute, que l'industrie humaine n'ait produit de grands changements sur les apparences extérieures de beaucoup de parties de la surface de notre globe : et n'est-ce pas, en effet, de nos jours, une chose rare et imposante qu'une scène naturelle composée d'éléments assez grands pour qu'on puisse se dire que les travaux des hommes n'ont eu sur elle aucune influence, et qu'elle est exactement telle qu'on la verrait si le régime des Celtes et des Druides régissait encore l'Europe ?

« A l'exception de la mer, dont la perpétuelle mobilité nous échappe, et des hautes montagnes que leurs neiges éternelles ont préservées des atteintes de l'activité humaine, notre industrie a changé plus ou moins la surface de tous les pays civilisés. Mais si, en dépouillant le sol de ses bruyères ou de ses forêts, en l'ouvrant à l'action des agents atmosphériques qui tendent à le dégrader, en apportant des modifications jusque dans le climat auquel il se trouve exposé, les travaux des hommes ont changé la forme des rapports qui existaient, dans l'origine, entre la constitution intérieure du sol et sa manière d'être extérieure, ils n'ont pu rendre semblables, même à l'extérieur, des sols dont l'intérieur est différent.

« L'industrie humaine a profité des circonstances qui dévoilent la composition intérieure du sol ; mais elle a dû, dans chaque contrée, se conformer à leur nature, et les moyens variés qu'elle a pris pour les mettre à profit n'ont fait, en général, que les rendre plus apparentes.

« La facilité toujours croissante des communications, l'établissement des chemins de fer, pourront rapprocher les villes et prolonger, pour ainsi dire, les faubourgs de Paris jusqu'aux frontières du royaume, mais ces puissants instruments d'une civilisation perfectionnée, tout en devenant pour les campagnes une source nouvelle de fécondité, ne pourront faire que les cultures établies sur des sols différents s'identifient plus qu'elles ne l'ont fait jusqu'à ce jour. La facilité des communications ne changera ni la forme des vallées,

ni l'aspect des coteaux ; elle permettra, au contraire, de les comparer plus facilement, et, par conséquent, de mieux saisir leurs dissemblances.

« Le besoin de noms propres, pour désigner les espaces où se manifestent ces dissemblances, se fera de plus en plus sentir ; et ceux qu'une longue habitude a affectés à cet usage, loin de s'effacer, prendront un sens de plus en plus déterminé. *La Beauce, la Brie, la Sologne*, ne cesseront donc jamais d'avoir des noms spéciaux, et l'on comprendra de mieux en mieux que la connaissance des noms de ce genre et de tout ce qu'ils expriment est, à la fois, la base de la géographie ordinaire et de la géographie minéralogique. C'est là leur point de contact et leur point de départ commun. »

§ 1. — Engrais complémentaires.

Pour juger si une terre a besoin de tel engrais ou de tel autre, le moyen le plus simple est d'essayer ces engrais, mais de les essayer avec une certaine méthode, suivant un certain plan. C'est ce que l'on a appelé :

L'analyse du sol par les plantes ou par les engrais.

Pour cela, on divise le champ d'expérience en un certain nombre de parcelles égales et juxtaposées, par exemple d'un are ou d'un demi-are chacune, et l'on essaye sur la première de l'azote seul (nitrate ou sulfate d'ammoniaque), sur la deuxième de la potasse, sur la troisième de l'acide phosphorique, puis, deux à deux, de l'azote et de la potasse, de l'azote et de l'acide phosphorique, et enfin tous les trois ensemble, azote, potasse et acide phosphorique¹. Au milieu de ces parcelles à engrais variés, on en réserve une ou deux comme témoins, sans rien y mettre. L'état et le poids des récoltes montreront de quels engrais la terre avait besoin.

1. On peut y ajouter des bandes spéciales pour l'essai de la chaux, des sulfates, etc.

Si l'on veut se rendre compte de l'influence des engrais sur différentes récoltes, on peut tracer, en travers des bandes affectées à ces engrais, des bandes perpendiculaires destinées l'une aux pommes de terre ou betteraves, la deuxième au froment, la troisième au trèfle, etc. On forme ainsi une espèce de table de Pythagore dont les produits sont fort intéressants.

Plus les surfaces des champs d'expérience sont grandes, plus les résultats sont considérés comme valables, mais, d'un autre côté, plus il y a de travail pour obtenir des résultats bien exacts en pesant avec soin les récoltes. D'ailleurs, il ne faut pas se faire illusion sur la valeur des résultats obtenus sur de grandes surfaces. Cette valeur n'est réelle que si toutes ces surfaces sont homogènes. Quand il y a dans une ferme différents types de terres, il faut répéter les essais d'engrais analyseurs pour chacun de ces types. Pour reconnaître ces types, l'étude géologique du sol sera très utile.

Tous les cultivateurs ne peuvent pas, surtout dans les pays de petite culture et de petite instruction comme le sont beaucoup de nos départements, faire les essais dont je viens de tracer le plan, quelque simples qu'ils nous paraissent. D'ailleurs, ces essais exigent l'emploi de la balance et un certain temps qui se trouve difficilement à l'époque des foins et de la moisson.

Pour que l'emploi des engrais chimiques se généralise, il faut un intermédiaire entre le fabricant d'engrais et le cultivateur. Cet intermédiaire sera le chimiste directeur de laboratoire agricole ou de *station agronomique*. La station agronomique deviendra pour toutes les applications de la science à l'agriculture : emploi des engrais, rationnement des animaux, choix et perfectionnement des graines, destruction des parasites de toutes sortes qui trop souvent, hélas ! détruisent nos récoltes, drainages, irrigations, etc.,... l'intermédiaire indispensable, comme la pharmacie est l'intermédiaire entre le médecin et le malade.

Or, le directeur de la station agronomique ne pourra donner des avis que s'il provoque et, au besoin, entreprend lui-même des essais d'engrais, comme ceux que je viens de décrire sur les types principaux de terres qui se rencontrent dans sa circonscription, ou s'il a, soit pour les remplacer, soit pour les appuyer, des méthodes d'ana-

lyse assez sûres et assez complètes pour qu'il puisse en déduire des réponses pratiques.

Ces méthodes existent-elles ? Examinons cette question. Nous verrons qu'elle n'est pas étrangère à celle des applications de la géologie à l'agriculture.

§ 2. — Analyse chimique des terres.

M. Paul de Gasparin est le premier chimiste qui a bien compris comment l'analyse des terres devait être conduite et jusqu'où elle devait être portée pour être réellement utile aux cultivateurs. Dans sa *Détermination des terres arables dans le laboratoire*, il a voulu arriver à pouvoir leur dire nettement : « Pour telle terre, achetez tel engrais, les récoltes le paieront bien ; pour telle autre, ce serait une dépense superflue. »

Dans ce but, il a analysé par la même méthode, méthode qu'il a décrite avec beaucoup de détails dans son traité¹, soixante-deux terres sur lesquelles il avait recueilli des renseignements très complets (situation, formation géologique, cultures, engrais qui y réussissent, etc.). Puis, comparant les terres entre elles et avec les données qu'il avait sur les essais d'engrais qu'on y avait faits, il a pu formuler des règles comme les suivantes :

« La minéralisation des engrais par les sels de potasse ne doit être

1. Évidemment on doit, pour les mêmes échantillons de terres, obtenir des dosages très différents, suivant que l'on rapporte les poids déterminés à l'ensemble de l'échantillon ou seulement à la partie fine, suivant la manière dont on détermine cette partie fine, suivant la nature et la force des dissolvants qui servent à l'attaquer, suivant la température à laquelle on les emploie..... Les résultats des analyses ne sont comparables entre eux que si ces analyses ont toutes été dirigées d'après les mêmes principes.

Ainsi, M. Paul de Gasparin, comme M. W. Knop en Allemagne, considère comme inerte et laisse de côté tout ce qui est *pierres* et ne fait porter l'analyse que sur ce qui traverse un tamis métallique à mailles carrées contenant dix fils par centimètre dans les deux sens. L'*analyse physique* distingue dans la portion qui traverse ce tamis le *sable fin* et l'*argile*. Mais M. P. de Gasparin les réunit pour l'*analyse chimique* et, de plus, les porphyrise dans un mortier d'agate jusqu'à ce que le tout passe à travers le tamis de soie. Puis il fait agir les dissolvants. (Voir son traité.)

praticquée que pour des terrains contenant moins de 1 gramme et quart de potasse attaquable par kilogramme, dépourvus de réserves importantes de potasse inattaquable (à l'état de silicates dans les débris de roches feldspathiques, granites, gneiss, etc., etc.) et soustraits à l'action des eaux qui peuvent leur en apporter en les traversant. »

« Un terrain est *très riche* quand il contient plus de deux millièmes d'acide phosphorique. Il est *riche* quand il en contient de un à deux millièmes ; *moyennement riche* quand il en contient de un demi-millième à un millième, et *pauvre* quand il en contient moins de un demi-millième. »

J'ai vérifié moi-même l'exactitude des règles posées par M. Paul de Gasparin, en faisant une cinquantaine d'analyses par ses méthodes et comparant leurs résultats avec ceux de l'emploi des engrais pour les diverses cultures. Dans les argiles glaciaires de la vallée du Rhône, qui contenaient de 0,118 à 0,164 p. 100 de potasse attaquable et 0,054 à 0,070 p. 100 d'acide phosphorique, j'ai trouvé que les engrais potassiques ne servent à rien aux céréales, mais font du bien aux pommes de terre, au trèfle et à la luzerne. Quant aux superphosphates, employés seuls, ils ne montrent sur aucune récolte un effet appréciable. Mais, joints à des nitrates ou à du sulfate d'ammoniaque, ils donnent pour la plupart des récoltes une augmentation plus forte que si les nitrates ou le sulfate d'ammoniaque étaient employés seuls. Ainsi, comme l'a dit M. Paul de Gasparin, un demi à un pour mille d'acide phosphorique est suffisant pour les petites récoltes d'une culture moyennement riche, mais insuffisant pour les récoltes plus fortes que l'adjonction des engrais azotés tend à produire¹.

Dans des terres du département du Nord et du Pas-de-Calais, depuis longtemps fumées au moyen d'engrais flamand, MM. Corenwinde et Contamine ont trouvé en moyenne 1 p. 1000 d'acide phosphorique. Dans certains champs, il y en avait jusqu'à 1,72 p. 1000. Or, pour la culture de la betterave, l'emploi des superphosphates a été reconnu inutile dans toutes les terres qui renfermaient déjà 1 à 1,3 p. 1000 d'acide phosphorique.

1. *Études sur le sol arable.*

§ 3. — Prise des échantillons de terres d'après leur formation géologique.

Mais qu'on ait déterminé une terre arable dans un champ d'essai ou dans le laboratoire, il reste un point très important à établir : Les résultats de cette détermination ne seront-ils valables que pour telle parcelle du cadastre, ou telle ferme, ou telle commune dans laquelle l'échantillon de terre a été recueilli et faudra-t-il la recommencer, avec les mêmes frais, pour toutes les autres parcelles du cadastre ou toutes les autres communes de France ?

Évidemment, la composition chimique d'une terre n'a, de même que ses propriétés physiques, aucun rapport avec la division du territoire en unités cadastrales ou en circonscriptions administratives. Mais la composition chimique et les propriétés physiques d'une terre, par conséquent tous ses caractères agricoles, ont certains rapports naturels avec le mode de formation de cette terre. Dès lors que vous saurez *d'où la terre vient*, vous serez près de savoir *ce qu'elle est*. Si vous aviez pris comme base la division cadastrale, quelle garantie auriez-vous d'ailleurs que la terre serait la même sur toute l'étendue de chaque parcelle ?

Supposez que vous couvriez, comme le prescrivent certains agronomes, la surface que vous voulez étudier, d'un réseau de lignes indépendantes des limites cadastrales, mais qui se coupent à angle droit, et que vous préleviez un échantillon de terre à tous les points d'intersection. Quelque écartement que vous donniez à vos lignes, vous aurez à faire des centaines d'analyses, peut-être des milliers pour un seul département, tandis que, si vous commencez par vous rendre compte de la géologie de ce département, le problème que vous avez à résoudre prendra immédiatement une extrême simplicité. Peut-être reconnaîtrez-vous que, dans ce département, il n'y a que quinze ou vingt types différents de terrains ; peut-être seulement huit ou dix. En analysant des échantillons qui représentent bien chacun de ces types, en les contrôlant par des essais d'engrais chimiques, vous en saurez autant sur les substances que contiennent les terres et sur celles

qu'il faut leur ajouter pour les compléter qu'en faisant au hasard du choix des centaines ou des milliers d'analyses. De plus, vous saurez mieux jusqu'à quelle profondeur cette composition chimique se maintient et quelle est sa différence avec celle du sous-sol. Enfin, vous aurez sur la possibilité d'y trouver des sources, sur la nécessité plus ou moins grande de drainer, sur les moyens les plus économiques de vous procurer de l'eau ou de vous en débarrasser au contraire, des renseignements que les analyses n'auraient pas pu vous procurer.

Ce qu'Élie de Beaumont et Dufrénoy ont dit, dans leur *Introduction* à l'explication de la carte géologique de la France, sur la marche à suivre dans l'étude de la composition minérale de notre sol, peut tout à fait s'appliquer à notre étude agronomique :

« Il semblerait, au premier coup d'œil, que, pour exécuter le meilleur relevé de la composition minérale du sol d'un pays, il n'y aurait rien de mieux à faire que de prendre les plans parcellaires du cadastre, et d'indiquer séparément sur chaque parcelle la composition minéralogique du sol.

« Des observateurs sédentaires établis dans chaque canton, et profitant de toutes les occasions pour reconnaître la composition intérieure du terrain, pourraient, en quelques années, faire ce relevé d'une manière complète.

« Un pareil travail aurait, sans aucun doute, plus d'un genre d'utilité; mais, quelque complet, quelque soigné qu'il pût être, il ne saurait renfermer tout ce qu'on doit désirer en pareille matière, et il serait surtout loin de se trouver en rapport avec les circonstances générales dont nous avons parlé, comme offrant à la fois des points de départ et des moyens de vérification.

« Mais ce travail, purement cadastral, manquerait avant tout de clef, et les recherches qu'on voudrait y faire, soit dans l'intérêt de la science, soit même dans l'intérêt de l'industrie, seraient extrêmement difficiles.

« Ce travail produirait une carte lithologique très exacte et très détaillée; mais cette carte serait un dédale d'indications isolées, d'autant plus confuses qu'elles seraient plus nombreuses.

« On chercherait un fil conducteur pour parcourir ce labyrinthe,

mais on ne le trouverait pas dans le travail lui-même, dont la table des matières ne pourrait se dresser que suivant l'ordre alphabétique des substances ou des localités. Ce fil existerait, il est vrai, dans les rapports entre les formes de la surface et la disposition des grandes masses ; mais ces rapports n'étant pas encore mis en relief, leur détermination exigerait un nouveau travail : ils seraient cachés d'abord au milieu de la confusion des indications, trop nombreuses et trop indépendantes les unes des autres, dont seraient couverts les plans minéralogiques minutieusement exacts dont nous venons de parler ; mais on les verrait se dégager d'eux-mêmes aussitôt qu'on élèverait le travail de détail, exécuté d'abord, au rang de carte géologique, en y indiquant, à côté de la composition absolue de chaque partie, les relations de position et de continuité qu'elle peut offrir.

« Les relations de continuité dont il vient d'être question ne pourraient pas toujours résulter de la simple élaboration du travail de détail le plus minutieusement exact ; souvent elles exigeraient des observations *ad hoc* faites sur le terrain.

« La continuité des grandes masses minérales demande à être étudiée en elle-même, avec une attention soutenue, parce qu'elle s'allie souvent avec une variation progressive dans la nature ou dans la proportion des éléments dont la masse se compose. Il y a là, par conséquent, des rapports particuliers à saisir, une étude spéciale et nouvelle qui ne pourrait être faite avec autant de rigueur par des observateurs sédentaires, dont chacun consacrerait tous ses soins à l'examen d'un canton particulier, que par des voyageurs, qui sans entrer dans tous les détails de la constitution de chaque canton, feraient, de ces rapports de continuité, l'objet spécial de leurs recherches. Les mêmes raisons qui ont conduit à rendre les limites de concession de mines indépendantes de celles des propriétés de la surface, conduisent de même à faire, des contours et de l'enchaînement des masses minérales considérées en grand, un objet d'étude spécial indépendant de la résidence de celui qui s'y livre.

« Ce qu'il y a ici de remarquable, c'est que cette étude en grand, qui seule peut faire distinguer sûrement les masses qui se continuent au loin de celles qui ne sont que subordonnées, n'a nullement besoin d'être précédée par l'étude des détails locaux. Elle peut, et

nous dirons même qu'elle doit marcher la première et rendre l'étude des détails infiniment plus simple et plus facile.

« Il appartient à la géologie, non seulement d'éclaircir, après son exécution, l'immense travail de détail dont nous avons parlé, mais encore de le préparer, et même d'en donner, au besoin, une analyse anticipée.

« Les considérations qui dictent cette manière de procéder sont réellement la clef de ce genre de recherches.

« En effet, les substances minérales qui composent l'écorce du globe terrestre n'y sont pas confondues pêle-mêle, mais s'y trouvent enchaînées les unes aux autres ; et les différents compartiments, à peu près homogènes qu'on y remarque, les *pays* de natures différentes que l'on observe, se lient et s'enchaînent entre eux, suivant des lois régulières, plus simples en grand qu'en petit, susceptibles d'être saisies dans leur ensemble et d'être exposées, relativement à chaque contrée, d'une manière d'autant plus facile à suivre qu'elle sera plus abrégée, qu'elle descendra moins dans les détails locaux, qu'elle s'en tiendra davantage, si l'on peut s'exprimer ainsi, à l'intention générale de la nature dans la distribution des substances minérales, et souvent à la continuité de leurs masses plus encore qu'à leur homogénéité.

« On comprendra facilement, d'après ces remarques, comment l'administration des mines, ayant l'intention de faire exécuter, non seulement une carte géologique générale de la France, mais encore des cartes géologiques spéciales de ses différentes subdivisions, a dû s'occuper d'abord de la carte générale, plutôt que de chercher à l'extraire, par voie de simple réduction, des cartes géologiques de détail. »

§ 4. — Recherche des amendements et engrais.

Réciproquement, si certains terrains manquent de chaux ou d'acide phosphorique ou de potasse, d'autres terrains en contiennent des quantités assez considérables pour en fournir aux premiers. Ce sont

des dépôts de marnes, des mines de phosphates ou de sels de potasse exploitables, au point de vue agricole, comme le sont ailleurs les mines de houille, de fer ou de plomb au point de vue industriel.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'utilité de la géologie pour la recherche de ces dépôts de marnes, de phosphates, etc.; c'est évident.

§ 5. — Recherche des sources et drainage.

La répartition des eaux dépend, comme celle des matières minérales, de la constitution géologique d'une contrée. En réglant leur aménagement suivant les besoins de l'alimentation et de la production agricole, on pourrait doubler la richesse de la France. Or, la géologie seule peut nous diriger dans ce travail; elle seule peut nous indiquer la situation des dépôts de sables, de graviers ou de roches fissurées qui se laissent traverser par les eaux de pluie tombées à leur surface ou des couches d'argiles et de roches imperméables qui tantôt les retiennent, tantôt les amènent à jour en sources plus ou moins volumineuses et plus ou moins régulières.

Certains pays manquent d'eau, par exemple les plateaux de collines jurassiques appelés *les causses* qui s'étendent au sud du massif granitique et volcanique du centre de la France, dans les départements de la Lozère, de l'Aveyron, du Lot, etc. C'est dans le Lot que l'abbé Paramelle fut nommé, en 1818, desservant d'une petite paroisse, Saint-Jean-Lespinasse. « A peine arrivé dans cette localité, raconte-t-il, je fus vivement attristé par les maux sans nombre que causait la disette d'eau. Dans la plupart des communes, me disait-on journellement, tous les habitants sont obligés d'employer, dans les temps les plus précieux, une, deux, trois, quatre ou cinq heures par jour pour aller, avec des barriques, quérir à la rivière l'eau qui est nécessaire à eux et à leurs bestiaux.

« Ceux qui n'ont ni attelage, ni monture, et qui forment la plus grande partie de la population, vont jusqu'à une ou deux lieues chercher l'eau avec des seaux qu'ils portent sur leur tête; d'autres

n'ont pour toute boisson que l'eau bourbeuse et fétide des marcs. En certains endroits, on vend l'eau de rivière de 0 fr. 20 c. à 0 fr. 30 c. le seau, et chaque bête de trait ou de somme en boit pour une douzaine de sous par jour. On voit de temps en temps, au bord des rivières, les brebis qui n'ont pas bu depuis plusieurs jours, les unes se précipiter dans l'eau et s'y noyer, les autres se gorger et périr subitement. A leur retour de la rivière, les bestiaux sont presque aussi altérés qu'ils l'étaient à leur départ. Lorsqu'un incendie se déclare, on n'a aucun moyen d'en arrêter les progrès. Les propriétaires qui ont des citernes sont extrêmement rares, et ils ne peuvent les ouvrir au public qu'en se résignant à manquer eux-mêmes d'eau. Si, dans une commune, il y a un puits qui fournisse de l'eau, ses alentours ressemblent continuellement à un champ de foire.

« Les personnes qui s'y rendent de nuit et de jour, souvent de fort loin, avec leurs troupeaux, sont obligées d'attendre plusieurs heures jusqu'à ce que les premiers venus aient abreuvé leurs troupeaux et rempli leurs barriques.

« En entendant ces doléances et un grand nombre d'autres, qui avaient pour cause le manque d'eau, je me disais souvent : Serait-il possible que Dieu eût abandonné à jamais tant d'infortunées populations aux angoisses de la soif? Ne serait-il pas possible de trouver dans ces malheureuses contrées des sources, fussent-elles très profondes? Muni de quelques notions de géologie, et sachant qu'il tombe autant de pluie sur les terres calcaires que sur les autres, je me mis à parcourir dans tous les sens ces vastes et arides plateaux pour essayer de me rendre compte de ce que pouvaient y devenir les eaux pluviales, et voir si je ne pourrais y découvrir quelque indice de source. »

Après plusieurs années de recherches, le bon abbé réussit enfin à savoir ce que devenaient les eaux de pluies tombées sur ces plateaux arides, et à pouvoir indiquer exactement la direction des ruisseaux souterrains qu'elles forment, ainsi que la profondeur à laquelle on pourrait les trouver. Puis il alla parcourir les départements voisins pour étudier le régime de leurs eaux et indiquer à ceux qui en manquaient les moyens de s'en procurer. Sa réputation se répandit de proche en proche; il fut appelé successivement dans

quarante départements pour y chercher des sources et il réussissait si bien, que les paysans croyaient qu'il avait quelque don surnaturel ou quelque baguette magique qui l'aidait à les trouver. « Ma baguette magique, répondait-il, c'est tout simplement l'observation de la nature, c'est l'étude de la géologie », et parvenu à l'âge de 64 ans, en 1854, il a écrit *l'Art de découvrir les sources*, livre qui contient beaucoup de faits intéressants.

Dans les contrées où les sources sont nombreuses, par exemple dans les contrées granitiques, comme le Morvan, les fermes sont éparses dans la campagne, près de leur fontaine, entourées de leurs champs et de leurs prés.

Dans d'autres, au contraire, par exemple dans la Champagne crayeuse, elles sont agglomérées en gros villages au bord des rivières, et les vallées populeuses sont séparées par d'immenses plateaux qui ressemblent à des déserts, parce que le manque d'eau y rend impossible l'établissement des centres de culture. Les assolements varient avec la distance des villages et, par conséquent, avec celle des cours d'eau. Dans les vallées, ce sont des prairies ou des jardins maraîchers. Sur les premières pentes, un assolement triennal très intensif. Plus loin, un assolement semi-pastoral composé de quelques années de céréales suivies d'un semis d'esparcette qui peu à peu forme pâturage. Puis, au delà, ce sont à perte de vue des *savarts* où les moutons, seuls animaux capables de supporter ces longues courses sans être abreuvés, vont pendant le jour brouter les herbes et reviennent à la nuit parquer sur les jachères.

Non seulement la quantité des eaux, mais aussi leur qualité dépend des formations géologiques qu'elles ont traversées et dans lesquelles elles ont dissous plus ou moins de matières minérales ou organiques. En général, les sources des terrains granitiques sont très pures, excellentes pour les besoins des ménages et de l'industrie. Au contraire, celles des terrains jurassiques sont trop chargées de carbonate de chaux; quelquefois elles en contiennent tellement, qu'elles ont des inconvénients pour l'alimentation du bétail et pour l'irrigation des prés.

Les eaux sont d'autant plus efficaces qu'elles fournissent aux terrains qu'elles irriguent, en quelque sorte comme les engrais com-

plémentaires, les matières minérales qui leur manquent. Ainsi, les sources volcaniques ou jurassiques sont les meilleures pour les sols granitiques et, réciproquement, celles qui ont traversé des couches riches en potasse sont les plus efficaces dans les prairies à fonds de pur calcaire.

Souvent des eaux souterraines apportent aux terrains dans lesquels elles s'épanchent horizontalement ou dans lesquels elles remontent par ascension capillaire des sels de potasse ou de chaux qui contribuent à leur fertilité. Les récoltes contiennent alors des matières minérales que l'analyse du sol lui-même n'avait pas fait prévoir.

Dans les terrains trop humides, les méthodes de *drainage* ne peuvent être à la fois efficaces et économiques que si elles sont basées sur une étude préalable de leur constitution géologique.

Dans les sols qui ne reçoivent que les eaux de pluie tombées directement sur eux et qui sont ou uniformément compacts ou refroidis par un sous-sol partout également imperméable, on a raison d'employer les méthodes régulières mises en vogue par les Anglais, avec drains parallèles et équidistants, tracés suivant la plus grande pente et coupés en travers par les collecteurs.

Mais quand le sol et le sous-sol varient, il faut aussi varier les procédés d'assainissement. On peut quelquefois, en se servant habilement des couches perméables, en faisant des puits perdus ou ce que l'on nomme des *drains verticaux*, trouver des moyens d'écoulement qu'il serait impossible d'obtenir autrement et, dans tous les cas, faire des économies considérables.

Dans certaines formations, par exemple dans les granites, les gneiss, les grès des Vosges, et dans les terrains de transition, etc., les eaux arrivent des coteaux voisins par filets qui suintent de loin en loin sur les pentes et s'accumulent dans les dépressions, formant des *mouilles* au milieu des champs, ou des places marécageuses sur les prairies. Il faut alors les couper au moyen d'un drain de circonvallation assez profond pour atteindre les couches imperméables ou aller à leur rencontre au moyen de coulisses disposées en épi.

Vallès, dans ses Études sur les inondations, admettait que dans les terrains liasiques et primitifs où il n'y a pas d'autre imbibition que

celle qui s'effectue à travers la terre cultivable de la surface, on ne doit pas compter que l'absorption soit plus grande que $1/4$ ou $1/3$ au plus de la pluie. Mais dans les formations naturellement perméables, et dans lesquelles, indépendamment de l'absorption superficielle, les fendillements des roches permettent des infiltrations profondes, la quantité d'eau disparue pourra varier entre les $3/10$ et les $9/10$ de la pluie suivant le degré plus ou moins grand de perméabilité.

Belgrand, le célèbre ingénieur en chef de la ville de Paris, précédemment ingénieur en chef des ponts et chaussées dans le département de l'Yonne, a fait une carte géologique du bassin de la Seine d'après laquelle il indique, pour chacune des formations géologiques qu'on y trouve, le degré de perméabilité et les conséquences qui en résultent pour le régime des cours d'eau, les sections à donner aux ponts construits sur ces cours d'eau, etc... Ainsi, en supposant qu'un cours d'eau *draine* une vallée de 100 kilomètres carrés de superficie, la section du pont qui donne passage aux eaux devra avoir :

Dans le lias.	150 mètres carrés.
Dans les grès verts	40 à 125 mètres carrés.
Dans les granites	50 mètres carrés.
Sur les plateaux tertiaires.	10 à 13 mètres carrés.
Dans l'oolithe moyenne et supérieure . .	3 à 25 —
Dans la craie couronnée de plateaux tertiaires.	3 à 6 —
Dans l'oolithe inférieure	0 mètre carré.
Dans la craie proprement dite	0 —

Plus les formations qui constituent un bassin hydrographique sont imperméables, plus les cours d'eau que ce bassin alimente sont variables et sujets à des crues subites.

Dans leurs plus grandes crues, la Somme, qui s'alimente au milieu de terrains secondaires et tertiaires, roule 90 mètres cubes d'eau, soit $1^m,15$ pour 100 kilomètres carrés, et la Loire, qui sort des massifs granitiques du plateau central, a presque la même masse d'eau pour 1 kilomètre carré de la surface de son bassin. Devant Orléans, le débit de la Loire oscille entre 25 et 10 000 mètres à la seconde, soit de 1 à 400. De là des inondations souvent désastreuses; celle de

1856 a emporté des routes et des ouvrages de défense pour une valeur de 172 millions de francs¹.

Dans le département des Hautes-Alpes, le bassin de la Durance est formé de roches très dures, alternant avec d'autres assises qui se délitent facilement sous l'action des torrents ; on voit d'immenses escarpements qui s'écroulent ou glissent lentement dans les vallées, quand les eaux ont délayé les marnes schisteuses sur lesquelles ils s'appuyaient. Ces éboulements menacent les villages, détruisent leurs cultures, rendent impraticables les routes et les chemins de fer.

A la suite des orages des 25 et 26 octobre 1882, la Durance s'est élevée à une hauteur de 40 centimètres au-dessus des plus hautes crues connues jusqu'à ce jour. D'un autre côté, son étiage a diminué de 80 centimètres, à la prise du canal de Mannoque².

La régularisation des cours d'eau devient donc de plus en plus urgente. Il faut reboiser les montagnes ; il faut faire des bassins de retenue qui serviront en même temps, soit à irriguer des prés, soit à fournir des forces motrices aux usines. L'étude géologique des bassins sera très utile pour déterminer les périmètres des zones de reboisement et les gorges dans lesquelles les barrages pourront être faits le plus utilement et le plus économiquement.

§ 6. — Cartes agronomiques.

On a essayé de faire des cartes agronomiques, distinctes des cartes géologiques.

M. de Caumont, qui en a donné la première idée, a fait celle du département du Calvados. Il y a distingué par une même teinte les régions herbifères et par une autre les régions granifères. Dans ces dernières, des signes particuliers indiquent les assolements suivis

1. Belgrand, *Annales des ponts et chaussées*.

2. Chambrclent, *Fixation des torrents et reboisement des montagnes*, 1883.

et l'élément qui domine dans la composition des terres. Il signale même en marge les races d'animaux domestiques de chaque région.

Dans sa carte agronomique du département de Seine-et-Marne, M. Delesse a mis également de tout. Les teintes y deviennent d'autant plus foncées que le produit net des terres est plus élevé. Mais ce produit net est la résultante de facteurs très divers. La composition chimique des terres, qui est l'un de ces facteurs, est représentée par des chiffres ; mais son élément le plus important, l'acide phosphorique, n'est pas mentionné. Pour tout donner : propriétés physiques des sols, composition chimique, aptitude spéciale pour certaines cultures, assolements, statistique des animaux, etc., etc., il faudrait en quelque sorte représenter par des signes tout un traité d'agriculture sur une même carte ou sur plusieurs cartes pour le même département, comme l'a proposé M. Scipion Gras. C'est impossible ; de plus, tout ce travail ne servirait pas à grand'chose pour les économistes et à rien du tout pour les cultivateurs. En effet, chaque cultivateur s'intéresse surtout à sa terre et ne s'intéresse guère qu'à elle : or, il trouvera toujours insuffisants les renseignements que les cartes pourraient lui donner, d'autant plus qu'il aurait fallu en grande partie les lui demander à lui-même. C'est un cercle vicieux.

§ 7. — Cartes géologiques à grande échelle.

L'expérience acquise dans les essais de cartes agronomiques, dit M. de Lapparent, a démontré que le meilleur travail de ce genre était encore une carte géologique à grande échelle, tant la concordance est parfaite entre la nature du sous-sol et les divisions stratigraphiques qu'on peut y établir¹.

Je suis entièrement de cet avis.

Les ingénieurs distingués du corps des mines, qui avaient été

1. *Traité de géologie*, Introduction.

chargés de ce travail ingrat, nous seront beaucoup plus utiles, en continuant à nous donner d'excellentes cartes géologiques de détail, comme celles qu'ils ont déjà faites pour une partie de la France. Ces cartes sont des chefs-d'œuvre, et les crédits que le Parlement voudra bien accorder au ministère des travaux publics pour en hâter l'achèvement seront payés au centuple par les services qu'elles rendront à l'agriculture. Elles doivent devenir la base des travaux des chimistes et des ingénieurs agricoles, comme des forestiers, qui auront à diriger l'aménagement rationnel des matières minérales et des eaux de la France.

Grâce aux légendes qui les accompagnent, ces cartes sont très faciles à comprendre, à lire, comme on dit. Les dépôts de marnes, de phosphates, de gypse, de cendres pyriteuses, etc., qui peuvent être utilisés comme amendements, les calcaires qui peuvent servir à fabriquer de la chaux maigre ou grasse, les argiles bonnes pour la briqueterie, les roches propres aux constructions ou aux empièvements de routes, etc., sont indiqués avec beaucoup de soin. Les sources, les nappes d'eaux souterraines, qui permettent de faire des puits, le sont également.

Les dépôts de limon quaternaire que l'on trouve épars sur les plateaux secondaires et tertiaires du bassin de la Seine, qui forment, en général, les terres les plus fertiles, mais qui ont besoin d'amendements calcaires, sont figurés partout où ils ont une profondeur assez grande pour que les labours ne les dépassent pas et n'entament pas les couches sur lesquelles ils reposent. Dans les endroits où ce limon est moins épais, la charrue le mélange avec le sous-sol ; mais comme la plupart de ces endroits se trouvent au pourtour des dépôts indiqués sur les cartes, dépôts qui vont en s'amincissant graduellement, les agriculteurs pourront aisément en tenir compte.

Les cartes géologiques de détail signalent même les dépôts meubles sur les pentes. Évidemment, ces dépôts, comme les alluvions que l'on trouve dans le fond des vallées, ont reçu les matériaux dont ils sont composés des coteaux qui les dominent ou qui forment le haut du bassin. Connaissant la composition minéralogique de ces parties élevées, on pourra prévoir jusqu'à un certain point celle des parties basses. D'ailleurs, pour toutes ces terres de transport, l'ana-

lyse devra intervenir pour vérifier la justesse plus ou moins grande des présomptions que fournit l'étude de l'origine de ces terres.

Quant aux terres formées sur place par l'ameublissement et la décomposition du sous-sol, sous l'influence de l'air et de la culture, et elles sont infiniment plus nombreuses que les précédentes, le principal travail des chimistes consistera à prendre une à une les divisions indiquées sur les cartes géologiques de détail pour en faire une étude complète. L'analyse d'un seul échantillon pour chaque division, bien choisi et accompagné de renseignements sur le mode de culture, sur les engrais qui y sont en usage, nous en apprendra, certes, déjà bien plus que des centaines d'analyses d'échantillons pris au hasard, sans classification géologique. Mais cependant on fera bien de ne pas s'en tenir là : toujours guidé par ce que les géologues nous ont appris sur l'origine et la formation de ces dépôts, on prendra pour chacun d'eux des échantillons sur différents points, et il est probable que, si la nature des terres diffère d'une localité à l'autre, elle ne varie que dans certaines limites qui pourront être indiquées et qu'elle conserve partout certains caractères généraux¹. On prendra également sur le même point des échantillons à diverses profondeurs, afin de pouvoir comparer le sous-sol avec la couche végétale ou arable.

Si l'on peut joindre à ces analyses des essais méthodiques d'engrais et de culture dans chacun de ces étages géologiques, sa monographie deviendra d'autant plus complète, et l'on pourra donner aux cultivateurs qui l'exploitent des règles précises sur ce qu'ils doivent y faire.

Dans les leçons qui vont suivre, j'ai cherché à réunir tous les documents que j'ai pu me procurer sur les caractères agricoles des diverses formations géologiques en France et dans quelques-uns des autres pays les plus intéressants par leur économie rurale. J'ai employé à ce travail trente années de voyages, de recherches et d'expériences faites dans mes cultures et dans mon laboratoire. Malgré ces efforts, je sais que mon livre reste encore bien incomplet. J'ai peut-être

1. Ordinairement ces variations sont très faibles, souvent elles sont nulles sur une même feuille des cartes géologiques à grande échelle.

voulu trop embrasser, en décrivant toutes les régions agricoles de la France et des pays voisins. Mais il fallait commencer par tracer, dans leurs grandes lignes, les rapports entre les formations géologiques et les systèmes de culture et chercher à bien prouver qu'ils sont assez nets pour que la géologie puisse devenir la base de l'agrogologie. Quand cette démonstration sera acceptée comme suffisante, les études de détail se feront peu à peu, à mesure que les cartes géologiques à grande échelle seront achevées pour le reste de la France et que les directeurs de stations agronomiques voudront bien entrer dans la voie que je leur indique, en prenant ces cartes pour cadres de leurs recherches. Les monographies spéciales des diverses formations viendront ou compléter, ou sans doute souvent corriger, ce que j'en dis aujourd'hui. L'essentiel, c'est qu'il y ait désormais un plan d'ensemble dans l'étude de notre sol arable.

§ 8. — Plan de l'ouvrage.

Dès lors que je rejetais les cartes agronomiques et que je prenais comme base de cette étude les cartes géologiques, je devais également adopter la classification des traités de géologie¹. J'ai pris comme modèle celle du *Traité de géologie* de M. A. de Lapparent², dont la publication a été terminée récemment. Je renvoie à cet

1. Dans son *Traité élémentaire de géologie agricole*, M. Scipion Gras a adopté comme divisions principales : 1^o terrains agricoles à sol végétal *indépendant* ou formés de matières de transport ; et 2^o terrains agricoles à sol végétal *autochtone* ou originaire du sous-sol ; puis chacune de ces deux divisions comprend un certain nombre de classes, chacune de ces classes un certain nombre de genres qui diffèrent par la composition minéralogique du sous-sol, et enfin chacun de ces genres un certain nombre d'espèces qui diffèrent par la nature du sol. Ce n'est que dans les lieux cités comme exemple de ces espèces que l'on retrouve les divisions géologiques, et ces lieux sont la plupart très bien décrits, tellement bien que les dernières sous-divisions en espèces se montrent beaucoup plus caractéristiques que les divisions principales et les classes. Il est regrettable que M. Scipion Gras, géologue très distingué, n'ait pas choisi la classification géologique. Son livre y aurait beaucoup gagné comme clarté, même pour les agriculteurs.

2. Publié chez F. Savy, 77, boulevard Saint-Germain, à Paris. 1883.

excellent livre les lecteurs qui voudront avoir des renseignements plus complets sur la géologie pure.

Comme c'est l'affaire des géologues et non celle des agriculteurs de déterminer les diverses formations, ces derniers n'ont pas besoin d'avoir fait des études très approfondies de minéralogie et de paléontologie. Pour pouvoir se servir des cartes géologiques et reconnaître les terrains qui y sont indiquées, il suffit qu'ils connaissent les principaux minéraux et les fossiles les plus caractéristiques.

D'après cela, je n'ai donné, dans l'histoire et la description des terrains, que ce qui peut les éclairer sur la formation du sol arable, ses propriétés physiques et sa composition chimique. J'ai cité toutes les analyses bien faites que j'ai réussi à découvrir. Malheureusement, le nombre de ces analyses *bien faites* est encore très restreint. Pour certains terrains, il n'y en a pas du tout. Tantôt l'endroit où l'échantillon avait été pris n'a pas été assez nettement défini, tantôt l'analyse n'a pas distingué les éléments qui sont encore engagés dans des combinaisons complètement insolubles et ceux qui se dissolvent dans tel acide ou tel autre : elle a confondu le capital inerte que renferme le sol avec les intérêts qu'il doit rapporter chaque année, en fournissant aux plantes une nourriture assimilable ; tantôt encore l'acide phosphorique n'a pas été dosé, ou la potasse n'a pas été séparée de la soude qui joue un rôle presque nul dans l'alimentation des végétaux que nous cultivons.

J'ai cherché à reproduire également les résultats des essais d'engrais chimiques qui ont été faits à l'appui de ces analyses.

Quant aux amendements qui sont en usage depuis longtemps, aux systèmes de culture qui sont pratiqués, aux méthodes de drainage et d'irrigation, aux plantations forestières, aux races de bétail, etc., j'ai tâché de réunir tous les documents qui peuvent servir à caractériser les divers terrains.

On trouvera peut-être même que j'ai fait trop de citations. Il eût été facile d'éviter ce reproche. Mais, dans un livre destiné à établir sur des bases solides les rapports qui unissent la géologie à l'agriculture, j'ai cru devoir m'appuyer, non seulement sur l'autorité des hommes de science qui avaient commencé à fournir des matériaux pour ce rapprochement, mais sur celle des hommes de pratique

agricole qui, sans avoir aucune notion de géologie, avaient, à force d'exactitude dans leurs observations et de clarté dans leurs descriptions, contribué à établir ces rapports. On aurait pu m'accuser d'être trop systématique ou d'avoir un parti pris d'avance. A coup sûr, on ne pourra pas en accuser ces collaborateurs involontaires qui avaient fait de la géologie agricole sans le savoir et sans *la* savoir.

Pour les terrains les plus importants, j'ai indiqué quelques-uns des agriculteurs qui ont le mieux su les utiliser, principalement ceux qui ont obtenu les primes d'honneur dans les concours régionaux. Guidés par les cartes géologiques, les cultivateurs pourront ainsi connaître les méthodes d'exploitation qui ont le mieux réussi dans les terres analogues aux leurs, soit en France, soit dans les pays voisins.

Ainsi, les propriétaires bretons pourront aller voir comment les habitants de l'île de Jersey ont amélioré des terres granitiques ou siluriennes qui ont tout à fait la même origine et les mêmes caractères que les leurs.

Les Champenois apprendront peut-être avec étonnement ce que leurs confrères de l'Artois, de la Flandre ou du sud de l'Angleterre ont su faire des sols crayeux.

Les Lorrains s'obstinent à faire du blé dans les marnes du lias ; ce blé leur coûte très cher et ne peut pas supporter la concurrence de ceux d'Amérique, puisqu'il faut, pour le produire, préparer les terres par une jachère qu'on laboure trois fois avec des charrues attelées de quatre bêtes. Ils feraient bien mieux de laisser pousser cette mauvaise herbe qu'ils cherchent en vain à détruire ; ils devraient, au contraire, l'aider à pousser et en semer davantage ; ils obtiendraient ainsi, comme dans le Charolais et le Nivernais, de riches herbages et leur agriculture, au lieu de souffrir, serait prospère !

On trouve, dans toutes sortes de formations, des terres trop sèches et trop pauvres pour que la culture arable puisse y devenir profitable ; quand elles sont éloignées des villages, elles ne valent que 100 ou 150 fr. l'hectare, comme certains *savarts* de craie ou de calcaire jurassique dans la Marne, l'Aube ou la Côte-d'Or ; mais

allez voir les mêmes terres dans les montagnes du Jura ; elles portent des futaies splendides ; pourquoi n'y plantez-vous pas du bois ? Ce seraient des placements à 8 ou 10 p. 100, comme l'ont prouvé, dans ces départements mêmes, quelques propriétaires intelligents.

Évidemment, il faudra qu'en imitant ces méthodes, on tienne compte des différences de climat et de conditions économiques. Je n'avais à m'en occuper que d'une manière tout à fait accessoire : ce sont des questions de météorologie et d'économie rurale qui n'ont que des rapports indirects avec l'étude des sols.

Plus la population est dense et concentrée sur certains points, plus l'agriculture des zones qui entourent ces centres de consommation peut et doit devenir *intensive*, c'est-à-dire appliquer sur une certaine surface de sol une grande somme de travail et de capitaux. Par conséquent, plus la population est nombreuse, plus le travail de l'homme tend à modifier la nature et à effacer ses caractères primitifs. Il ne réussit cependant jamais à les effacer complètement, car le travail lui-même, pour être fructueux, doit varier avec les conditions naturelles où il s'exerce. Quand elles sont drainées, les terres fortes ressemblent davantage aux terres légères. Quand elles sont bien fumées, les terres pauvres ressemblent davantage aux terres naturellement fertiles. Mais les procédés de drainage et les engrais employés doivent varier avec la nature de ces terres.

Du reste, quand le perfectionnement des moyens de transport et d'échange appelle de nouveaux concurrents sur ce marché restreint dont les terres les plus rapprochées avaient en quelque sorte le monopole, il se produit une crise économique qui doit aboutir à une transformation dans les systèmes de culture.

Il y a, au grand profit des consommateurs, une concurrence constante entre le travail employé à produire dans le voisinage des grands centres de population les denrées dont ils ont besoin, et le travail employé à amener ces mêmes denrées des contrées lointaines où la terre est encore à bon marché. Les premières ont à supporter plus de frais de production, les deuxièmes plus de frais de transport. Il faut que, des deux parts, la somme des frais de production et de transport reste égale. Or, dès que les frais de trans-

port diminuent pour les blés qui arrivent d'Amérique, il faut absolument qu'on arrive à diminuer les frais de production pour ceux qui se récoltent en Europe.

Comment y arriver ?

En employant tous les procédés mécaniques et chimiques que la science moderne offre à l'agriculture, et surtout en spécialisant les productions suivant les aptitudes naturelles des climats et des sols. Il faut augmenter les prairies, les herbages et les fourrages temporaires partout où ils ont des chances de succès. Il faut consacrer à la production des bois toutes les terres trop ingrates pour celle des céréales.

Après avoir consacré quelques millions d'hectares à la production des fourrages et des bois qui augmentent de valeur et qui exigent peu de travail, on aura plus d'engrais, tout en ayant à cultiver une surface moins grande en céréales. On obtiendra ainsi un produit brut plus considérable sans accroissement de frais correspondant : avec une moyenne de 2 ou 3 hectolitres de blé en plus par hectare, on abaissera son prix de revient au point de pouvoir lutter sans crainte contre la concurrence américaine.

Quelles sont ces terres ? On peut les indiquer avec une grande précision d'après les formations géologiques.
