



Peut-on dépasser le pluralisme en écologie par la modélisation ?

Hendrik Davi
sous la direction de Stéphanie Ruphy



**Mémoire de Master II
de Philosophie, Université d'Aix Marseille
2012**

Spécialité Philosophie analytique et Epistémologie

Remerciements : *Je tiens d'abord à remercier Stéphanie Ruphy qui m'a encadré, a su m'orienter dans ce sujet et m'a pousser à clarifier ma pensée (parfois bien obscure). Je remercie aussi Gabriella Crocco qui m'a initié à la philosophie de Gödel et à accepter d'examiner ce mémoire. Je remercie François Lefèvre, le directeur de l'URFM sans qui ce projet de formation n'aurait pas pu avoir lieu et Sylvie Oddou qui a patiemment su m'initier à la génétique des populations et à l'évolution. Enfin je remercie Carole pour m'avoir supporté durant cette année bien remplie.*

PREAMBULE.....	5
1. UNE EPISTEMOLOGIE NATURALISTE	5
2. COMMENT ROMPRE LA CIRCULARITE QU'IMPLIQUE UNE EPISTEMOLOGIE NATURALISTE	6
3. UNE EPISTEMOLOGIE NATURALISTE PERD-ELLE LE PROJET D'UNE VISION GNERIQUE DE LA CONNAISSANCE ?	8
4. DE LA PSYCHOLOGIE A LA SOCIOLOGIE	8
5. DONNEES EXPERIMENTALES, OBSERVATIONS ET THEORIE	12
6. EPISTEMOLOGIE ET METAPHYSIQUE NATURALISTE	15
7. CONCLUSION DE CE PREAMBULE	19
INTRODUCTION.....	21
PLURALISME ET ECOLOGIE.....	30
1. UNE BREVE HISTOIRE DE L'ECOLOGIE	30
1.1. L'ECOLOGIE COMME MOUVEMENT DE PENSEE	30
1.2. L'ECOLOGIE COMME SCIENCE	31
2. PLURALISME ET MONISME DANS L'HISTOIRE DE L'ECOLOGIE	33
2.1. LE CHAPITRE XIV DES «ENIGMES DE L'UNIVERS » DE ERNST HAECKEL	33
2.2. PLURALISME ET MONISME DANS LA CONTROVERSE ENTRE CLEMENTS ET GLEASON	38
2.3. LE PLURALISME EN ECOLOGIE PAR MC INTOSH.....	40
2.4. INTEGRATION SANS UNIFICATION?.....	42
3. SYNTHESE : REFORMULATION D'UNE THESE MONISTE	43
3.1. LA THESE PHILOSOPHIQUE DU PLURALISME SCIENTIFIQUE	44
3.2. LA PLURALITE DES BUTS DE L'ECOLOGIE SCIENTIFIQUE	46
3.3. UNITE ET PLURALITE DES POINTS DE VUE EN ECOLOGIE	51
3.4. UNITE LINGUISTIQUE.....	65
3.5. PLURALITE DES METHODES DE L'ECOLOGIE.....	68
3.6. UNITE EPISTEMOLOGIQUE ET REDUCTIONNISME.....	77
3.7. LES PARADOXES PRODUITS PAR LA QUESTION ONTOLOGIQUE.....	84
3.8. CONCLUSION PROVISOIRE : LE PARI D'UN MONISME HEURISTIQUE, LA RECONNAISSANCE DE PLURALITES IRREDUCTIBLES	86
LA MODELISATION UNIFICATRICE OU PRODUCTRICE DE PLURALITES ?	89
1. LA MODELISATION MATHEMATIQUE, CANDIDAT NATUREL A L'UNIFICATION	89
1.1 UNE PREMIERE DEFINITION DE LA MODELISATION	89
1.2 PROCESSUS D'ABSTRACTION, D'IDEALISATION ET MODELISATION	92
1.3 LA MODELISATION COMME VECTEUR D'UNE UNITE LINGUISTIQUE ET SOCIOLOGIQUE	95
2. L'INTENTION MODELISATRICE PRODUCTRICE DE PLURALITES.....	98
2.1. L'INTENTIONNALITE SOURCE DE PLURALITES.....	98
2.2. PLURALITE ET UNITE DANS LA DIALECTIQUE	100
2.3. SYNTHESE, ANALYSE, EXPERIENCE.....	104
2.4. L'INTENTIONNALITE DANS LE CHAMP SCIENTIFIQUE ET FALSIFICATION DES MODELES.....	107
2.5. CONCLUSION APORETIQUE.....	110
3. TYPOLOGIE DES MODELES EN ECOLOGIE.....	110
3.1. MODELES PHENOMELOGIQUES STATISTIQUES	111
3.2. MODELES THEORIQUES	113
3.3. MODELES DE SIMULATIONS.....	117
3.4. FAUT-IL SACRIFIER UN TYPE D'UNIFICATION?	126
4. LE PROBLEME DE LA REFERENCE DES TERMES IMPLIQUES DANS LES MODELES	129
4.1. LA REFERENCE CHEZ FREGE, GÖDEL ET PUTNAM	129
4.2. LA QUESTION DE LA REFERENCE DANS DIFFERENTS TYPES DE MODELE EN ECOLOGIE	133
4.3. IMPLICATIONS SUR L'UNIFICATION NOMOLOGIQUE ET PHENOMENOLOGIQUE.....	136

5. L'ESPACE LOGIQUE COMME LIEU D'UNIFICATION.....	138
5.1 TEXTURE PROBABLE DU MONDE.....	138
5.2 NATURE DE L'ESPACE LOGIQUE IDEELLE.....	140
5.3 CONCLUSIONS SUR LES POSSIBILITES D'UNIFICATION EN SCIENCE	143
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>145</u>
RESUME DES OBJECTIFS ET DES RESULTATS.....	145
COMMENT CONCILIER LE CARACTERE INTENTIONNEL DE LA MODELISATION ET L'UNIFICATION	
ONTOLOGIQUE?	145
COMMENT RELIER L'UNIFICATION NOMOLOGIQUE A L'UNIFICATION ONTOLOGIQUE DES	
PHENOMENES ?	146
ELEMENTS DE DISCUSSION.....	147
PERSPECTIVES.....	149
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>151</u>
<u>INDEX DES TABLES.....</u>	<u>156</u>
<u>INDEX DES FIGURES.....</u>	<u>156</u>

Préambule

Tout travail intellectuel visant à expliquer la structure du monde suit une certaine méthode et relève d'un certain point de vue sur le monde. Dans ce préambule, je vais donc d'abord essayer de clarifier mon intention et la méthodologie que je vais suivre avant d'examiner plus en détail en introduction le problème philosophique que je vais étudier.

1. Une épistémologie naturaliste

Etant chercheur en Ecologie forestière dans un institut de recherche appliquée (l'INRA : l'institut National de Recherches Agronomiques), il est assez naturel pour moi de partir des problèmes concrets auxquels la recherche agronomique et forestière fait face. En partant de la science telle qu'elle se fait réellement, j'adopte en fait une position qui en soi n'est pas neutre, c'est celle d'une épistémologie naturaliste. Je la définis comme l'étude par la philosophie du savoir scientifique et de sa genèse concrète.

Le terme d'épistémologie naturalisée, qui diffère de l'épistémologie naturaliste (nous y reviendrons), a été d'abord utilisé par Willard van Orman Quine. Dans un article de 1969, il explique ce projet qui représente un tournant dans sa philosophie. Il le définit de la façon suivante (Quine, 1969):

« Mieux vaut découvrir comment la science se développe et s'apprend en réalité, que d'inventer une structure fictive dans la même intention ». p46.

Ce constat rejoint celui qu'exprime Thomas Kuhn (1962) qui place l'historiographie au cœur de la recherche en épistémologie :

« Si la science est l'ensemble des faits, théories et méthodes rassemblés dans les ouvrages courants, alors les savants sont les hommes qui, avec ou sans succès, se sont efforcés d'ajouter tel ou tel élément à cet ensemble particulier. Le développement scientifique devient le processus fragmentaire par lequel ses éléments ont été ajoutés, séparément ou en combinaison, au fonds commun en continuelle croissance qui constitue la technique et la connaissance scientifiques. Et l'histoire de la science est la discipline qui retrace à la fois ses apports successifs et les obstacles qui ont gêné leur accumulation » p18

Kuhn montre notamment pourquoi il existe des moments où l'accumulation des connaissances n'est pas constante et son analyse ouvre une recherche précise et quasi naturaliste des conditions de développement de telle ou telle découverte scientifique.

On retrouve aussi l'importance d'une historiographie bien documentée chez Alexandre Koyré (1973). Pour ce dernier, le travail d'historien et de philosophe a trois bases essentielles : (1) il existe une unité de la pensée humaine, (2) même si il existe des évolutions et des changements importants, l'évolution est graduelle et complexe, (3) l'étude fine de l'histoire des sciences permet de démystifier certaines classifications ou catégorisations qui seraient trop hâtives ou trop simplistes.

Mais revenons à Quine, l'épistémologie, selon lui, est donc restée trop longtemps à distance des processus réels de fabrication de la science. Dans ce travail, j'ai donc fait le choix de me placer explicitement dans la filiation de ce constat en partant d'une analyse précise d'une discipline scientifique l'écologie et d'une pratique scientifique qui s'est largement développé ces dernières années : la modélisation. Evidemment la mise en équations de lois de la nature et les prédictions mathématiques qu'elles permettent, dépend aussi de l'observation et de l'expérimentation. Nous serons donc aussi obligés de les traiter. Au cœur de ma démarche, il y a donc une volonté de coller aux problèmes spécifiques auxquels la science contemporaine est confrontée et de les analyser d'abord en utilisant un point de vue local : l'utilisation de la modélisation en Ecologie.

Précisons que cette épistémologie naturaliste telle que je la conçois demeure une recherche philosophique qui utilise une démarche propre à la philosophie (i.e vision réflexive ayant vocation à donner un point de vue globale et potentiellement normatif), mais qui tient compte des faits concernant la marche de la science. Il ne s'agit donc pas de développer une nouvelle science sorte de science de la science, qui prendrait la science pour objet avec des méthodes scientifiques. Ce point de vue s'éloigne donc de certaines interprétations de l'épistémologie naturalisée. En effet comme le remarquent Bouvier & Conein (2007) :

« Malgré la simplicité apparente du conseil (de Quine cité plus haut), des interprétations fort sensiblement différentes peuvent être données de la signification de ce tournant naturaliste, à certains égards bien équivoque. Dans ces versions extrêmes ou radicales (...) ce mouvement propose de résorber purement et simplement la théorie de la connaissance dans la psychologie de la connaissance et la sociologie de la connaissance » p11.

Pour cette raison, j'utiliserais en ce qui me concerne le terme d'épistémologie naturaliste, pour marquer la différence vis à vis d'une épistémologie naturalisée et donc vidée de sa composante philosophique et réduite aux sciences humaines. Mais ce choix d'une épistémologie naturaliste peut faire l'objet de deux principales objections.

2. Comment rompre la circularité qu'implique une épistémologie naturaliste

La première objection concerne le problème d'auto-application ou de réflexivité. En effet, une épistémologie naturaliste utilise des connaissances issues d'autres sciences humaines comme la psychologie, la linguistique, la sociologie ou l'économie pour comprendre le développement concret de la science. De ce fait ses conclusions éventuellement normatives sur la science dépendent d'une portion de la science elle-même. L'épistémologie perdrait ainsi son indépendance vis à vis de son objet, ce qui pourrait rendre caduque ces conclusions. Quine (1969) l'exprime de cette façon :

« Se décharger ainsi du fardeau épistémologique sur la psychologie est une opération qu'au temps jadis on ne tolérait pas, pour cause de raisonnement circulaire ». p43

Cette critique logique est d'autant plus justifiée lorsqu'on souhaite naturaliser l'épistémologie au point d'en faire une science. Mais dans la version modérée de cette

naturalisation, qui naturalise l'objet mais pas la méthode d'étude, cette circularité s'exprime quand même. C'est le point de départ de Husserl (1907) pour expliquer la nécessité de construire une phénoménologie méthodologiquement indépendante de la science. Dans ces cinq leçons sur la phénoménologie, Husserl recherche une base solide sur laquelle édifier une nouvelle théorie de la connaissance. Selon lui cette fondation ne peut pas venir de la science elle-même telle qu'elle se pratique (Husserl 1907).

« On ne voit pas comment un recours à des présuppositions qui seraient empruntées à la connaissance naturelle, aussi « exactement démontrées », qu'elles soient en elle, puisse nous aider à dissiper les doutes soulevés par la critique de la connaissance et à répondre à ces problèmes. » p48.

La phénoménologie me semble avoir échoué sur ce point et je rejoins Quine (1953) sur sa conclusion pratique contre cette objection, quand il emprunte à Neurath sa métaphore :

« Neurath a eu raison de comparer la tâche du philosophe à celle d'un marin qui doit réparer son bateau en pleine mer. Nous pouvons améliorer morceau par morceau notre schème conceptuel, notre philosophie, tout en continuant d'en dépendre de manière vitale, mais nous ne pouvons pas nous en détacher et le comparer objectivement avec une réalité non conceptualisée » p121-122.

Nous n'avons pas le choix, nous devons comprendre la science avec la science elle-même telle qu'elle se fabrique. Je pense que la circularité peut être rompue si on ne conçoit pas le dialogue entre science et épistémologie de façon statique mais sous un angle dynamique. Il existe une dialectique entre l'observation de la science avec des outils scientifiques, la synthèse de ses observations, leur interprétation par l'épistémologie, et la modification de la pratique de la science.

Ce raisonnement rejoint en partie la méthode d'Edgar Morin (1977). Il explique en prélude de son œuvre, qu'il existe une boucle ou un cercle vicieux qu'il ne faut pas rompre et qu'il est même absolument nécessaire d'étudier. L'anthropologie a des bases matérielles dans la biologie (comportement de l'homme) et dans la physique (ressources naturelles et climat). Mais notre étude des systèmes biologiques et physiques est conditionnée par notre façon de penser. Pour Morin, le problème de la science moderne est précisément le deuil imposé d'une réponse globale à ce cercle. Il reconnaît qu'aucune réponse globale n'est évidemment possible ni sous forme de connaissances encyclopédiques ni sous forme d'une méthodologie unificatrice, car selon lui ces réponses globales dénaturent la complexité du réel. Par contre, on peut et on doit étudier les points d'articulation entre les éléments du cercle.

Par ailleurs, un autre élément de réponse à cette objection est donné par les sciences humaines elles-mêmes. En effet, elles subissent en leur sein ce problème d'autoréflexivité, le psychologue a une psychologie et le sociologue appartient à un groupe social déterminé. En sciences humaines comme en épistémologie la résolution de ce paradoxe de l'objet, étant sujet et objet en même temps, réside dans l'utilisation de méthodes appropriées (mettant le sujet à distance) et une pratique intersubjective multipliant les points de vue.

3. Une épistémologie naturaliste perd-elle le projet d'une vision générique de la connaissance ?

La seconde objection concerne le caractère générique des conclusions d'une épistémologie naturaliste. Si nous analysons concrètement le développement de la science, nous sommes obligés de nous focaliser sur un secteur particulier de la science au risque de perdre les logiques d'ensemble. En effet, comprendre l'histoire de la relativité générale ou celle de la physique quantique pourrait aboutir à des conclusions opposées concernant les rôles respectifs de la théorie et de l'observation¹. Face à cette objection, il est possible de multiplier des cas d'études dans différentes disciplines. La philosophie peut s'inspirer de la façon dont la science organise l'étude des processus du monde naturel. Elle tend à l'étudier sous tous ses aspects en s'efforçant d'en oublier aucun. Ernst Mayr un des pères de la théorie synthétique de l'évolution, a écrit dans son histoire de la biologie (Mayr 1982) qu'un des problèmes de l'épistémologie est qu'elle s'est focalisée sur la physique et les mathématiques. Pour éviter de tomber dans une vision locale de la science, une épistémologie naturaliste doit prendre pour objet de réflexion en priorité les pratiques de la science et les disciplines qui sont sous-étudiées.

De plus, de mauvaises conclusions obtenues à partir d'une épistémologie naturaliste, traitant une question locale, peuvent être évitées si on en surinterprète pas les résultats, ce qui hélas est souvent le cas quand une étude particulière vise seulement à conforter un présupposée épistémique. Comme nous avons tous ce type de présupposés (qui constituent l'arrière-plan de nos pensées), la seule façon de se prémunir contre de telles erreurs en science comme en épistémologie est donc de multiplier les points de vue et d'affiner la rigueur de nos inductions.

4. De la psychologie à la sociologie

« Contrairement aux autres animaux sociaux, les hommes ne se contentent pas de vivre en société, ils produisent de la société pour vivre ; au cours de leur existence ils inventent de nouvelles manières de penser et d'agir sur eux-mêmes comme sur la nature qui les entoure » Godelier 1984, p9.

Dans la méthode que je vais suivre, je ne partage pas une série de conclusions de Quine. Je vais aussi détailler ces points de divergence, cette prise de distance avec sa vision de l'épistémologie naturalisée permettra en creux de continuer à dessiner l'approche que je compte développer.

D'abord, Quine (1969) se tourne explicitement vers la psychologie comme science connexe qui par excellence peut éclairer la démarche scientifique.

« La stimulation de ses récepteurs sensoriels est toute la preuve sur quoi quiconque peut en fin de compte, s'appuyer pour élaborer sa représentation du monde. Pourquoi

¹ Et encore Arthur Fine (1984) n'est pas de cet avis car la théorie de la relativité doit aussi beaucoup au positivisme du jeune Einstein fortement influencé par Ernst Mach.

ne pas simplement se borner à voir comment procède réellement cette construction? Pourquoi ne pas se tourner vers la psychologie? ». p43

A priori ce choix paraît relever du bon sens, car la science est une activité intellectuelle qui établit des vérités sur la structure du monde à partir de la collecte de données. Il semble évident que la manière dont sont collectées ces données et comment elles sont agencées dans notre entendement peut être éclairée par les acquis scientifiques de la psychologie.

Locke a parfaitement commencé ce travail qui a été poursuivi par le courant empiriste. Le matériel de base de notre connaissance, sont pour Locke, les idées simples (Locke 1690). Elles viennent, explique Locke, de deux sources la réflexion et la sensation. Sensation et réflexion composent respectivement notre expérience interne et externe. La sensation est la perception par nos sens de la qualité des objets. Cette sensation englobe donc perception plus abstraction, il n'y a pas de réception purement neutre. Ensuite elle produit des idées sensibles. La réflexion est une autre forme de perception mais cette fois ci portée « *sur les opérations de l'esprit lui-même* ». Comme c'est la perception d'opérations de l'esprit, il faut bien opérer sur quelque chose, donc au commencement il y a forcément d'abord de la sensation. Cela introduit une certaine asymétrie entre sensation et réflexion mais du point de vue d'une idée simple donnée à un moment particulier, la réflexion est une source originelle à valeur égale de la sensation.

Kant, dans l'esthétique transcendantale (Kant 1787), a raffiné l'analyse en y ajoutant le rôle prépondérant du temps et de l'espace qui structurent notre intuition des objets.

« L'espace est une représentation nécessaire a priori qui sert de fondements à toutes mes représentations extérieures » p56.

Il a aussi montré comment les catégories de l'entendement (miroir des catégories de jugements) structurent la façon dont ses objets sont appréhendés par notre cerveau.

Table 1: Les catégories de l'entendement de Kant

Titres	Moments		
Quantité	Unité	Pluralité	Totalité
Qualité	Réalité	Négation	Limitation
Relation	Inhérence et subsistance	Causalité et dépendance	Communauté (actif-passif)
Modalité	Possibilité-impossibilité	Existence-non existence	Nécessité-contingence

Son génie a été de montrer en quoi l'existence de ces catégories produisaient du transcendantal c'est à dire des connaissances nécessaires. Gilles Deleuze (1963) l'exprime ainsi dans son ouvrage sur Kant :

« L'idée fondamentale de ce que Kant appelle sa révolution copernicienne consiste en ceci: substituer l'idée d'une harmonie entre le sujet et l'objet, le principe d'une soumission nécessaire de l'objet au sujet. La découverte essentielle est que la faculté de connaître est législatrice ». p22-23.

Le caractère nécessaire de la science selon Kant ne provient donc pas des objets mais de notre entendement. Pour le comprendre, l'exemple de la géométrie est utile, c'est une construction logique qui établit des lois *a priori* donc qui ont un pouvoir législateur. Finalement, on peut dire que la géométrie explicite des lois sur l'organisation de l'espace, et exprime d'une certaine façon les règles de fonctionnement de notre intuition spatiale des objets.

Mais aujourd'hui, il est nécessaire d'ajouter deux dimensions à ces schémas passés : l'historicité de la construction des catégories de l'entendement et l'inconscient.

En effet, si la genèse des idées provient essentiellement d'une expérience individuelle, celle-ci s'inscrit dans l'histoire d'un individu lui-même surdéterminé par l'histoire du groupe social auquel il appartient. Une idée émerge car elle est sélectionnée au sein d'un pool d'idées. Comprendre la place de cette historicisation passe par l'analyse de mécanismes divers comme les moyens de reproduction des différentes idéologies des groupes sociaux auxquels l'individu appartient. Friedman (2002) a repris la notion d'impératifs catégoriques de Kant en l'historicisant. Il explique dans son article que la non révisabilité des impératifs catégoriques a été abandonnée avec la géométrie non euclidienne et la théorie de la relativité. Ces deux révolutions invalident la vision kantienne du temps et de l'espace. Le rôle de tribunal qu'avait la raison semble transférer durablement à un tribunal de l'expérience, toute connaissance théorique étant susceptible de révision. Mais Friedman propose une autre solution que celle qu'a donnée Quine dans l'article *Two Dogmas of Empiricism*. Rappelons que Quine (1951), a abandonné toute distinction nette entre connaissance empirique et connaissance rationnelle et par extension entre la synthèse et analyse (distinction que maintient par contre Carnap). Le système de connaissances qui prévaut alors chez Quine est une chaîne de croyances interconnectées, avec un cœur théorique moins facilement révisable et une périphérie expérimentale. Friedman explique qu'il existe une autre solution:

*« Quine's attack on the analytic/synthetic distinction—and thus on Carnap's particular version of the distinction between a priori and empirical principles—is now widely accepted, and I have no desire to defend Carnap's particular way of articulating this distinction here. I do want to question, however, whether Quinean epistemological holism is really our only option, and whether, in particular, it in fact represents our best way of coming to terms with the revolutionary changes in the historical development of the sciences that are now often taken to support it ».*p7

Je reviendrais plus loin sur la solution de Friedman. Je ne doute pas que les récentes recherches sur le fonctionnement du cerveau (notamment sur ce qui concerne le concept de plasticité cérébrale) permettrait d'affiner encore plus notre compréhension du fonctionnement de l'entendement et des rôles respectifs de la structure du cerveau et de nos sensations.

Mais je n'irais pas plus loin dans cette analyse, car suivant les intuitions de Pierre Bourdieu, je pense que pour comprendre la science, il faut aussi prendre un point de vue sociologique. Si l'on regarde comment la science du XXI^{ème} siècle se déroule, il paraît évident que ce n'est pas une pratique individuelle qui ne dépend que de la psychologie humaine, mais une pratique collective. Parcourons la vie d'un

scientifique. Au départ, il acquiert un corpus de savoir durant son parcours universitaire. Ensuite au cours du doctorat, il apprend la pratique de la recherche à partir d'une question scientifique spécifique définie en amont par un collectif (l'équipe ou le laboratoire) qui est l'expression d'une tradition de recherches. Souvent le doctorant utilise des techniques mathématiques ou des appareils qui ont été conçus par les générations précédentes de chercheurs et qui lui sont transmises par ses pairs. Les articles que le doctorant publie ensuite sont soumis à une revue scientifique qui a un comité éditorial et dispose d'un pool de relecteurs qui vont juger de la qualité et de la pertinence de l'article.

Bourdieu compare le fonctionnement de la science à un champ et il montre que l'établissement des vérités est dû au fonctionnement spécifique des champs que constituent chacune des disciplines scientifiques (Bourdieu 2001) :

«Le sujet de la science est un non un collectif intégré (...), mais un champ et un champ tout a fait singulier, dans lequel les rapports de force et de lutte entre les agents et les institutions sont soumis aux lois spécifiques (dialogiques et argumentatives) découlant des deux propriétés fondamentales, étroitement liées entre elles, la fermeture (ou la concurrence des pairs) et l'arbitrage du réel (...). La logique elle-même, la nécessité logique est la norme sociale d'une catégorie particulière d'univers sociaux, les champs scientifiques, et elle s'exerce à travers des contraintes (notamment les censures) socialement instituées dans cet univers.» p138

La spécificité de la démarche scientifique et ce qui fait son caractère objectif ont aussi été pointé par Karl Popper. Dans son essai intitulé « *Les deux visages du sens commun* » (Popper, 1979), il fait une critique radicale de la théorie de la connaissance selon le sens commun. Il y critique la vision d'une connaissance scientifique assimilée à la connaissance subjective que l'on a du monde extérieur dont la thèse importante issue de l'empirisme est « *que toute connaissance consiste en une information reçue par l'intermédiaire de nos sens ; autrement dit par l'expérience* » (Popper, 1979), p121. Sa critique vise à montrer qu'il existe une connaissance objective et il parle explicitement d'épistémologie évolutionniste (Popper, 1979) :

« La différence entre l'amibe et Einstein, c'est que, bien que tous deux fassent usage de la méthode d'essai et élimination de l'erreur, l'amibe déteste l'erreur tandis que celle-ci intrigue Einstein : il mène une recherche consciente de ses erreurs dans l'espoir d'apprendre quelque chose par leur découverte et leur élimination. La méthode de la science est la méthode critique. (...). Par conséquent, le développement de toute connaissance consiste dans la modification d'une connaissance antérieure » p133.

Néanmoins pour Popper les idées directrices de l'épistémologie sont logiques et non factuelles ou historiques, ce qui le distingue d'autres épistémologues évolutionnistes. Mais il reconnaît que les recherches ayant trait à la genèse de la science (le point de vue factuel et historique) fournissent nombre de ses problèmes à résoudre.

Si on déroule l'analogie évolutionniste, l'établissement de faits scientifiques de vérissimilitudes² croissantes est la conséquence d'un processus évolutif similaire à la sélection naturelle. Les théories et explications du monde qui sont fausses sont petit à petit éliminées par la multiplication des points de vue (observations ou expérimentations) sur un phénomène. Ce processus est évidemment complexe et tendanciel comme il n'y a aucune adaptation absolue d'un organisme à un environnement, il n'y a jamais une parfaite représentation des structures du monde dans nos théories. Ce sont toujours des approximations. Donc comprendre, à la fois comment la science établit des vérités (ce que Quine appelle les recherches doctrinales) et comment elle a accès à la structure du monde (ce que Quine appelle les recherches conceptuelles), relève plus de la compréhension du fonctionnement du 3^{ème} monde de Popper. Il me semble que la science connexe la mieux placée pour le comprendre est la sociologie et non la psychologie. En effet, la sédimentation des connaissances dans le monde 3 (rédaction de livres de synthèse ou de manuels scolaires), la mise en pratique de la critique collective (relecture des articles par ses pairs) ou l'orientation des recherches au sein d'un paradigme (programme de recherche), sont des processus socialement construits.

Néanmoins, la psychologie peut nous éclairer au moins sur deux points. D'abord, certains processus psychologiques permettent de comprendre certains faits sociaux impliqués dans la production de connaissances. Par exemple, la question de la confiance épistémique dans l'autorité d'un pair (testimony) ou celle des rapports de pouvoir présents dans le champ scientifique, se situe à l'interface entre psychologie et sociologie. D'autre part, comme je travaillerais plus explicitement sur la modélisation, les processus d'idéation et d'abstraction du réel devront être regardés.

5. Données expérimentales, observations et théorie

Le second point sur lequel je ne rejoins pas la vision de l'épistémologie de Quine en 1969, c'est le privilège épistémique attribuée aux données sensibles et au mode d'inférence que constitue l'induction, qui caractérisent le courant empiriste.

Quine écrit (1969) :

« Exactement comme les mathématiques sont réductibles à la logique ou la logique et à la théorie des ensembles, le savoir de la nature doit reposer de quelque manière sur l'expérience des sens. Cela signifie que l'on expliquera la notion de corps en terme sensoriel et qu'on justifiera notre connaissance des vérités de la nature en terme sensoriel ». p38

Aujourd'hui il semble évident que les observations des scientifiques s'éloignent de plus en plus des données sensibles. Ian Hacking (1981) a montré que les images données par exemple par un microscope ne correspondaient pas directement à l'objet visé car il existe des artefacts. Le débat n'est donc plus entre données sensibles et théorie, mais entre données issues de l'expérimentation ou de l'observation et déductions théoriques.

² Le concept de vérissimilitude pose néanmoins des problèmes épistémiques irrésolus

Encore une fois, si l'on analyse comment la science se fait réellement on voit bien que la mystique du pouvoir des données observationnelles du fait de leur proximité aux données sensorielles est battue en brèche. D'abord, la science est aujourd'hui le lieu d'une division du travail. Même si les chercheurs font parfois encore des observations ou des expérimentations, celles-ci en réalité sont le plus souvent réalisées soit par des techniciens, soit par des étudiants, voir même dans le cadre de la science participative, par des citoyens. De ce fait, le lien entre l'observation, l'analyse de données et la rédaction des résultats est distendu. Ce fait est loin d'être nouveau et la découverte de la sélection naturelle par Darwin doit au moins autant à son analyse des données des éleveurs anglais de Pigeons, qu'à son voyage sur les îles Galapagos. Ce lien entre données observationnelles et établissement de faits scientifiques est aussi mis à mal par l'accroissement des outils scientifiques. Les données brutes sont rarement analysées telles quelles, elles font l'objet d'analyses scientifiques qui embarquent de fortes composantes de théories.

Enfin, de nombreuses théories spéculatives ont montré leur fertilité et ont été validées seulement de façon ad-hoc par des expérimentations ou des observations. Le concept de gène et les lois qui régissent leur transmission sont découverts bien avant de connaître le support physique (l'ADN) de l'information génétique. On peut y voir une sorte de miracle des théories mathématisées³. Si les théories ne disaient pas plus de la structure du monde que ce que les données empiriques ayant servi à leur établissement en disent, ce miracle demeurerait un mystère. D'autre part, la connaissance théorique n'a jamais eu autant d'importance en science notamment par le biais de la programmation informatique et des modèles de simulations permettant de prédire l'évolution des systèmes. Nous le verrons par la suite, expliquer ce « miracle » est essentiel pour voir s'il est fondé ou non de faire des prédictions.

Théories, expérimentations et observations sont par conséquent intimement reliés, comme l'expliquait déjà Claude Bernard, donc donner une préférence épistémique à l'observation semble être une impasse.

« Nous avons dit (...) qu'au point de vue du raisonnement expérimental les mots observation et expérience pris dans un sens abstrait signifient, le premier, la constatation pure et simple d'un fait, le second le contrôle d'une idée par un fait (...). La simple constatation des faits ne pourra jamais parvenir à constituer une science (...). Une fois le fait constaté et le phénomène bien observé, l'idée arrive, le raisonnement intervient et l'expérimentateur apparaît pour interpréter le phénomène. L'expérimentateur est celui qui en vertu d'une interprétation plus ou moins probable, mais anticipée des phénomènes observés institue l'expérience de manière que, dans l'ordre logique de ces prévisions, elle fournisse un résultat qui serve de contrôle à l'hypothèse ou à l'idée préconçue (...). Le savant complet est celui qui embrasse à la fois la théorie et la pratique expérimentale. 1° il constate un fait ; 2° à propos de ce fait, une idée naît dans son esprit ; 3° en vue de cette idée, il raisonne, institue une expérience, en imagine et en réalise les conditions matérielles. 4° De cette expérience résultent de nouveaux phénomènes qu'il faut observer et ainsi de suite ». p45-52

³ L'argument du miracle est au cœur du débat entre réaliste et antiréaliste.

Sous-estimer l'importance épistémique de la théorie notamment quand on formule un test d'hypothèse, c'est par exemple nier toute l'histoire des statistiques et donc nier la façon concrète avec laquelle les scientifiques ont justement analysé les résultats issus d'observations ou d'expérimentations. Rappelons les fondements du test d'hypothèse. D'une manière générale, on émet une hypothèse à tester ou hypothèse nulle (H_0), on transpose l'hypothèse verbale en modèle mathématique :

Coefficient de corrélation=0

On construit H_1 l'hypothèse alternative et sa traduction mathématique

Coefficient de corrélation $\neq 0$

On mesure ensuite l'écart entre ce qui est supposé sous H_0 et observé à l'aide d'une statistique de test et on calcule la probabilité de l'observer. Si cette probabilité est relativement élevée, on considère l'hypothèse émise au départ comme plausible et on l'accepte au moins provisoirement. Par contre si cette probabilité est faible et plus précisément inférieure à un niveau de signification préalablement fixé par le chercheur (α), l'écart observé apparaît comme peu compatible avec l'hypothèse nulle et on rejette celle-ci. On admet alors implicitement la validité d'une hypothèse alternative H_1 . Un test d'hypothèse constitue donc une sorte de démonstration par l'absurde. Souvent l'hypothèse que l'on veut tester n'est pas quantifiable alors que l'hypothèse contraire l'est. Pour accepter une proposition non quantifiable, « l'astuce » est de rejeter une proposition qui est quantifiable. Ce court rappel des fondements statistiques démontre parfaitement comment l'analyse même des données issues de l'observation dépend structurellement de choix du chercheur (ce qui implique une intentionnalité) et d'un arrière-plan théorique. Les faits sont chargés de théorie. Tout préférence épistémique donnée à la connaissance empirique d'une part et au mode d'inférence inductif d'autre part me semble injustifié.

Un empiriste pourrait rétorquer qu'en fait toute théorie provient d'observations de faits passés, ce qui justifierait *in fine* leur plus grande valeurs épistémiques par comparaison à la connaissance théorique. En cela il n'aurait pas tort, car effectivement sauf à croire en une théologie révélée, une idée qui dit quelque chose de vrai sur le monde provient probablement de l'observation de faits passés. Mais ce faisant on sous-estime la spécificité de l'idéal qui est un mélange d'observations sédimentées dans nos pensées collectives au cours de l'histoire et d'intentionnalité qui correspond à la volonté qu'a l'homme de comprendre le monde qui l'entoure pour agir sur lui. La séparation entre l'idéal et le matériel est par ailleurs assez factice comme l'explique l'anthropologue Maurice Godelier dans l'avant-propos de son ouvrage *L'idéal et le matériel* :

« (...) nulle action matérielle de l'homme sur la nature, entendons nulle action intentionnelle, voulue par lui, ne peut s'accomplir sans mettre en œuvre dès son commencement dans l'intention des réalités idéelles, des représentations des jugements, des principes de la pensée(...). Au cœur des rapports matériels de l'homme avec la nature apparaît une part idéelle où s'exercent et se mêlent trois

fonctions de la pensée : représenter, organiser et légitimer les rapports des hommes entre eux et avec la nature ». p21

6. Epistémologie et métaphysique naturaliste

« La science manipule les choses et renonce à les habiter »

Merleau-Ponty : *L'œil et l'Esprit*, p1

Le dernier point sur lequel je diverge avec la philosophie de Quine concerne le rôle de l'épistémologie vis à vis de la science et la place de la métaphysique. La métaphysique se définit comme une branche de la philosophie (et de la théologie) qui porte sur la recherche des causes, des premiers principes. La rupture de la science et de la métaphysique a lieu au cours du siècle des lumières. Mais cette rupture, il me semble, comporte au moins trois facettes qu'il convient de distinguer.

La première concerne le fait que des connaissances théoriques révélées ne doivent pas surdéterminer ce que nous « disent » les faits et les observations. C'est un rejet de la scolastique et de son rationalisme (la vérité étant recherchée par la seule déduction logique en faisant fi des observations), qui dans certains de ces aspects a plongé la pensée dans l'obscurantisme⁴. Ernst Mayr (1982) raille que durant cette période : *« Quand une controverse s'élevait pour savoir combien de dents a un cheval, on retournait aux textes d'Aristote plutôt que de regarder dans la bouche d'un de ces animaux ».*p138

Le second aspect de cette guerre contre la métaphysique conteste l'utilité de l'usage de certains concepts comme celui de cause, de possibilité ou d'être. Enfin la dernière facette nie la possibilité de réponses ultimes et globales concernant l'organisation du monde.

Dans son introduction sur l'article de Quine, Sandra Laugier (2004) conclut :

« En délogeant l'épistémologie de son vieux statut de philosophie première et en la purgeant de ses derniers résidus de kantisme, Quine achève, contre l'empirisme même, le programme de l'empirisme ». p34

Le positivisme logique du cercle de Vienne a été une des dernières étapes dans le renoncement à une certaine métaphysique. Ian Hacking (1989) a ainsi résumé les positions du cercle de Vienne : par-delà leur divergence ces philosophes étaient (i) pro-observations, les données issues des sens étant le seul véritable fondement possible de toutes nos connaissances, (ii) vérificationnistes, seules les propositions qui peuvent être vérifiées ont une utilité épistémique, (iii) anti-cause, il n'existe dans la nature que des enchaînements constants, (iv) minimisant le rôle de l'explication et (v) antiréalistes rejetant l'existence des entités inobservables.

⁴ Néanmoins dans son histoire de la pensée scientifique, Koyré en donne une vision moins caricaturale.

Ce rejet de la métaphysique est plus ancien. Il a pour origine la rupture des lumières. Diderot en donne une expression littéraire éloquente dans *Les bijoux indiscrets* (Diderot 1748):

Lors de son rêve Mangogul, rentre dans un « édifice suspendu comme par enchantement » et rencontre Platon au milieu de « vieillards, ou bouffis, ou fluets, sans embonpoint et sans force et presque tous contrefaits » qui est occupé à souffler des bulles qu'observent scrupuleusement ces chétifs spectateurs. Platon explique qu'il est dans « la région des hypothèses » et que « Socrate mourut, et les beaux jours de la philosophie passèrent ». Alors Mangogul entrevoit alors « dans l'éloignement un enfant qui marchait vers nous à pas lents mais assurés. Il avait la tête petite, le corps menu, les bras faibles et les jambes courtes ; mais tous ses membres grossissaient et s'allongeaient à mesure qu'il s'avancait. Dans le progrès de ses accroissements successifs, il m'apparut sous cent formes diverses ; je le vis diriger vers le ciel un long télescope, estimer à l'aide d'un pendule la chute des corps, constater avec un tube rempli de mercure la pesanteur de l'air, et, le prisme à la main, décomposer la lumière. C'était alors un énorme colosse ; sa tête touchait aux cieux, ses pieds se perdaient dans l'abîme et ses bras s'étendaient de l'un à l'autre pôle. Il secouait de la main droite un flambeau dont la lumière se répandait au loin dans les airs, éclairait au fond des eaux et pénétrait dans les entrailles de la terre.

- Quelle est, demandai-je à Platon, cette figure gigantesque qui vient à nous ? »
- Reconnaissez l'Expérience, me répondit-il ; c'est elle-même. " " À peine m'eut-il fait cette courte réponse, que je vis l'Expérience approcher et les colonnes du portique des hypothèses chanceler, ses voûtes s'affaïsser et son pavé s'entrouvrir sous nos pieds. » p113.

L'idée sous-jacente est que l'expérience et l'observation remplacent la métaphysique de la scholastique et permettent de progresser sur le chemin sûr de la science. Ce bannissement, voir la négation de la région des hypothèses va être théorisé de plus en plus fortement par les philosophes. Auguste Comte donne une vision structurée de ce projet positiviste en décrivant trois états (Comte 1830):

« Chacune de nos conceptions principales, chaque branche de nos connaissances, passe successivement par trois états théoriques différents : l'état théologique, ou fictif; l'état métaphysique, ou abstrait; l'état scientifique, ou positif. » p22-23

Chacun de ces états est décrit de la façon suivante :

« Dans **l'état théologique**, l'esprit humain, dirigeant essentiellement ses recherches vers la nature intime des êtres, les causes premières et finales de tous les effets qui le frappent, en un mot vers les connaissances absolues, se représente les phénomènes comme produits par l'action directe et continue d'agents surnaturels plus ou moins nombreux, dont l'intervention arbitraire explique toutes les anomalies apparentes de l'univers ». p22-23

« Dans **l'état métaphysique**, qui n'est au fond qu'une simple modification générale du premier, les agents surnaturels sont remplacés par des forces abstraites, véritables entités (abstractions personnifiées) inhérentes aux divers êtres du monde, et conçues comme capables d'engendrer par elles-mêmes tous les phénomènes observés, dont l'explication consiste alors à assigner pour chacun l'entité correspondante » p22-23

« Enfin, dans **l'état positif**, l'esprit humain reconnaissant l'impossibilité d'obtenir des notions absolues, renonce à chercher l'origine et la destination de l'univers, et à connaître les causes intimes des phénomènes, pour s'attacher uniquement à découvrir, par l'usage bien combiné du raisonnement et de l'observation, leurs lois effectives, c'est-à-dire leurs relations invariables de succession et de similitude » p22-23

Ce renoncement à connaître les causes intimes des phénomènes associés au développement au XX^{ème} siècle d'une science de plus en plus spécialisée et compartimentée a mis en difficulté l'idée d'une science unifiée capable d'expliquer le monde dans sa totalité. Certains philosophes, qui ont défendu le positivisme logique au sein du cercle de Vienne ont comme Rudolf Carnap défendu une unité de la science autour d'une unité linguistique. L'aboutissement du projet de Carnap aurait été de démontrer la possibilité de transformer toute assertion théorique en assertion observationnelle et ainsi de fonder la science de bas en haut par une réductions aux observables à tous les niveaux. Quine apparaît encore nostalgique de ce projet qui fut celui de Carnap dans son ouvrage « *la structure logique du monde* »

« Néanmoins, deux principes fondamentaux de l'empirisme restaient hors de contestation, et ils le sont encore aujourd'hui. L'un est que toute preuve qu'il peut y avoir de la science est d'ordre sensorielle. L'autre est que toute injection de signification dans les mots doit en fin de compte reposer sur des preuves sensorielles. D'où la séduction opiniâtre qu'exerce l'idée d'un logisher aufbau qui mettrait en avant explicitement le contenu sensoriel du discours » p43.

Le projet de Carnap a été un échec comme Carnap lui-même le reconnut notamment car les propriétés dispositionnelles (être solubles), embarquent de fait un contenu intentionnel (le scientifique qui manipule un objet) et ne peuvent pas être traduits strictement en langage observationnel. Mais Quine n'abandonne pas complètement le projet anti-métaphysique, il le reformule dans une vision holiste de ce qu'il appelle une « *phrase d'observation* » :

« Il est donc évident qu'il nous faut desserrer notre définition de phrase d'observation de façon à libeller ainsi une phrase d'observation si tous les verdicts sur elle dépendent de la stimulation sensorielle contemporaine, mais d'aucune information emmagasinée, hormis celle qui contribue à la compréhension de cette phrase ». p55.

Le projet du cercle de Vienne n'était pas de fonder la science à partir des pratiques réelles des scientifiques. Par contre, une épistémologie naturaliste se doit de regarder ce que la science telle qu'elle se fait, nous dit de la métaphysique. Or le fonctionnement réel de la science montre que certains aspects de la métaphysique n'ont jamais été bannis. En effet, si la surdétermination des faits à une vérité révélée a été abandonnée avec la « mort » de dieu, ni certains concepts comme ceux de cause ou d'être, ni la volonté de comprendre les causes intimes des faits, ont été en fait abandonnés par les scientifiques. Le préjugé pro-observation et anti métaphysique qui renoncent au causalisme comme au réalisme des concepts est pour le moins à questionner.

La métaphysique, prise comme information emmagasinée, contribuant à la compréhension d'une phrase d'observations réapparaît dans la pratique scientifique à plusieurs niveaux. D'abord, un scientifique est membre de plusieurs communautés : il travaille dans un laboratoire porteur d'une tradition de recherche au sein d'une discipline scientifique, il habite un pays qui est caractérisée par une culture et une langue, il appartient à une classe sociale et parfois il a même une foi religieuse. Toutes ces appartenances font qu'il travaille avec ce qu'Helen Longino appelle un arrière-plan intellectuel hérité de la société dans laquelle il vit. Les penseurs marxistes, comme Richard Levins et Richard Lewontin suivant l'analyse de Marx dans l'Idéologie Allemande montrent que cette arrière-plan appelé par eux idéologie n'est pas neutre et qu'elle est l'expression de rapports de force entre les classes d'une société. Dans leur ouvrage « the dialectical biologist » ils analysent comment au cours de l'histoire, différents concepts de l'écologie ont eu leur heure de gloire : la notion d'évolution au XIX^{ème} siècle, celle d'homéostasie (théorie de l'équilibre) pendant les trente glorieuses et celle de plasticité et d'adaptation depuis l'avènement de la pensée néolibérale. Les concepts d'une époque dénotent une certaine réalité mais aussi sont l'expression d'un certain climat conceptuel bien plus large que le champ scientifique lui-même.

Cet arrière-plan ne modifie pas toujours l'accumulation du contenu observationnel, mais il impacte fortement le cours du développement scientifique. Si je prends une acception large de la métaphysique comme étant toute conception idéologique qui n'est pas déduite des observations mais qui pourtant a des implications majeures sur la façon dont nous faisons de la science, alors même si la métaphysique devait être bannie, de fait elle ne l'est pas. Certes la perméabilité des scientifiques à l'arrière-plan et aux contingences idéologiques ou économiques peut être structurellement accrue ou diminuée selon le type de société et le niveau d'indépendance qu'elle accorde au chercheur. Le poids de l'idéologie est sûrement plus fort dans une dictature comme le cas Lyssenko le montre ou quand la science dépend trop économiquement de l'industrie.

Mais je pense que l'existence d'une « imprégnation métaphysique » dans le travail scientifique révèle aussi une dimension anthropologique. Il existe un gouffre entre l'objet et le sujet et ce gouffre ne peut être comblé que dans un mouvement intentionnel. L'étude d'un objet suit toujours une motivation psychologique (pouvoir sur la chose) ou sociologique (utilité de la chose pour le groupe social) qui s'exprime dans une intention. Le point de vue qu'un scientifique porte sur l'objet de son étude est donc forcément conditionné par le contexte intentionnel. C'est ce contexte intentionnel qui embarque avec lui une part de métaphysique. La façon dont un scientifique choisit l'hypothèse qu'il veut tester, ou la manière dont il construit un modèle statistique constitue une chaîne intentionnelle, qui n'est pas forcément fondée que sur des raisons rationnelles. Ce contexte est éminemment complexe et peut difficilement être totalement explicité, mais il me semble plus judicieux de clarifier le contexte intentionnel et l'arrière-plan idéologique que de faire mine qu'il n'existe pas. En ce sens, une épistémologie naturaliste se doit de mettre en lumière le rôle de ce contexte dans la genèse des travaux scientifiques, mais aussi de montrer comment l'activité scientifique est un processus social, qui réussit ce miracle d'établir des vérissimilitudes.

Donc la métaphysique au sens de croyances ou d'idées préconçues embarquées dans les théories conceptuelles est inévitable dans le cours de la science comme dans toute pratique humaine. Mais il est possible que cette part « intentionnelle » soit ce qui fait aussi le succès de la science. L'intention est ce qui permet au scientifique de se déplacer dans un espace logique du possible et donc de prédire l'évolution des systèmes au-delà des observations. Ce qui fait la grandeur de l'expérimentation ce n'est pas seulement la part observationnelle comme semble le suggérer Diderot mais aussi la part de théorie. Le biologiste imagine une explication et une série de causalités, ce qui est éminemment métaphysique pour les positivistes et en déduit une expérimentation pour tester cette chaîne de causalité. Je reviendrais beaucoup plus longuement sur ce point précis en utilisant la philosophie de Leibnitz et de Gödel et l'exemple concret des modèles en Ecologie.

Il ne s'agit évidemment pas de contester l'importance de l'observation et le rôle de ce que Bourdieu appelle le « principe de réalité ». Mais pour comprendre le rôle de la théorie, il faut revenir d'une certaine manière à la métaphysique. Il est probable que le désir de se débarrasser de Dieu et donc de la métaphysique a conduit à trop tordre le bâton dans l'autre sens. Mais ce retour ne doit pas se faire en partant de la métaphysique pour aller vers l'explication des faits scientifiques, mais par un mouvement dialectique entre faits scientifiques, épistémologie naturaliste et compréhension du rôle de la métaphysique. Si on suppose une certaine unité du monde, ce cheminement permettrait d'aboutir à une métaphysique naturalisée qui donne une image globale de la structure du monde. Cela redonnerait aussi à la philosophie une place spécifique vis à vis des sciences particulières. Elle pourrait de nouveau prétendre à donner une vue d'ensemble des connaissances scientifiques et de leurs implications anthropologiques, jouant un rôle unificateur et généalogique.

Ce regard critique sur le déroulement de la science peut ensuite conduire à dépasser le rôle de seul spectateur pour être acteur et producteur de normes quant à la conduite de la science. Cela rejoint assez fortement la conception développée par Friedman (Friedman 2002). A partir d'une analyse des révolutions qu'ont opérées Newton puis Einstein, et suivant la pensée de Kuhn sur l'existence et le rôle des paradigmes scientifiques, Friedman propose un schéma à trois niveaux. Le premier niveau est celui des connaissances qui font face au tribunal des expériences. Le second niveau rassemble les principes *a priori* qui contextualisent les théories scientifiques. Enfin, le troisième niveau concerne les conceptions philosophiques, ou métaparadigmes, sur lesquelles repose l'ensemble de nos connaissances. Tous ces niveaux sont révisables, mais nos connaissances ont toujours des fondations, ce qui réconcilie l'exigence de fondations et le caractère dynamique de ces fondations qui interagissent dialectiquement avec le reste des connaissances. Cela donne une place spécifique à la philosophie comme outil critique des métaparadigmes (Friedman 2002) :

« And it is at this point, moreover, that philosophy plays its own distinctive role, not so much in justifying or securing a new paradigm where empirical evidence cannot yet do so, but rather in guiding the articulation of the new space of possibilities and making the serious consideration of the new paradigm a rational and responsible option » p20.

7. Conclusion de ce préambule

Nous approfondirons au cours de ce travail deux pistes: comment mieux organiser la multiplication des différents points de vue sur un sujet ? Quelle métaphysique naturaliste peut nous aider à faciliter la synthèse de ces points de vue ?

Je vais conclure en expliquant pourquoi il m'est apparu nécessaire de commencer par dresser ce tableau d'ensemble. La spécificité de la philosophie est de plonger celui qui écrit dans un abyme de miroirs autoréflexifs. Le sujet qui pense est perpétuellement ramené à son existence et à sa pratique en tant que sujet. Cela peut singulièrement ralentir le cours de la pensée, mais cela rend possible une certaine transparence du sujet vis à vis de lui même et limite les mécanismes de duperie de soi. Si un enjeu essentiel d'une épistémologie naturalisée est de comprendre comment le scientifique produit de la connaissance à partir du fonctionnement de la psychologie des individus et la mécanique des groupes sociaux, une première étape d'un épistémologue est de lui-même faire état de l'arrière-plan à partir duquel il travaille. Cet arrière-plan est précisément ce qui manque souvent à un article scientifique pour juger réellement des présupposées embarquées dans le travail du scientifique.

Avant donc d'entamer une analyse d'une discipline scientifique, l'écologie, par le prisme de deux problèmes philosophiques qui la concernent: la question du pluralisme et le rôle que peuvent jouer les modèles pour résorber ou non ce pluralisme, il me semblait nécessaire de donner un résumé de l'arrière-plan de mon analyse. Cela m'a permis au passage de positionner le travail au cœur de quelques-uns des débats contemporains de la philosophie.

Pour résumer, l'arrière-plan qui est le mien au départ de ce travail, je pense que les pratiques scientifiques sont complexes et que si l'on veut comprendre ce qui fait la spécificité de la science, les raisons de ses succès comme les origines de ses limites, il faut développer une épistémologie naturaliste qui étudie concrètement les processus de production et de reproduction des idées scientifiques. Le second parti pris est que je ne pense pas que la spécificité de la science réside dans un mode particulier de conduite individuelle. Les scientifiques sont finalement des hommes et des femmes comme les autres, ils ont autant de névroses que n'importe qui, et ils sont soumis aux mêmes contingences sociales et individuelles. Le succès de la science ne semble pas pouvoir s'expliquer par une certaine attitude pro-observation. Pour comprendre « le succès » de la science, il me semble qu'il faut analyser en détails les processus sociaux qui sont à l'œuvre dans cette pratique et voir pourquoi elle établit des vérissimilitudes en dépit ou à l'aide d'un arrière-plan ou méta-paradigme de nature quasi métaphysique.

Introduction

« Que veux-tu dire par là Zénon ? Si les choses sont plusieurs, il s'ensuit dis-tu, qu'elles ne peuvent manquer d'être à la fois semblables et dissemblables, ce qui évidemment est impossible ». Platon, Parménide 127e

Le monde se donne à voir au scientifique comme à tout être humain par une succession de faits. Chaque fait correspond à un phénomène observé à un moment donné et à un endroit précis. Le fait est en soi un processus ponctuel unique qui est donc déterminé spatialement et temporellement. Mais pour agir sur le monde, l'homme a eu besoin de mettre en lumière certaines régularités sous ses enchaînements de faits. Organiser ces régularités c'est subsumer les faits sous l'unité de certaines formes. Socrate résout ainsi le paradoxe de Xénon cité ci-dessus par le concept de Ressemblance (Platon, Parménide):

« Ne partages-tu pas ses convictions : il y a une forme en soi de la Ressemblance ; une telle forme a son contraire ce qu'est la dissemblance ; les choses dont nous disons qu'elles sont multiples, moi toi ou autre chose, participent à ces deux formes qui sont véritablement; et c'est parce qu'elles participent à la Ressemblance et dans la mesure où elles en participent que les choses qui participent à la ressemblance sont semblables, tandis que les choses qui participent à la Dissemblance sont dissemblables, et que celles qui participent aux deux formes sont à la fois semblables et dissemblables » Parménide, 129ab

Chaque fait ou chaque entité sont à la fois semblable à un-e autre sous un certain point de vue et dissemblable sous un autre point de vue. La science a été une entreprise collective efficace de dévoilement des régularités dans le monde, qui ont ainsi été subsumées sous des principes unifiant de plus en plus englobant, c'est à dire rendant compte d'une classe de plus en plus étendue de faits. Mais ce travail d'unification de notre compréhension du monde soulève plusieurs problèmes philosophiques qui sont demeurés vivaces du passé hellénique à nos jours.

La première série de questions a trait à la capacité de ces unifications à rendre effectivement compte des faits. D'abord, toute unification d'une pluralité de faits sous une loi unique entraîne une négation d'une partie de la pluralité qui s'exprime dans les faits. Lorsqu'un écologue réalise un modèle linéaire qui vise à expliquer les variations d'une variable Y par une combinaison linéaire des variations de facteurs Xi, cette partie oubliée de la pluralité se loge dans ce que l'on appelle les résidus. Il existe donc un équilibre entre unité et proximité avec la réalité. Plus l'unification est large, plus on s'éloigne des faits particuliers, ce qu'explique parfaitement Margaret Morrison (2007) :

« And to the extent that unification relies on mathematical structures, (...) it becomes easy to see how explanatory detail is sacrificed for the kind of generality an abstraction that facilitate unification » p5

La dimension heuristique de l'unification des faits au sein des formes platoniciennes ou plus tard des lois a donc souvent été questionnée. C'est ce qui peut faire dire à Nancy Cartwright (1980) que les lois physiques mentent, car à proprement parler elles

n'énoncent pas des faits, c'est ce qui se cache derrière l'usage du *ceteris paribus* (toute chose étant égale par ailleurs).

« Une fois qu'on a préfixé le modificateur ceteris paribus, la loi de la gravité cesse d'être pertinente pour les situations plus complexes et plus intéressantes » p215.

La loi vise à expliquer comment le monde fonctionne car nous avons tendance à voir chaque fait comme la conséquence d'une conjonction de phénomènes suivant différentes lois, ce qui se traduit par exemple par l'usage de l'addition vectorielle pour les différentes forces. Or selon Cartwright, la nature ne connaît pas l'addition vectorielle qui caractérise toute la mécanique, de la même manière pour suivre une direction Nord-Est, le plus court chemin n'est pas d'abord d'aller vers le Nord puis vers l'Est. Pour Cartwright, il existe donc une sorte de contradiction entre le pouvoir explicatif qui requiert une décomposition en forces distinctes et le contenu factuel qui semble indiquer une irréductibilité de la force composite.

La seconde série de problèmes concerne l'ontologie des formes ainsi constituées par le processus d'abstraction qui conduit à unifier une série de faits ou entités sous une même forme. Dans le cadre des classifications du monde naturel, quelle est la nature ontologique d'une espèce donnée d'arbre comme le Hêtre? Concernant les lois quelle est la nature des forces comme la sélection naturelle? Le processus d'abstraction produit des nouvelles formes dont la nature ontologique semble indéterminée, mais pire elle dissout l'ontologie des êtres dont on pensait être assuré de l'existence. En effet, un arbre devant moi n'est plus seulement un arbre, il est une portion de la Ressemblance avec les autres arbres du même type (les arbres de l'espèce Hêtre ou les arbres de telle cohorte d'âge). L'étude fine de chaque individu suivant un certain réductionnisme finit de désarticuler son être. Un arbre est ce juste un tronc, des racines, des branches et du feuillage ou est-ce son génome? Cette désarticulation de l'être n'est pas le propre d'une vision réductionniste, en effet une approche holiste aboutit à la même chose, car ajouter les propres graines produites par l'arbre ou le cortège de parasites, de bactéries ou les mycorhizes qui lui sont associés, ne simplifie la délimitation de son individualité, ce qui conduit Kupiec (2012) à conclure :

« La notion d'individu est aussi problématique que celle d'espèce » p14

Comprendre le fonctionnement de chaque individu et les lois qui permettent sa genèse aboutit paradoxalement à désarticuler l'être en tant que tout.

La troisième série de problèmes a trait à la pluralité qui se réintroduit lors de l'unification de faits. En effet, toute unification est avant tout un processus d'idéalisation et d'abstraction qui délimite un système à l'intérieur duquel on étudie les ressemblances et les dissemblances entre faits ou entre entités pour établir des lois. Or ce processus d'abstraction est profondément producteur de pluralités, car on regarde un fait selon une intention qui dépend de l'objectif suivi.

Pour toutes ces raisons le débat entre les deux camps, les tenants du monisme (ie. ceux qui défendent l'unification) d'une part et ceux du pluralisme (ie. ceux qui défendent l'irréductibilité de la pluralité) d'autre part, demeure très vivace. Mais il reste confus car différents niveaux sont souvent mélangés. Je vais tenter de clarifier les différents enjeux philosophiques.

Il faut, il me semble, d'abord distinguer le pari ontologique du pluralisme ou du monisme des normes épistémiques qu'il en déduit. A partir des définitions données par Kellert et al. (2006), j'en ai déduit le tableau suivant décrivant ce que me semble être une position pluraliste et moniste selon deux niveaux, ontologique et épistémique:

Table 2: Engagements des positions pluraliste et moniste

	Position pluraliste	Position moniste
Pari ontologique	La texture du monde est telle qu'il n'est pas possible de le décrire ou de l'expliquer sur la base d'un ensemble unique de principes fondamentaux	La texture du monde est telle qu'il est possible de le décrire ou de l'expliquer sur la base d'un ensemble unique de principes fondamentaux
Normes épistémiques	Les méthodes de recherches déduites d'un tel objectif moniste sont inefficaces heuristiquement	Des méthodes de recherches déduites d'un tel objectif moniste sont efficaces heuristiquement

Le pari ontologique a trait à ce que croit le scientifique ou le philosophe en ce qui concerne ce que j'appelle ici la texture du monde. J'utilise le mot texture qui fait échos au concept de monde en mosaïque (dappled world) de Cartwright, car je trouve ce concept plus complet que ceux de nature ou de structure du monde. Rappelons qu'une texture est une région dans une image qui a des caractéristiques homogènes. De plus, la texture fait aussi référence au grain d'une image. Pour moi parler de texture du monde revient à dire quelque chose sur la nature des espèces naturelles caractérisant le monde, la structure des relations qu'elles entretiennent et le caractère nomologique (l'existence ou non de régularités) de ses relations. Je parle de pari ontologique faisant ainsi référence au pari pascalien, car le fait de pouvoir ou non accéder à la véritable réalité du monde est un débat encore en cours entre réalistes et antiréalistes (encadré 1).

Encadré : Le débat réalisme/ anti-réalisme

Putnam (1981) décrit ainsi le réalisme:

« Le premier de ces points de vue est le réalisme métaphysique. Selon celui-ci, le monde est constitué d'un ensemble fixe d'objets indépendants de l'esprit. Il n'existe qu'une seule description vraie de comment est fait le monde. La vérité est une sorte de relation de correspondance entre des mots ou des symboles de pensée et des choses ou des ensembles de choses extérieures. J'appellerais ce point de vue externalisme (...) » p61

Les antiréalistes pensent que nous n'avons pas de besoin de croire ou que nous n'avons pas de raison de croire que les inobservables de nos théories réfèrent à quelque chose de réel dans le monde, toute notre connaissance étant déterminée par notre conscience.

Putnam (1981) explique que l'externalisme aboutit à un paradoxe logique insoluble, celui des cerveaux dans une cuve (Putnam, 1981). Il défend donc un point de vue opposé : l'internalisme.

« Selon le point de vue internaliste, les signes ne correspondent pas intrinsèquement à des objets. Mais un signe qui est effectivement employé d'une certaine manière par un groupe donné d'utilisateurs peut correspondre à des objets particuliers dans le cadre conceptuel de ces utilisateurs. Les objets n'existent pas indépendamment des cadres conceptuels. C'est nous qui découpons le monde en objets lorsque nous introduisons tel ou tel cadre descriptif » p64

Il me semble que les notions de pari ontologique et de normes épistémiques permettent de clarifier les liens entre le débat pluralisme/monisme d'une part et réalisme/ antiréalisme d'autre part. Pour un antiréaliste, il n'est pas possible d'accéder à la texture du monde, voir il n'est même pas souhaitable d'émettre des hypothèses sur elle car ce n'est pas le but que la science doit s'assigner (van Fraassen 1976):

« Nous pouvons considérer que le but de la science est de produire une description littéralement vraie au sujet du monde ou simplement produire des descriptions empiriquement adéquate » p121

Il suffit alors de sauver les phénomènes. Suivant cette attitude aucun pari ontologique ne peut justifier ni le pluralisme ni le monisme, alors que pour un réaliste, déterminer *in fine* la texture du monde et étudier comment il fonctionne indépendamment de nous est un des objectifs de la science. Par contre, en ce qui concerne les normes épistémologiques, la réponse est potentiellement indépendante. En effet, la recherche d'unité, peut être efficace heuristiquement soit qu'elle soit une condition de l'abstraction (Emmanuel Kant) soit qu'elle permette une économie de la pensée (Ernst Mach) quel que soit le parti pris ontologique (ou l'absence de parti pris).

Une seconde clarification mérite d'être faite en ce qui concerne le concept même d'unité. Morrison (1999) distingue une unité par synthèse d'une unité par réduction, ce qui ne recouvre pas complètement la division précédente que j'ai faite entre normes épistémiques et pari ontologique :

« I distinguish two different types of unity: reductive unity, where two phenomena are identified as being of the same kind (...) and synthetic unity, which involved the integration of two separate processes or phenomena under one theory (...). I claim that in the latter case there is no ontological reduction, and consequently the unification offers little in the way of support for claims about a physical unity in nature » p5

L'unité par réduction semble présupposer un pari ontologique moniste (texture verticale du monde), mais nous verrons que ce n'est pas toujours le cas (Steel 2004). L'unité par synthèse peut apparaître comme associée à un choix épistémique moniste, ne prenant pas parti sur la dimension ontologique (c'est pour Morrison le cas de Kant), mais en fait il peut aussi masquer une dimension ontologique.

Une autre façon de clarifier le concept d'unification est d'analyser ce sur quoi porte l'unification. Je propose la classification suivante :

1. L'unification horizontale de faits contigus localisés dans le temps et l'espace (e.g fonctionnement et dynamique d'une forêt donnée)
2. L'unification verticale de faits contigus localisés dans le temps et l'espace (e.g du gène à l'écosystème)
3. L'unification de faits non contigus (e.g rapport de prédation dans le monde vivant)
4. L'unification nomologique (i.e unifications de lois entre elles).
5. L'unification linguistique et conceptuelle entre chercheurs d'une même discipline (e.g univocité des concepts partagés, mathématique)
6. L'unification sociologique au sein d'une discipline scientifique et l'unification des méthodes (e.g homogénéité des pratiques, existence d'un paradigme commun).
7. L'unification sociologique entre disciplines.

Le présent travail vise à éclairer ce débat sur le pluralisme et son possible dépassement par des unifications à différents niveaux par une analyse locale qui concerne la modélisation en écologie.

Le Larousse donne comme définition de l'écologie : « *la science qui se donne pour objet les relations des êtres vivants (animaux, végétaux, micro-organismes, etc.) avec leur habitat et l'environnement, ainsi qu'avec les autres êtres vivants* ». C'est la discipline qui par essence a pointé l'interconnexion du vivant et de son environnement. Je vais essayer de montrer pourquoi son développement pose un certain nombre de questions philosophiques relatives notamment au pluralisme et à la modélisation.

L'écologie en tant que discipline scientifique présente un certain nombre de caractéristiques qui font que les deux débats pluralisme/ monisme d'une part et observations empiriques/ modélisation théorique d'autre part sont centraux pour elle. D'abord ce débat est quasi originel pour l'écologie. Le terme d'écologie a été fondé par un disciple de Darwin, Ernst Haeckel. Or celui-ci a écrit en 1899 un ouvrage intitulé *Les énigmes de l'univers* dont le sous-titre s'intitule «*études de philosophie moniste* ». Il y explique qu'il faut développer une philosophie moniste pour l'écologie pour unifier des observations fragmentaires réalisées par les différents savants concernant la nature. L'écologie naît donc de la volonté d'un dépassement de l'histoire naturelle qui collectionnait les faits sur le monde vivant et inventoriait la diversité des organismes dont il est composé. Le débat entre pluralisme et monisme ne cessera de resurgir par la suite. La question de la possibilité de subsumer la diversité des communautés végétales selon une classification orientée suivant des successions végétales alimentera la controverse entre Frederic Clements et Henry Gleason dans la première moitié du XIX^{ème} siècle. Dans les années 80, dans un article important McIntosh (1987) fait une synthèse d'un débat entre théoriciens et observateurs qui a eu lieu durant toute la décennie après 1970 et se prononce lui pour le pluralisme. Ce débat a encore rebondi récemment, avec Mitchell & Dietrich (2006), qui proposent une voie médiane. Selon eux, comprendre les systèmes biologiques requiert de l'intégration, car chaque phénomène dépend d'une pluralité de causes agissant à une grande diversité d'échelle d'intégration, mais l'intégration ne nécessite pas l'unification. Les raisons de la centralité de ce débat en écologie sont multiples. Essayons de les énumérer.

Premièrement, l'écologie étudie les organismes dans leur milieu naturel en filiation avec l'histoire naturelle et par conséquent ces objets sont fortement contingentés par l'histoire (Keller et Golley, 2000). Elle est donc confrontée à une pluralité due à la diversité du vivant, pluralité accrue due à l'historicité des faits qu'elle étudie. Il existe de ce fait une irréductibilité et une centralité de la diversité spatiotemporelle du vivant qui rend la question de la pluralité incontournable. Ernst Mayr (1982) fait de l'unicité des organismes vivants un critère de démarcation entre la physique et la biologie qui se caractérise par ce qu'il appelle « la pensée populationnelle ».

« Les théoriciens de la pensée populationnelle mettent l'accent sur l'unicité de toute chose appartenant au monde organique. Ce qui importe à leurs yeux ce sont les individus et non le type (...). Ce caractère d'unicité est vrai non seulement pour les individus mais aussi pour les différentes étapes de la vie d'un individu et pour les collections d'individus (...). Les différences entre individus biologiques sont réelles, tandis que les valeurs moyennes que nous calculons pour composer des groupes d'individus sont artificielles » Mayr (1982) p76-78

Pour le biologiste et l'écologue la variation interindividuelle est le substrat fondamental de l'évolution, sans cette diversité, il n'existe pas de processus de sélection. On comprend donc pourquoi l'élimination de la variation résiduelle lors du passage d'observations à une loi de couverture fait *a priori* plus violence au système étudié en écologie et en biologie qu'en physique. Son objet d'étude qui correspond aux variations des formes du vivant en milieu naturel, donne une première explication de la centralité de ce débat en écologie.

Deuxièmement, l'écologie utilise de nombreuses autres disciplines, c'est une science de la synthèse par excellence (biologie, génétique, géologie, la chimie, physique, climatologie) et elle présente une double polarisation entre l'observation car on étudie les organismes dans leur milieu, et la modélisation du fait de la complexité des systèmes étudiés (Keller et Golley, 2000). Donc outre une pluralité inscrite dans les objets d'étude, l'écologie doit unifier une pluralité de points de vues, entre différentes disciplines et sous-disciplines, mais aussi entre différentes méthodes scientifiques (théorie mathématique, modélisation, expérimentation, observations) impliquant une pluralité de modes d'inférence (induction, déduction, inférence à la meilleure explication).

Troisièmement, l'écologie recherche en permanence à unifier sa compréhension du monde. D'autre part, elle a pour charge de dévoiler l'interconnexion entre les organismes. Le monde, la biosphère, est donc vu comme une totalité unifiée. Comprendre une partie du monde, et laisser une autre partie inconnue est structurellement insatisfaisant pour l'écologue.

Ces trois points conduisent à une contradiction permanente entre reconnaissance de l'irréductibilité de la pluralité et volonté totalisante et unifiante. L'écologie ne cesse de construire des systèmes et des entités totalisantes. Mais les systèmes qu'elle étudie présentent des contours spatialement et temporellement flous (écosystème, population, communauté, niche écologique). L'écologie se situe par conséquent dans une tension permanente entre l'analyse (i.e on découpe le vivant et on étudie de plus en plus précisément son fonctionnement) et la synthèse (Keller et Golley, 2000).

Cette contradiction se renforce aujourd'hui du fait de la volonté d'aboutir à une écologie de plus en plus prédictive. L'application des sciences du vivant pour répondre à des besoins sociétaux est ancienne, c'est le rôle des sciences appliquées, telles que l'agronomie ou la foresterie. Mais l'objectif actuel est de penser la gestion des agro-écosystèmes de façon intégrée en tenant ainsi compte des avancées de l'écologie scientifique. Cela doit permettre l'avènement de plans de gestion adaptatifs pour le futur. Or pour proposer de telles solutions, il est nécessaire de relier des causes multiples (sociologiques, économiques et biologiques) qui produisent des effets concrets particuliers : l'extinction d'une espèce, un feu, le dépérissement d'une forêt. De plus, les lois de couverture empiriques développées par les sciences appliquées semblent inopérantes du fait du changement global qui conduit à des modifications à une vitesse sans précédent de la composition chimique de l'atmosphère (CO₂, CH₄..) et du climat (température, précipitations et événements climatiques extrêmes). En effet, ces lois ne sont valables que dans les gammes de valeurs pour lesquelles elles ont été validées. Il est donc nécessaire d'intégrer des connaissances plus fondamentales sur le fonctionnement des systèmes, ce qui passe souvent par certaines formes de réductionnisme. Par conséquent, il y a un besoin d'unification ou d'intégration des connaissances pour pouvoir ensuite modéliser et prédire l'évolution des systèmes. Cette intégration passe explicitement par la modélisation numérique comme l'explique la prospective ADAGE :

« La modélisation sera une voie de passage obligée pour répondre à l'exigence d'anticipation et établir des stratégies d'adaptation simultanément au développement des scénarios de changement climatique, tout en intégrant les différents niveaux d'incertitude de ces scénarios. Les modèles seront utiles pour la prédiction des changements de biodiversité et pour la mise au point d'indicateurs permettant de suivre l'impact des stratégies d'adaptation. Dans un contexte d'incertitudes, on cherchera moins à prédire l'état futur des systèmes mais plutôt leurs trajectoires, intégrant pour cela leurs propriétés dynamiques (plasticité, résilience, évolutivité,...) » ADAGE – Sous-atelier A – Synthèse, p5⁵

La modélisation apparaît donc aujourd'hui en écologie comme un moyen de dépasser la pluralité verticale (du gène à l'écosystème) et la pluralité horizontale (pluralité des phénomènes et des différentes approches). La modélisation mathématique est le moyen habituel pour subsumer une pluralité de faits sous une loi de couverture empirique. Poincaré pointait déjà le rôle des mathématiques pour la généralisation des lois physiques :

« L'expérience est la source unique de vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude. Voilà deux points que nul ne peut contester. Mais alors si l'expérience est tout quelle place restera-t-il pour la physique mathématique ?(...) Et pourtant la physique mathématique existe ; elle a rendu des services indéniables ; il y a là un fait qu'il est nécessaire d'expliquer. C'est qu'il ne suffit pas d'observer, il faut se servir de ses observations et pour cela il faut généraliser ». La science et l'hypothèse p157.

⁵ <https://www1.clermont.inra.fr/adage/index.php?page=accueil>

L'usage des mathématiques et de la modélisation a toujours été fort et controversé en écologie. Darwin reconnaît sa dette envers Malthus qui a pointé l'explosion démographique de populations soumis à une progression géométrique. La synthèse néodarwinienne, qui prédit l'évolution des fréquences alléliques dans les populations suivant quatre forces évolutives (dérive, mutation, migration, sélection), est par ailleurs hautement mathématisée. Depuis la génétique des populations a entretenu des liens étroits avec la théorie des probabilités et avec l'émergence des statistiques. Aujourd'hui, la notion d'échantillonnage et les statistiques d'analyse des distributions ont une place prépondérante dans toute l'écologie.

Les modèles ont donc toujours été de puissants facteurs d'unification en écologie pour trois raisons principales: Ils sont souvent des outils d'unification du langage. Ils synthétisent un corpus théorique et le traduisent en langage mathématique et logique. Ils permettent la connexion logique de lois provenant de disciplines très lointaines.

Mais ce rôle unificateur de la modélisation peut paraître paradoxal. Dans d'autres disciplines, le modèle est avant tout source de pluralité. En physique quantique, différents modèles permettent de sauver les phénomènes et sont pourtant incompatibles théoriquement. Selon Margaret Morrison (1988), il n'existe par exemple pas de fonction de transition unique (identity map) entre le monde des phénomènes à une échelle supérieure (ex. le gaz) et le monde des relations théoriques de l'échelle inférieure (ex. les molécules). En fonction du domaine d'application il existe donc potentiellement une pluralité de modèles pas forcément tous compatibles entre eux. Cette caractéristique des modèles, producteurs de pluralité, se retrouve dans les modèles utilisés en écologie. Un modèle passe toujours par la délimitation d'un système et son idéalisation. Ce processus d'abstraction et d'idéalisation est le propre de la démarche conceptuelle de modélisation. Cette idéalisation du système porte en elle le point de vue intentionnel du modélisateur dans la structure du modèle construit qui dépend de la question qui a gouverné à l'élaboration du modèle. De plus, il existe différents modes d'inférence et par conséquent, différentes façons de concevoir le rôle de la modélisation. En écologie, les modèles sont donc aussi sources d'une pluralité que nous pouvons organiser en deux sous-ensembles. Une pluralité que j'appellerais méthodologique dans laquelle on distingue trois types de modèles : statistiques, théoriques, simulateurs ; et une pluralité que je qualifierais d'objectale qui est due aux différentes objets et questions pour lesquelles ces modèles ont été conçus.

Concernant la pluralité méthodologique, les modèles statistiques ou « empiriques », permettent d'établir à partir d'observations ou d'expérimentations des liens entre différentes variables observées. On peut dire que le mode d'inférence sous-jacent à ces modèles est plutôt de type inductif. Les modèles théoriques partent d'une analyse théorique du fonctionnement d'un système ultra simplifié (exemple proie-prédateur), pour en réaliser une analyse exhaustive du comportement dans tout l'espace logique. Ils sont donc plus proches d'un mode d'inférence de type hypothético déductif. Les modèles simulateurs sont plus récents et leur développement a été permis par l'explosion des possibilités du calcul numérique. Ces modèles visent à simuler l'évolution « réel » de systèmes complexes. Ils connectent l'ensemble des lois connues sur l'évolution d'un système, ils sont paramétrés et validés pour des situations précises en utilisant un très grand nombre de variables mesurées. Ces modèles sont un peu des médiateurs entre les observations et la théorie. Ils peuvent

être utilisés pour déterminer quels sont les mécanismes impliqués dans un phénomène. Pour cela, on teste différentes paramétrisations ou structures de modèle afin de trouver lesquelles améliorent l'adéquation des simulations aux observations. Cet usage de ces modèles donne lieu plutôt à des inférences du type de l'IME (inférence à la meilleure explication).

Enfin en ce qui concerne la pluralité objectale, on distingue un grand nombre de types de modèles simulant : (i) les flux de carbone et d'eau dans les écosystèmes, (ii) les dynamiques des populations animales, (iii) les dynamiques des communautés végétales, (iv) les chaînes trophiques, (v) ou l'évolution des fréquences alléliques dans les populations...

L'objet de ce travail sera donc d'abord dans une première partie d'analyser le pluralisme en écologie et de voir comment certaines unifications ont été réalisées. Ensuite dans une seconde partie, nous regarderons en détails comment certains modèles permettent d'unifier largement horizontalement et verticalement des composantes de l'écologie et nous étudierons en détail la démarche d'idéalisation et d'abstraction pour comprendre où gît éventuellement une source irréductible de pluralité. Enfin, nous conclurons sur les perspectives de ce travail, notamment concernant l'organisation de la science en tant que pratique collective.

Pluralisme et écologie

1. Une brève histoire de l'écologie

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de rappeler d'où vient cette science si particulière. Dans *The philosophy of Ecology From Science to synthesis*, les auteurs expliquent d'abord qu'il existe deux écologies : l'une comme mouvement de pensée qui tourne le dos à la pensée mécaniste et causaliste cartésienne et l'autre comme science qui fait sienne cette pensée scientifique et qui s'inscrit dans sa filiation. Ces deux formes de l'écologie entretiennent des relations, mais leur non distinction peut entraîner des confusions. Il est donc nécessaire de commencer par clarifier ce point.

1.1. L'écologie comme mouvement de pensée

*« La feuille de cet arbre, qui, de l'Orient,
Est confiée à mon jardin,
Offre un sens caché
Qui charme l'initié.*

*Est-ce un être vivant,
Qui s'est scindé en lui-même,
Sont-ils deux qui se choisissent,
Si bien qu'on les prend pour un seul ?*

*Pour répondre à ces questions,
Je crois avoir la vraie manière :
Ne sens-tu pas, à mes chants,
Que je suis à la fois un et double ? »*

Goethe, Le Divan oriental-occidental, Ginkgo Biloba.

En fait ce mouvement de pensée est lui-même pluriel. Il a d'abord existé une version littéraire que l'on peut qualifier d'écologie romantique, avant que ne s'affirme une composante plus spécifiquement politique. Les écrivains qui ont caractérisé ce mouvement de pensée sont Rousseau, Goethe, Schelling (Deléage 1986), Wordsworth, Emerson, Thoreau, ou encore Whitman (Keller et Golley, 2000). Le monde matériel est vu par ces auteurs comme une magnifique machine dont il faut préserver la beauté face aux destructions humaines. Ce mouvement s'oppose autant à la pensée mécaniste et positiviste cartésienne, qui ne voit dans la nature qu'une belle horloge dont il faudrait comprendre les mécanismes, qu'à l'utilitarisme de Locke pour qui la nature n'a pas de valeur en soi, elle en acquière en fonction de son utilisation par les hommes. Les romantiques contestent donc d'une part l'instrumentalisation ou la dévaluation de la nature et d'autre part la séparation de l'homme vis à vis de son environnement.

L'écologie politique est-elle née plus récemment de la prise en compte des dégâts de l'homme sur la nature. Evidemment l'horreur nucléaire à Hiroshima et Nagasaki ainsi que la Shoa ont constitué un tournant dans la confiance des citoyens dans le progrès et la technologie. Mais le livre emblématique de Rachel Carson *Le printemps silencieux*

(1962) qui décrit les conséquences des pollutions chimiques est un autre moment important de cette prise de conscience, elle écrit dès cette époque :

« Depuis vingt-cinq ans, (...) l'intervention humaine a pris une ampleur inquiétante, et s'est orienté dans une direction qui l'est plus encore. L'homme en effet est en train de contaminer l'atmosphère, le sol, les rivières et la mer en y répandant des substances dangereuses, voire mortelles. » p24

Ces questions vont apparaître sur la scène politique autour des années 1970 dans la suite des mouvements sociaux et des luttes anti-impérialistes des années 60. Mais cette écologie politique a aussi différentes composantes: environnementaliste, social-démocrate, marxiste (Gortz, Bookchin, Foster), ou encore la deep ecology qui assume une rupture avec l'humanisme des lumières (Naess). Ces composantes sont très différentes mais elles partagent des questionnements communs concernant les places respectives de la nature et de l'homme ou la critique d'une vision anthropocentrique qui voit la nature comme un outil pour l'homme.

1.2. L'Écologie comme science

L'histoire de l'écologie est intimement liée à celle de la biologie. Comme science de l'observation de la nature, elle est née avec Aristote et avec un de ses étudiants Theophrastus d'Eresus (372-288). Ce dernier en plus de la classification du vivant avait déjà étudié l'adaptation des organismes et plus précisément la réponse interne des organismes à des modifications de leur environnement extérieur (Keller et Golley, 2000). Ernst Mayr dans son histoire de la biologie fait donc d'Aristote le premier vrai biologiste.

Etablir que les racines de l'écologie et de la biologie sont dans la Grèce antique pose deux questions (Déléage 1986) : Est ce que nous ne surévaluons pas la parenté de la science moderne et les travaux des grecs selon un mythe du précurseur? Pourquoi une telle naissance a-t-elle lieu en Grèce ? L'analyse des textes d'Aristote montre (i) que certaines questions actuelles de l'écologie étaient présentes, (ii) qu'Aristote hérite de deux méthodes, l'observation des plantes et des animaux avec une volonté de systématisation (histoire naturelle) et la démarche philosophique déductive qui préfigurent notre méthodologie actuelle, (iii) comme Darwin plus tard il emprunte beaucoup de connaissances à la pêche ou l'agriculture.

L'origine de la biologie dans la Grèce antique rejoint en partie la question de l'origine de la philosophie et de la science et dépasse largement le cadre de cette étude. L'importance économique de certaines connaissances alliée à une culture du débat et de l'investigation intellectuelle semblent avoir joué le rôle de limon fertile.

Ces travaux précurseurs seront repris par Pline l'ancien, ainsi que par de nombreux religieux au Moyen Age. Mais Buffon (1749) reconnaîtra :

« Enfin quoique les modernes aient ajouté leur découvertes à celles des anciens, je ne vois pas que nous ayons sur l'histoire naturelle beaucoup d'ouvrages modernes que l'on puisse mettre au-dessus de Pline ou d'Aristote ». p55.

Il faut attendre Linné, Buffon puis Lamarck pour avoir de nouveau des avancées et des ouvrages d'ampleur. Linné dans son livre *l'Economie de la nature* relie les interactions entre organisme et le cycle de l'eau. Buffon dans son *Histoire naturelle* reconnaît l'adaptation des organismes et Lamarck dans sa *Philosophie zoologique* introduit l'idée d'évolution.

Jean Paul Déléage explique dans son *Histoire de l'écologie* (1991), que le XIX^{ème} siècle connaît alors une triple rupture : (1) l'espace est de plus en plus maîtrisé et les expéditions scientifiques autour du monde rapportent une grande diversité d'objets et la question de la distribution spatiale des êtres vivants devient une question scientifique (Humboldt commencera à établir une géographie des plantes), (2) les travaux de Buffon et de Lamarck modifient la dimension temporelle, l'âge de la terre est sans cesse augmenté laissant le temps à un processus évolutif d'avoir lieu ce qui animera les débats entre Darwin et Lyell, (3) la chimie et la physique (Lavoisier et Liebig) progressent et donnent les bases du fonctionnement des grands cycles géochimiques.

Cette proto-écologie se termine avec Darwin qui donne une première version du mécanisme général de l'économie de la nature. Et l'écologie en tant que discipline est vraiment fondée par Ernst Haeckel son disciple qui fondera le mot : la science de la maison. En 1913 naît la première société scientifique dédiée à l'écologie : « the British Ecological Society ».

L'Ecologie contemporaine présente un certain nombre de caractéristiques synthétisées par Keller & Golley (2000) :

1. Elle utilise de nombreuses autres disciplines, c'est une science de la synthèse: biologie, génétique, géologie, la chimie, la physique, la climatologie.
2. Elle étudie des objets aux contours spatialement et temporellement flous: écosystème, population, communauté, niche écologique.
3. Elle étudie les organismes dans leur milieu naturel en filiation avec l'histoire naturelle.
4. Elle est donc fortement conditionnée par l'histoire et la contingence historique
5. Elle présente une double polarisation: l'observation car on étudie les organismes dans leur milieu, et la modélisation du fait de la complexité des systèmes étudiés.
6. Elle se fonde sur deux principes, centraux: l'existence de systèmes basés sur l'idée d'une structure nomologique du monde et la notion d'évolution (ou de dynamique) de ses systèmes.
7. Elle est dans une tension permanente entre l'analyse et la synthèse.

Bien que nous ayons séparé écologie scientifique et écologie politique et sociétale, suivant en cela Keller & Golley (2000), il est évident qu'il existe une interaction entre ces deux aspects tout au long de l'histoire de l'écologie.

Déléage rappelle que « Humboldt a plusieurs fois rencontré Goethe qui a exercé une très forte influence sur lui. Il n'a jamais caché son intérêt pour les idées romantiques et la Naturphilosophie de Schelling ». p40

Et ailleurs il écrit à ce sujet :

« L'écologie est tout sauf une discipline fermée sur elle-même. Comment faire de l'écologie sans faire appel à la botanique, à la géochimie, à l'océanographie, à la climatologie, à l'agronomie et à l'économie ? Science carrefour, science de plain vents ouvertes sur les sociétés humaines, l'écologie ne saurait être réduite, à aucun moment de son histoire, à une simple branche de la biologie (...) il est vain d'esquiver les questions essentielles des rapports entre l'écologie et l'ensemble des autres disciplines scientifiques. Ces rapports interviennent au niveau des concepts utilisés. Ceux de la sociologie, puisque l'écologie végétale se présente (...) comme la « sociologie » des plantes. Ceux de l'économie surtout, puisque pendant toute son histoire l'écologie se pense comme l'économie de la nature. Ceux de la thermodynamique, puisqu'à partir des travaux de Lindeman les bilans énergétiques deviennent un élément indispensable à la compréhension des écosystèmes. Ces rapports interviennent au niveau des diagnostics écologiques dont l'intérêt est reconnu pour l'analyse de la plupart des activités humaines. Qu'il s'agisse en effet du maintien de la fertilité des sols, de la préservation de la diversité génétique, des effets délétères des pollutions industrielles et agricoles ou aujourd'hui de la dérive anthropogénique des climats... ». p12

De plus l'injonction actuelle à aller vers une écologie prédictive pour pouvoir agir sur l'évolution des services écosystémiques (i.e les avantages économiques ou sociaux tirés de l'usage du bon fonctionnement des écosystèmes) recrée un pont entre ces deux écologies.

2. Pluralisme et monisme dans l'histoire de l'écologie

Comme nous l'avons dit juste avant, l'écologie est une science elle-même interdisciplinaire. Elle partage avec le reste de la biologie le fait qu'elle donne une place centrale à la notion de diversité. La question de l'unification d'un divers foisonnant est donc au cœur des contradictions de cette science depuis ses origines. C'est pourquoi régulièrement le débat monisme contre pluralisme resurgit. Mais ce débat a souvent manqué de clarté conceptuelle, car les termes (monisme et pluralisme) sont rarement bien explicités et les considérations épistémiques et ontologiques sont mélangées. Il n'est pas possible de faire une synthèse exhaustive de toute la littérature ayant trait au pluralisme en écologie. Vu que l'objectif est de clarifier ce débat, j'ai choisi d'étudier en détails quelques moments clés au travers de certains textes.

2.1. Le chapitre XIV des « énigmes de l'univers » de Ernst Haeckel

Le terme d'écologie a été fondé par un disciple de Darwin, Ernst Haeckel. Celui-ci a écrit en 1899 un ouvrage intitulé *les énigmes de l'univers* qui selon ses propres termes correspond des études de philosophie moniste. Il semble donc intéressant historiquement de partir du point de vue de Haeckel.

Dans la préface de cet ouvrage il écrit :

« A ces progrès énormes de la connaissance empirique dans notre siècle de la science, ne répondent guère ceux accomplis dans leur interprétation théorique et dans cette connaissance suprême de l'enchaînement causal de tous les phénomènes que nous

appelons la philosophie. Nous voyons, au contraire, que la science abstraite et surtout métaphysique enseignée depuis des siècles dans nos Universités, sous le nom de philosophie, reste bien éloignée d'accueillir dans son sein les trésors que lui a récemment acquis la science expérimentale. Et nous devons, d'autre part, constater avec le même regret que les représentants de la « science exacte » se contentent, pour la plupart de travailler dans l'étroit domaine de leur champ d'observation, tenant pour superflue la connaissance plus profonde de l'enchaînement général des phénomènes observés, c'est-à-dire précisément la philosophie. Tandis que ces purs empiristes, ne voient pas la forêt, empêchés qu'ils sont par les arbres qui la composent les métaphysiciens dont nous parlions tout à l'heure se contentent du simple terme de forêt sans voir les arbres qui la constituent. Le mot de philosophie de la nature vers lequel convergent tout naturellement les deux voies de recherche de la vérité, la méthode empirique et la spéculative, est encore bien souvent aujourd'hui, de part et d'autre, repoussé avec effroi. Cette opposition fâcheuse et antinaturelle entre la science de la nature et la philosophie, entre les conquêtes de l'expérience et celles de la pensée est incontestablement ressentie, dans tous les milieux cultivés, d'une manière sans cesse plus vive et plus douloureuse ». p5

Nous retrouvons donc dès 1900, la double tension que va connaître l'écologie jusqu'à aujourd'hui entre les connaissances particulières ou observations empiriques d'une part et connaissances générales et théorie d'autre part. Haeckel résout cette tension par le biais d'une philosophie moniste qui tout en renonçant au créationnisme fonde l'existence d'une unité fondamentale du monde dans l'existence de Dieu. Le monisme de Haeckel est notamment décrit dans le chapitre XIV des énigmes de l'univers. Il le fonde premièrement sur un monisme de l'énergie :

«La lumière et l'électricité, sont convertibles l'un en l'autre et ne nous apparaissent que comme des aspects phénoménaux différents d'une seule et même force originelle, l'énergie. » p301.

La conservation de la matière et la réalisation de bilans de conservation de masse et d'énergie dans les cycles biogéochimiques seront des constantes de l'écologie fonctionnelle à partir de Lindemann (1947). Ce point de départ a été perpétué au cours du temps et l'intuition d'Haeckel n'a pas été démenti. Toute vie a besoin d'énergie et de matière, c'est pour cela qu'à la base de la majorité des réseaux trophiques, nous trouvons des plantes autotrophes capables de produire de la matière à partir du gaz carbonique et de l'énergie lumineuse. Dire que les lois de la physique et de la chimie s'appliquent à la biologie et par extension à l'écologie, c'est rompre avec le vitalisme vivace en biologie encore au XIX^{ème} siècle et donc faire un pas dans l'unification de la physique et de la biologie. Haeckel explique que cette « unité » de la nature est une des plus belles conquêtes de la génétique moderne. Dans son histoire de la création naturelle, il fait dépendre la vie d'une théorie carbogène:

« Seuls les caractéristiques physico-chimiques du carbone – et principalement son état d'agrégat semi-liquide, ainsi que la facilité avec laquelle se détruisent ses combinaisons, ses très complexes albuminoïdes, sont les causes mécaniques de ces phénomènes moteurs particuliers qui distinguent les organismes des corps inorganisés ensemble de phénomènes qu'on désigne du nom de « vie » » p 357.

A l'époque de Haeckel, on ne connaissait pas encore ni les bases moléculaires de l'hérédité ni la structure des protéines, mais la découverte de la double hélice et plus largement des bases chimiques de la vie confirmera l'absence de dualisme entre vie et chimie et confirmera cette partie du monisme.

Haeckel ancre aussi son monisme dans une biologie mécaniste qui cherche à comprendre les causes des phénomènes. Il avait parfaitement vu quelle était la nature de la révolution darwinienne qui montre comment le « téléologique », c'est à dire l'existence apparente de finalités dans la nature, provient d'une mécanique adaptative qui n'a nul besoin de créateur.

« Depuis que Darwin, il y a quarante ans de cela, nous a mis entre les mains la clef de l'explication moniste de l'organisation, par sa théorie de la sélection, nous sommes en état de ramener l'infinie diversité des dispositions conformes à une fin, que nous observons dans le monde des corps vivants, à des causes mécaniques naturelles, absolument comme nous le faisons quand il s'agit de nature inorganique, pour laquelle seule la chose était possible auparavant. » p297

Haeckel rappelle que cette fondation du finalisme dans le mécanisme va plus loin que celle qu'avait déjà opéré Kant. En effet, pour la physique ce dernier avait distingué les causes efficientes et téléologiques en rappelant que l'objet de la science portait sur les premières. Mais il pensait que ce n'était pas possible pour la biologie. Haeckel a donc eu raison de conclure que *« Darwin a résolu le grand problème que Kant avait déclaré insoluble »*. p299

Heureusement que Darwin n'a donc pas fait sienne une des limites que Kant donnait à la raison humaine :

« Il est bien certains en ce qui concerne les êtres organisés et leurs facultés internes, qu'au moyen des seuls principes mécaniques de la nature, non seulement nous les connaissons insuffisamment, mais que nous pouvons encore bien moins nous les expliquer; cela est si certain que l'on peut affirmer hardiment ceci: il serait absurde, de la part de l'homme, de concevoir seulement un tel projet et d'espérer qu'un nouveau Newton pourrait peut-être surgir qui nous ferait comprendre, ne fût-ce que la production d'un brin d'herbe, d'après des lois naturelles qu'aucune pensée préalable n'aurait pas ordonnées on doit détourner absolument l'homme de cette pensée. »

Il ne faut pas se m'éprendre, le monisme de Haeckel ne vise pas à éliminer de la biologie la question des fins dans la construction des organes ou l'adaptation des organismes à leur milieu. Il est parfaitement clair là-dessus, pour lui il y a une rupture épistémique entre la physique et la biologie. En effet, il écrit d'une part que :

« Dans l'astronomie, la cosmogonie, dans la géologie et la météorologie, dans la physique et la chimie inorganiques, les lois mécaniques, appuyées sur une base mathématique, sont considérées comme absolument établies et régnant sans réserve. Depuis lors aussi, la notion de fin a disparu de tout ce grand domaine. » p299.

Mais il explique d'autre part, que

« Chaque plante, chaque animal à la manière dont ils sont composés de parties distinctes nous apparaissent organisés en vue d'une fin déterminée, absolument comme le sont les machines artificielles, inventées et construites par l'homme; et tant que dure leur vie, la fonction de leurs divers organes tend vers une fin précise, absolument comme le travail dans les diverses parties de la machine. » p300.

Cette similitude entre la finalité contenue dans l'objet créé par l'homme et l'organe répondant à une fonction pour l'être vivant ou l'organisme adapté à un écosystème est à l'origine selon Haeckel de la puissance explicative de la notion de créateur. La théorie darwinienne rend caduque cette explication, mais elle n'invalide pas la spécificité de la biologie qui réside dans l'existence de tendances téléologiques. Par contre, elle permet dans l'étude du vivant l'incorporation de la question des fins dans une théorie scientifique unifiée.

« Darwin montra d'abord comment l'âpre lutte pour la vie est le régulateur inconsciemment efficace qui gouverne l'action réciproque de l'hérédité et de l'adaptation, dans la graduelle transformation des espèces; c'est le grand Dieu éleveur qui, sans intention, produit de nouvelles formes par la « sélection naturelle », tout comme un éleveur humain, avec intention, réalise de nouvelles formes par la « sélection artificielle ». p302

Je pense que nous n'avons pas complètement compris la nature de la rupture introduite par la sélection naturelle et la théorie moderne de l'évolution. A la fois elle permet de rompre définitivement avec les «idées» platoniciennes et les entéléchies d'Aristote telles qu'elles étaient conçues par leurs auteurs. Mais elle ne nie pas l'existence de fins dans la nature, elle leur donne juste des bases mathématiques et mécaniques. Cela montre aussi du point de vue philosophique, que toute analyse du point de vue des fins est justifiée, mais qu'elle ne peut faire l'économie des moyens et des mécanismes qui y conduisent. De plus, la théorie moderne de l'évolution renouvelle en fait la question des idées ou entéléchies gouvernant la matière plus qu'elle ne libère la matière de l'idée. En effet, on retrouve de façon déformée la notion d'idée platonicienne au niveau moléculaire dans l'information génétique codée dans l'ADN qui permet la production de protéines jouant un rôle dans une chaîne complexe permettant la réalisation d'une fonction dans l'organisme. On voit que Haeckel avait pressenti une double unité, l'unité entre le monde physique et le monde biologique d'une part et l'unité entre l'idéal et le matériel d'autre part.

Revenons au texte d'Haeckel, il y rappelle aussi que le vitalisme a été à la même époque invalidée dans le manuel de physiologie de Müller de 1833. Ce dernier montra en effet que toute la physiologie animale et végétale pouvait être ramenée à des lois mathématisables qui n'avaient pas besoin de la notion de « force vitale ». Enfin, comme Stephen Jay Gould plus tard, Haeckel utilise les exemples de mal-adaptation (organes mal formés) pour montrer en quoi la logique adaptationniste mécaniste diffère de l'adaptation vue sous l'angle téléologique créationniste. Il écrit :

« Chez toutes les plantes et tous les animaux supérieurs, en particulier chez tous les organismes dont le corps n'est pas simple mais composé de plusieurs organes concourant à une même fin, on constate, à un examen attentif, un certain nombre de dispositions inutiles ou inactives, et même en partie dangereuses ou nuisibles. » p303

Le bricolage du vivant si bien décrit par François Jacob (1981) tend vers l'adaptation des organismes. Mais c'est une course où chaque organisme un peu plus adapté que son voisin produit plus de descendants qui propagent l'information génétique à l'origine de ces adaptations. Certes il existe de fortes contingences à ces bricolages. Les plus importantes d'entre elles sont liées à l'organogénèse et la structuration des individus. Le sourire du flamand rose est le célèbre exemple pris par Gould (1988) pour exemplifier cela. Mais l'important ici, c'est que cela montre que cette diversité et ses mal-adaptations n'invalident en aucun cas le monisme mécaniste de Haeckel sauf à mal l'interpréter. Certes à son époque le mécanisme de descendance qu'il invoque est celui de l'hérédité de caractères acquis, donc de type Lamarckien (auquel n'avait pas non plus renoncé Darwin). Ce mécanisme a été largement invalidé par la suite à partir des travaux de Weismann (quoique la résurgence des études sur l'épigénétique montre que la part de l'hérédité passant par des caractères acquis joue un rôle peut être plus important qu'on ne le croyait), mais cela n'invalidé pas le monisme de Haeckel. Il avait même parfaitement anticipé l'hypothèse de la reine rouge⁶ :

«Ainsi que la vie de l'homme, celle de l'animal ou celle de la plante restent partout et toujours imparfaites. Ceci est la conséquence très simple du fait que la Nature, l'organique comme l'inorganique, est conçue dans un flux constant d'évolution, de changement et de transformation. » p305.

Enfin Haeckel termine ce chapitre 14 des énigmes de l'univers sur une précieuse réflexion sur le hasard et la nécessité montrant, pourquoi sa philosophie moniste n'est pas incompatible avec un rôle prépondérant dévolu au hasard :

« La loi générale de causalité d'accord avec la loi de substance, nous assure que tout phénomène a sa cause mécanique; en ce sens il n'y a pas de hasard. Mais nous pouvons et devons conserver ce terme indispensable, pour designer par là la rencontre de deux phénomènes que n'unit pas un rapport de causalité mais dont, chacun a sa cause indépendante de celle de naturellement, l'autre. Ainsi que chacun sait, le hasard, en ce sens moniste, joue le plus grand rôle dans la vie de l'homme comme dans celle de tous les autres corps de la nature. Cela n'empêche pas que, dans chaque hasard particulier, comme dans l'évolution de l'Univers tout entier, nous ne reconnaissons l'universel empire de la loi naturelle qui régît tout, de la loi de substance. » p313

Pour conclure, le monisme de Haeckel visait donc avant tout à combattre le dualisme et le vitalisme qui maintenaient la biologie en dehors des sciences physiques. Il a profondément marqué l'histoire de l'écologie scientifique. Tous les grands débats épistémologiques concernant la biologie et l'écologie y sont abordés en quelques pages. Pour éviter les faux débats sur les questions entre pluralisme et monisme en écologie, ce retour à la philosophie de Haeckel est crucial. Il éclaire à mon avis encore aujourd'hui de nombreuses controverses actuelles. Il permet d'abord de bien clairement montrer comment une pluralité de faits et d'observations peut être expliqué par une théorie unifiée et engage à bien distinguer d'une part les causalités multiples

⁶ Cette hypothèse postule que l'environnement d'un groupe concurrentiel d'organismes (principalement les autres organismes vivants, prédateurs, compétiteurs, ou parasites) se modifie en permanence, si bien que l'effort d'adaptation est toujours à recommencer, et l'extinction toujours aussi probable. Cette théorie privilégie les facteurs biotiques comme facteurs sélectifs au cours de l'évolution.

et d'autre part l'existence de mécanisme unique. Ensuite, il montre pourquoi les questions relatives au pourquoi et celles relative au comment sont en écologie liées depuis la révolution darwinienne. Enfin, il défend un monisme ontologique associé à un réductionnisme méthodologique.

Le monisme de Haeckel a néanmoins continuellement été attaqué par la suite. Pour Gould par exemple, Haeckel surestimait les similarités entre organismes du fait d'une trop forte proportion à l'idéalisation qui pousse mécaniquement à l'omission d'une certaine diversité.

2.2. Pluralisme et monisme dans la controverse entre Clements et Gleason

La question du pluralisme sous-tend aussi le débat entre Clements et Gleason sur la nature ontologique des associations ou communautés végétales.

Dans la préface de son livre *Plant Succession* publié en 1916, Clements détaille les concepts de succession et de climax. Il explique de façon très explicite que le développement d'une succession végétale est parfaitement analogue à celui d'un organisme individuel : naissance, croissance, maturation, mort. La communauté végétale est vue comme un super organisme, qui au cours de sa vie passe par une succession de stades (du lichen à la forêt mature) aboutissant à un climax. Le climax correspond à la situation d'équilibre avec le climat local de cette communauté végétale devenue mature.

Néanmoins, il reconnaît que l'étude très locale d'une association végétale ne montre jamais une telle stabilité car il existe de nombreux changements microclimatiques ou biotiques qui perturbent cet équilibre. Il parle dès cette époque de successions secondaires dégradées dues à des perturbations. Mais pour lui cela ne remet pas en cause l'existence d'une ontologie propre à l'association caractérisée par le climax vers lequel elle doit tendre. Il suffit juste dit-il de multiplier les points de vues sur l'étude de successions particulières.

Mais le plus important est pour Clements, la nécessaire distinction entre le phénomène « succession » et une succession particulière dans la nature, qui n'est qu'une instance dans la nature du concept de succession et à laquelle il propose de donner un autre nom : la série. La succession est composée de quatre étapes selon la typologie que donne Clements que sont l'initiation, la sélection, la continuation et la terminaison. Pour cette raison, chaque série que nous voyons dans la nature est la conséquence d'une pluralité de causes qui agissent à différents moments de la succession et il peut se révéler très difficile d'en faire une hiérarchie selon leur importance sur la succession. Mais cette diversité peut être organisée, voir simplifiée. Par exemple la texture du sol, les précipitations, la température jouent des rôles importants dans la formation d'une association, mais tous ses facteurs peuvent aussi être résumés par la quantité d'eau disponible pour la plante.

La conséquence ontologique que tire Clements de son analyse est que l'association est une entité à part entière, la conséquence méthodologique est que son étude passe par des mesures répétées dans le temps et l'espace : aucune mesure instantanée de la composition floristique à elle seule est suffisante pour qualifier une association. Dans

son analyse, on voit bien aussi que l'hypothèse forte d'une unité de processus et d'une réalité ontologique de l'association ne conduit pas automatiquement à nier la diversité ni temporelle ni spatiale des phénomènes réels. Clements se rapproche d'une certaine vision moniste continuatrice de celle de Haeckel: rôle de la physique (climat – sol) dans la typologie de la végétation, recherche de schémas unificateurs... Les conceptions de Clements vont largement dominer l'écologie américaine jusqu'en 1940 et ce malgré une opposition forte notamment d'un autre écologue célèbre Gleason qui publie une théorie opposée à celle de Clements dès 1917.

Gleason (1939) commence par expliquer qu'il faut reconnaître l'existence d'unités de végétation (forêt, champs) comme entités étudiables scientifiquement. On retrouve donc une orientation moniste qui consiste d'étudier un groupe d'organismes comme un tout. Gleason remarque que 100 ans après la première mention de l'existence conceptuelle « d'un groupe de plantes » (en 1838 par Griesbach), les écologues ont développé des classifications des associations végétales et des méthodes de mesures (présence/absence d'espèces, mesure de leur abondance par la méthode des quadrats...). Mais selon lui on a pas répondu à la question ontologique fondamentale : qu'est-ce qu'une association végétale ? Trois points de vue s'opposent:

« 1. The association is an organism, or a quasi-organism, not composed of cells like an individual plant or animal, but rather made up of individual plants and animals held together by a close bond of interdependence (...). 2 The association is not an organism, but is a series of separate similar unit, variable in size but repeated in numerous examples (...). 3. The vegetation unit is a temporary and fluctuating phenomenon, dependent in its origin, its structure and its disappearance, on the selective action of the environment (...) » p43

Gleason défend la troisième position, celle d'un concept individuel (proche de la monade de Leibnitz). Il défend ce point de vue à partir de son expérience des associations réellement étudiées par lui. Mais ce point de vue est aussi la conséquence de quatre grandes causes. D'abord, le milieu est saturé d'organismes, toute nouvelle plante ne peut s'installer que dans un espace laissé vacant par la mort d'une autre et ce processus est hautement aléatoire. L'installation dépend aussi de la dispersion des graines qui est elle aussi fortement stochastique. De plus, l'environnement varie fortement même à très fine échelle. Enfin, toute nouvelle association apparaît lorsque la précédente disparaît soit par un événement brutal (feux) soit par une modification graduelle du milieu (changement du sol ou du climat). Or la nature de ces changements conditionne fortement la structure de la nouvelle association.

Gleason conclut:

« But as soon as we extend our observations, we begin to realize that each separate community is merely one minute part of a vast and ever changing kaleidoscope of vegetation, a part which is restricted in its size, limited in its duration, never duplicated excepted in its present immediate vicinity, and there only as a coincidence, and rarely if ever repeated » p52

La controverse entre Gleason et Clements est centrale à plusieurs titres, d'abord elle a conditionné les recherches américaines jusque dans les années 30, mais aussi car elle demeure vivace comme en témoigne la redécouverte de façon récurrente de

l'hypothèse individualiste de Gleason (la théorie neutre des communautés défendue actuellement par Hubbell en 2001 en est un des dernières). Mais surtout, pour nous, elle éclaire le débat entre pluralité et unité. Clements donne une formalisation de l'association en distinguant bien le concept dans sa version intentionnelle et les occurrences de ce concept (sa composante extensionnelle) à laquelle il donne un nom différent, celui de série. Gleason réfute la réduction d'une entité individuelle en la subsumant sous une unité hypothétique qui n'existe pas. Pour Gleason, il existe une unicité irréductible de toute association végétale, dont la délimitation n'est même pas possible du fait des continuums spatio-temporaux des processus. Nous sommes donc en plein cœur du débat concernant la possibilité ou non de découper la nature en unités homogènes pour mieux la comprendre.

2.3. Le pluralisme en écologie par Mc Intosh

La question du pluralisme philosophique et de l'écologie est explicitement abordée en 1987 par McIntosh (1987), qui revient alors sur une séquence particulière de l'écologie des communautés. Dans les années 60 et 70, de nombreux auteurs qui ont travaillé sur les aspects théoriques de l'écologie des communautés ont décrété la fin de la vieille écologie. L'écologie était selon eux entrée avec la théorisation et les mathématiques dans une nouvelle ère d'une science mature, nomothétique et prédictive. Elle prétendait définir les lois qui gouvernaient la distribution et l'abondance des espèces à partir des processus biologique, notamment la compétition pour les ressources. L'unification nomologique devait permettre de percer le voile de la complexité des processus et ainsi remplacer une écologie descriptive et parcellaire. Pour ces auteurs, l'écologie vivait une vraie révolution paradigmatique au sens que Kuhn donne à ce terme. Dans ce débat, Salt a explicitement indiqué son espoir que la nouvelle écologie basée sur la méthode hypothético-déductive remplace définitivement la « vieille » écologie basée sur les observations et selon lui inductive et qu'elle permette la synthèse entre la génétique des populations et l'écologie dans une théorie de l'évolution ainsi unifiée.

Cet enthousiasme épistémique a été suivi d'une période d'introspection critique due à l'échec de ce programme. Cette période d'introspection a aussi été un moment d'affrontement violent entre les partisans du tout théorique et ceux qui exprimaient la volonté de revenir aux observations. Cet affrontement mélangeait des considérations biologiques comme la nécessité de faire le lien entre écologie et évolution par le biais du concept de compétition et des engagements philosophiques. Ceux qui se référaient au schéma poppérien hypothético déductif (Fretwell, Peters, Simberloff et Murray) et à la nécessité de la falsification faisaient régner une norme épistémique, critiquée par d'autres (Roughgarde et Diamond) qui la trouvaient stérile et prônaient un pluralisme méthodologique se référant à Feyerabend ou Lakatos. Le fait que la philosophie s'immisce dans les débats entre écologistes était nouveau, les rapports entre biologie et philosophie ayant avant surtout concerné le domaine de l'évolution.

Face au relatif échec du programme théorique des années 60 et 70, certains, optimistes, ont avancé la difficulté de ce programme et la nécessaire patience qu'il fallait avoir face à la complexité des communautés biologiques. Mais des fondements de la théorie ont été remis en question comme le caractère structurant de la compétition entre espèces ou les concepts de communauté ou de niche écologique pourtant centraux en écologie.

Un autre point saillant de la période entre 1970 et 1980 selon McIntosh est le retour de la notion de contingence historique. La distinction entre l'écologie historicisée et celle qui est non historicisée est en effet peut être plus pertinente que celle entre l'observation et la théorie. Chaque composition particulière d'une communauté dépend du pool des espèces présentes au niveau régional, de la dynamique des populations et des facteurs environnementaux (climat et sol), or tous ces aspects présentent une forte composante historique.

Enfin un autre débat est apparu à l'époque. Certains auteurs pensaient qu'il fallait dépasser la vision d'une écologie des communautés purement basée sur les espèces pour aller vers une écologie basée sur les caractéristiques fonctionnelles de ces espèces. Cette proposition a été réaffirmée récemment (McGill et al., 2006), elle promeut le lien entre l'écologie des communautés et les réseaux trophiques d'une part et écologie des communautés et écologie fonctionnelle et thermodynamique d'autre part. Elle fait évidemment penser aux bases du monisme de Haeckel. Mais cette tendance réductionniste a été aussi fortement critiquée car elle révèle aussi un désir récurrent en écologie de coller à la physique pour bénéficier de son aura épistémique. D'autre part, cette voie peut être contreproductive pour établir des lois à l'échelle des communautés comme l'explique McIntosh :

« It follows, metaphorically, that reductionism or "dismantling nature's kaleidoscope is an inappropriate method for community level studies-"Meaningful theory cannot be developed if ecologists are equipped only with some bits of glass, minor fragments and a broken card board tube » p336

Face à ces débats et aux injonctions d'une nouvelle écologie qui semblent avoir été un échec, l'auteur défend une vision pluraliste qui soit tolérante vis à vis des différentes approches. Il s'en réfère pour cela aux travaux de Grene qui soutient une vision moins orthodoxe et moins monolithique de la philosophie des sciences par rapport à celle défendue par l'empirisme logique. Elle critique la volonté d'unification et le concept de science mature. McIntosh conclut son article en insistant sur le fait que l'écologie a finalement toujours été pluraliste et que ce n'est qu'un juste retour aux sources. Ce retour à un pluralisme se construit ici en opposition à une écologie mathématisée et théorique. Et selon McIntosh, ce pluralisme a aussi le mérite d'enterrer les discussions dogmatiques sur la bonne façon de faire de la science.

Cet article ne fut ni le premier, ni le dernier sur cette question à cette époque, mais il a le mérite de poser les jalons des différentes contradictions qui s'expriment quand on aborde le pluralisme en écologie. Le résumé que j'ai fait démontre aussi la confusion dans laquelle cette réflexion a été menée.

Le débat sur le pluralisme tel que le traite McIntosh en 1987 fait rejaillir plusieurs questions :

1. Quels sont les rôles respectifs de la théorie et des observations ? Quelle est la place de l'écologie mathématique (et donc de la modélisation) ?
2. Comment prédire l'évolution de systèmes fortement marqués par la contingence historique ?
3. Existe-t-il des lois en écologie ?

4. Le réductionnisme est-il une voie souhaitable pour comprendre comment fonctionne un écosystème ou une communauté biotique ?
5. Existe une méthodologie unique pour étudier la nature ?

Cette liste synthétise une série de questions clairement en relation avec le débat monisme et pluralisme. Mais elle mélange des considérations épistémiques ayant trait à la méthodologie et des considérations quasi ontologiques. De plus les controverses sont surdéterminées par les rapports de force au sein de l'écologie entre différents points de vue. Le pluralisme méthodologique prôné par McIntosh est surtout en réaction à un monisme qui sous différentes facettes (empirisme, puis falsificationnisme de Popper ou prépondérance des mathématiques et de la théorie) a été vécu comme normatif et dénigrant ainsi les autres façons de faire de la science.

2.4. Intégration sans unification?

En 2006, Mitchell & Dietrich proposent une voie intermédiaire. Comprendre les systèmes biologiques requiert de l'intégration, car chaque phénomène dépend d'une pluralité de causes agissant à une grande diversité d'échelle d'intégration, mais selon ces auteurs l'intégration ne nécessite pas l'unification. L'objectif d'unification présidait à la synthèse néo darwinienne comme l'expliquait Theodosius Dobzhansky *"nothing in biology makes sense except in the light of evolution"*. Il avait une foi inébranlable dans le pouvoir unificateur de la théorie de l'évolution. Selon les auteurs, l'histoire récente de la théorie de l'évolution avec l'émergence de la théorie neutraliste, semble invalider la synthèse néodarwinienne qu'ils assimilent avec le pansélectionnisme: la sélection étant vue comme le principal mécanisme évolutif.

Cette vision de la théorie synthétique de l'évolution mérite pour le moins d'être nuancée. La synthèse néodarwinienne sanctionne précisément l'acceptation de l'existence de quatre forces évolutives sur l'évolution des fréquences alléliques dans les populations naturelles (dérive, mutation, sélection, migration). L'histoire de l'apparition de la théorie neutre ne remet selon moi aucunement en cause le caractère unificateur de la théorie néo darwinienne. Revenir sur ces débats sur la théorie de l'évolution, n'est pas l'objet de ce travail. Cependant, la position de Mitchell & Dietrich permet d'éclairer une autre confusion. Le monisme et le caractère unificateur de la théorie de l'évolution ne réside pas dans l'existence d'une force évolutive qui prédominerait sur les autres mais sur la mise à jour de lois qui unifient le champ de la biologie évolutive. Par ailleurs, leurs critiques du pansélectionnisme sont justes, elle rejoint la célèbre critique de Gould concernant le programme adaptationniste (Gould & Lewontin 1979).

De plus, leur distinction de trois types de pansélectionnisme en un pendant (1) scientifique, (2) heuristique et (3) normatif est intéressante car cela tend à clarifier les controverses.

« When applied to panselectionism, three kinds of panselectionist claims can be distinguished. First, empirical panselectionism would claim that "natural selection is a powerful and ubiquitous force, and there are few constraints, except general and obvious ones, on the biological variation that fuels it." Second, methodological panselectionism would assert that "the best way for scientists to approach biological

systems is to look for evidence of natural selection in some form.” Third, explanatory panselectionism would argue that explaining the effects of selection is “the core intellectual mission of evolutionary theory”. p75

Dans la seconde partie, ils défendent un pluralisme avec intégration des différents niveaux par modélisation. Ils partent du fait qu’il n’existe dans la nature aucun phénomène naturel, qui soit l’expression pure d’une causalité unique. Les auteurs prennent l’exemple du déclin de populations d’amphibiens, on pourrait prendre comme exemple la spirale du dépérissement des forêts qu’a bien décrite Manion (1981) et qui constitue un de mes sujets de recherche en écologie (Gillmann et al., 2012). A mon avis, l’existence d’une pluralité de causes à n’importe quel phénomène écologique que nous observons n’est nullement remise en question par le monisme. Il y a encore là une confusion que nous avons déjà rencontrée entre d’une part une pluralité des causes et d’autre part une pluralité des lois et surtout l’incompatibilité de leur unification conceptuelle. Ce que montre la théorie néodarwinienne appliquée aujourd’hui en génétique des populations est précisément que les différentes forces évolutives peuvent être unifiées au sein d’un même schéma. Ce que recherche l’écologie des communautés est une unification du même type qui serait elle-même connectée à la théorie de l’évolution.

Plus intéressant pour la controverse qui nous intéresse, les auteurs posent la question de points de vue incompatibles car ne relevant pas de même niveau de recherche :

«since Niko Tinbergen’s articulation of four questions and Ernst Mayr’s distinction between ultimate and proximate causes, there is general recognition of multiple levels of analysis (function, cause, development, evolution) or questions (why and how) that can be brought to bear to explain a biological property or behavior (...). Biological questions are stratified into levels of evolutionary origin, current reproductive function, ontogeny, and mechanism. Naturally, questions at different levels require different answers. » p73

On retrouve là la question de l’intentionnalité de l’analyse. Mais rien ne nous dit à ce stade que cette diversité des points de vue ne peut pas être à son tour unifiée. Les auteurs reconnaissent d’ailleurs qu’ils peuvent et doivent être mis en dialogue c’est le sens des progrès récent qui évolution et théorie du développement ou les liens entre écologie fonctionnelle, évolution et dynamique des populations. Ce qui fait qu’on ne peut qu’être d’accord avec leurs conclusions que pour ma part je ne trouve pas antagoniste d’une certaine forme de monisme:

«The “levels of analysis” framework describes the territory of pluralistic investigations, but it is only by integration of the multiple levels and multiple causes, including attention to the diverse contexts in which they occur, that satisfactory explanations can be generated. » p78

3. Synthèse : reformulation d’une thèse moniste

Ces rappels historiques correspondent au point de vue « dynamique » ou historique sur différentes formulations de la tension entre monisme et pluralisme. Ils nous ont permis de formuler dans le désordre quelques points saillants du débat. Nous allons

maintenant essayer d'en faire une synthèse et une analyse à la lumière de l'écologie contemporaine.

Il me semble que l'étude de ce débat en écologie nous a permis d'abord de dévoiler de vrais problèmes et d'éluder certaines caricatures. Avant de reprendre l'analyse en détail, rappelons comment le débat est actuellement posé en philosophie.

3.1. La thèse philosophique du pluralisme scientifique

Dans l'introduction de l'ouvrage collectif *Scientific pluralism* (2006), les auteurs expliquent pourquoi « le pluralisme scientifique », qui est dans l'air du temps, est un bon cadre d'explication de la pluralité des sciences telle que nous pouvons l'observer. Ils rajoutent que ce pluralisme scientifique conduit à des normes scientifiques plus fécondes que celles qui sont la conséquence de ce qu'ils appellent le monisme scientifique.

Le pluralisme se construit donc en creux par rapport au rejet du monisme qu'ils définissent de la façon suivante:

1. Le but ultime de la science est de rendre compte de façon unique, complète et compréhensible du monde naturel sur la base d'un ensemble unique de principes fondamentaux.
2. La nature du monde est telle, qu'il est possible, au moins en principe, de le décrire ou l'expliquer avec cet objectif.
3. Il existe, au moins en principe, des méthodes de recherche qui si elles sont correctement poursuivies permettent d'atteindre un tel objectif.
4. Les méthodes de recherche doivent être acceptées ou non sur la base de leur capacité à atteindre cet objectif.
5. Chaque théorie et modèle en science doivent être évalués sur la base de leur capacité à donner une vision complète basée sur des principes fondamentaux.

Le pluralisme qu'ils défendent s'inscrit en faux contre cet ensemble de valeurs normatives. Ils commencent par remettre en question le point « 2 ». Pour eux, la texture du monde n'est pas forcément compatible avec une analyse unique et cohérente du monde. Rien ne nous prouve selon eux que le monde est fait de telle façon que l'on peut effectivement dans tous les cas connecter des lois issues de différentes disciplines. Il peut exister des incommensurabilités quasi ontologiques. Nancy Cartwright va plus loin, dans son ouvrage « the dappled world », elle y explique que la vision ontologique d'une unité de la nature est un frein au développement d'une science vraiment utile à l'homme. Pour elle, les fameuses lois de la nature ne s'appliquent en réalité pas en dehors de nos laboratoires. Donc au lieu de mettre de l'ordre localement là où l'on peut, nous sommes dans un chantier perpétuel à la recherche d'une unité inexistante. Elle préfère la vision d'un monde tacheté en mosaïque où des machines nomologiques ne fonctionnent que sur des parties du monde.

En tout état de cause, la remise en cause modérée (doute concernant la texture du monde) ou complète (défense d'une ontologie opposée) du point 2 entraîne selon eux la négation du caractère nécessaire dans l'ordre du point 1 qui donne comme but à la

science son unification, puis des points 3, 4 et 5 qui en sont les conséquences en terme épistémiques.

Ensuite les auteurs de *Scientific pluralism* étayent de façon empirique leur point de vue en multipliant les exemples : comportement, physique quantique, logique, biologie du sexe ou économie. Ces exemples peuvent être différemment interprétés, mais ces auteurs défendent qu'ils invalident le monisme et le pluralisme modéré. Plus important, ils disent que cela montre qu'un choix épistémique autre que celui du pluralisme « stance » serait scientifiquement stérile.

Cette thèse pluraliste pose plusieurs problèmes. D'abord, elle se définit par opposition à une thèse moniste prise comme un bloc unifié. La stratégie argumentative suivie, hélas assez courante en philosophie analytique (elle est similaire dans le débat réalisme/antiréalisme), est de reformuler la thèse adverse de façon assez caricaturale et d'en déduire que la seule thèse valable est celle plus raisonnable du pluralisme. Ce faisant, cette thèse pluraliste simplifie les termes du débat et fait disparaître la tension dialectique entre pluralité et unité.

Nous allons essayer de faire ré-émerger la complexité du débat monisme – pluralisme issue des tensions produites par l'opposition entre unité et pluralité en reprenant pas à pas les points développés par les défenseurs du pluralisme dans leur définition du monisme. Prenons le premier point :

1. Le but ultime de la science est de rendre compte de façon unique, complète et compréhensible du monde naturel sur la base d'un ensemble unique de principes fondamentaux.

Dès la première thèse, les auteurs de *Scientific pluralism* mélangent différents types de monisme correspondant à différents niveaux que je reformulerais de la façon suivante :

- La science ne se donne qu'un seul et unique but.
- La science rend compte du monde naturel d'une seule manière.
- La science rend compte de façon complète du monde.
- La science explique le monde.
- La science rend compte du monde avec un ensemble unique de principes fondamentaux.

Comme les auteurs ne détaillent pas ni n'exemplifient aucun de ces points, ils demeurent tous très flous. Le premier concerne le but de la science, or le but peut être celui que la société assigne à la science, le but qu'un collectif se donne ou le but recherché par un scientifique particulier. L'unicité de ce but est évidemment contestable, mais il est peu probable que beaucoup de scientifiques revendiquent un but unique à la science. Le second point soulève la question de l'unicité de la représentation du monde. Existe-t-il une vérité unique ? En fait, sans le dire ce point soulève la question du réalisme scientifique. Si l'on pense comme Putnam qu'il n'existe pas de vérité indépendamment du collectif de chercheurs, alors il ne peut évidemment pas exister de vérités uniques. Un antiréaliste sera donc mécaniquement pluraliste de ce point de vue. Mais le contraire n'est pas totalement vrai. Tout en acceptant un engagement réaliste, on peut imaginer qu'une proposition correspondant

à un fait particulier peut avoir une valeur de vérité indépendamment de nous sans que pour autant, le monde qui est une conjonction infinie de faits puisse avoir une représentation unique.

Ici il y a une ambiguïté chez les auteurs de *Scientific pluralism* dans la notion de monde. Ils semblent exprimer une complétude dans l'explication du monde qui ne va pas automatiquement de pair avec le monisme. De même, l'usage ensuite du terme « explication » range le monisme du côté réaliste, en effet la science peut rendre compte du monde et sauver les phénomènes sans chercher à expliquer comment le monde fonctionne de façon causale. Enfin, le fait que la science doive rendre compte du monde avec un ensemble unique de principes fondamentaux n'est pas plus clair. Qu'est-ce un ensemble unique et comment définir des principes fondamentaux ?

En fait, on a un certain brouillage conceptuel qui du coup mélange plusieurs niveaux auquel le monisme peut s'appliquer. Un monisme que je nommerais téléologique, la science doit avoir un but unique, un monisme méthodologique, il n'existe qu'une seule façon de faire de la science, un monisme métaphysique, il n'existe qu'une vérité unique sur le monde. Le problème est que les auteurs de *Scientific pluralism* donnent une cohérence aux différentes formes de monisme là où il n'y en a pas automatiquement. De plus, ils tendent à arrimer le monisme au réalisme évacuant les philosophes antiréalistes comme Mach qui font de l'économie de la pensée ou de la parcimonie un puissant principe régulateur en science. L'unité a en effet longtemps été vue aussi par le camp instrumentaliste comme un levier pour sauver les phénomènes. Enfin, ils passent sous silence le lien originel entre la science et une certaine forme de monisme, car de fait la science a été un outil de mise en cohérence des connaissances qui permet aussi de subsumer la pluralité du monde sous une certaine unité conceptuelle.

Nous allons donc voir avec l'exemple de l'écologie, pourquoi la tension moniste est elle aussi vivace, quelles formes de pluralité mettent réellement en difficultés différentes variantes du monisme et quels sont les problèmes philosophiques qui émergent de cette analyse.

3.2. La pluralité des buts de l'écologie scientifique

La question des buts pose la question des motivations et des intentions poursuivies par les acteurs de la recherche. Analyser les buts que se donne une science peut se faire selon différents points de vue (la société, le champ scientifique, les administrateurs de la recherche ou le chercheur) et selon différentes échelles temporelles (des objectifs généraux ou momentanés). Avant de rentrer dans le détail, le monisme que j'ai appelé téléologique semble à première vue indéfendable. En effet, la science est une pratique collective socialisée. Les buts que se donnent les chercheurs sont les buts qu'ils ont intériorisés et ces buts sont ceux que la société dans laquelle ils vivent a développés. Les buts généraux sont donc contingents de la société. Examinons ce qu'il en est de l'écologie.

En écologie, le lien entre la recherche appliquée et la recherche fondamentale est paradigmatique. La génétique quantitative s'est construite avec et pour l'agronomie, l'écologie des forêts a dû répondre aux besoins de la sylviculture, l'écotoxicologie qui étudie l'impact des polluants dans les chaînes trophiques doit énormément aux

sciences de l'environnement, enfin la phytosociologie ou l'écologie des communautés ont été très liées au milieu des naturalistes amateurs. Les buts pratiques sont donc intimement mêlés aux objectifs relatifs à la recherche fondamentale.

Ce processus s'est accentué avec le processus de Bologne qui depuis 1998 favorise la construction d'un espace européen de l'enseignement supérieur. Les objectifs de cet espace européen, sont clairement définis dans le contexte de la stratégie de Lisbonne⁷ : faire de l'économie de l'UE « *l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique du monde d'ici à 2010* ». Pour cela, il faut « *préparer la transition vers une société et une économie fondées sur la connaissance* ». Le renforcement du lien entre enseignement supérieur, recherche et industrie est réaffirmé dans le rapport de 2010 de la commission européenne concernant la stratégie de Lisbonne⁸ :

« To launch 'European Innovation Partnerships' between the EU and national levels to speed up the development and deployment of the technologies needed to meet the challenges identified. The first will include: 'building the bio-economy by 2020' (...). To strengthen and further develop the role of EU instruments to support innovation. To promote knowledge partnerships and strengthen links between education, business, research and innovation ». p10

Ces orientations sont d'autant plus fortes en écologie que les thèmes de recherche qui la concernent sont au cœur des innovations attendues :

« To complete the European Research Area, to develop a strategic research agenda focused on challenges, such as energy security, transport, climate change and resource efficiency, health and ageing, environmentally-friendly production methods and land management, and to enhance joint programming with Member States and regions » p10.

Aujourd'hui, nous assistons donc à un rapprochement de l'enseignement supérieur, de la recherche et des pôles industriels d'une part et à un renforcement de la recherche sur projets, projets dont le financement est souvent conditionné à la preuve de l'utilité sociale des recherches. En écologie, les recherches subventionnées portent par exemple sur la séquestration de carbone pour atténuer le changement climatique, le développement de trames vertes, la limitation des espèces invasives pour sauvegarder la biodiversité ou la recherche de bioindicateurs pour contrôler les pollutions. Les verrous à proprement parler scientifiques sont mis en avant essentiellement quand ils empêchent de répondre à une demande sociétale. Dans tous les appels d'offres de recherche qui concernent l'écologie, la participation de composantes sociale et économique est aujourd'hui requise. Au niveau institutionnel, il semble donc évident qu'il existe une pluralité d'objectifs qui dépendent de la société et des intérêts des différents groupes qui la composent. Ni l'unité de la science en soit, ni l'unification de ses méthodes n'est affichée comme un but en soi.

⁷ La stratégie de Lisbonne est l'axe majeur de politique économique et de développement de l'Union européenne entre 2000 et 2010, décidé au Conseil européen de Lisbonne de mars 2000 par les quinze États membres de l'Union européenne d'alors

⁸ http://ec.europa.eu/archives/growthandjobs_2009/

Regardons maintenant ce qu'il en est au niveau des personnels. Je vais m'appuyer sur un exemple pris dans mes recherches avant de tenter une généralisation. J'ai travaillé pendant 4 ans sur le projet ANR DRYADE⁹ qui avait pour but de comprendre les dépérissements forestiers actuels et d'en distinguer les composantes climatiques, biotiques et sylvicoles. Examinons les motivations et les étapes de l'élaboration de ce projet. Au printemps 2006, l'Office National des Forêts (ONF) observe d'importants dépérissements¹⁰ de sapins pectinés en Vésubie (Alpes maritimes), crée un observatoire dédié au suivi de ces forêts et contacte des chercheurs de l'INRA d'Avignon. En juin 2006, je participe à une campagne de terrain sur une sapinière en Issole (Alpes de Haute Provence) exempt de mortalité mais où des déficits foliaires¹¹ sont observés. J'en déduis qu'il serait intéressant de travailler sur la mortalité du Sapin et pour cela de mettre en place des suivis sur trois gradients altitudinaux (i.e. plusieurs sites situés à différentes altitudes). En Août 2006, je suis contacté par des collègues nancéens qui veulent répondre à l'appel d'offre de l'ANR : Vulnérabilité : Milieux, Climat et Sociétés¹². Nous construisons un projet commun piloté par l'INRA de Nancy qui constituera le cadre de recherche de plusieurs thèses. Il y avait dans ce travail une double motivation : un objectif de recherche appliquée à la fois promu localement par les gestionnaires et nationalement par l'ANR et un objectif de recherche fondamentale car les causes de mortalités massives d'arbres adultes sont mal connues.

Les gestionnaires ou l'Etat posent donc des problèmes concrets et les chercheurs en tirent des questions de recherche fondamentale. Puis chaque chercheur dans le développement ce que Kuhn appelle la science normale développe ces propres objectifs qui sont spécifiques des questions qu'il se pose à un moment donné. Il transforme une question générale en une série d'énoncés scientifiques. Mais les questions scientifiques qu'il en tire, dépendent des financements potentiels, des projets de recherche dans lesquels il est déjà impliqué ou de la tradition de recherche dans laquelle il se situe. Bref chaque acte scientifique est le produit d'intentionnalités et de motivations multiples dont il est bien difficile *a posteriori* de faire une généalogie. Face à cette pluralité d'objectifs à court et moyen termes, il est néanmoins possible d'établir une typologie à partir du vécu des chercheurs. Dans un contexte de science normal (hors crise de paradigme), le scientifique cherche (i) soit à confirmer des faits déjà établis dans un domaine en les établissant dans un nouveau domaine, (ii) soit à transposer des méthodes d'un domaine à l'autre, (iii) soit à résoudre une succession d'énigmes posées par des observations. Les énigmes correspondent à des faits qui contredisent des théories établies ou tout du moins une collection de faits déjà observés.

Cette pluralité est renforcée par les caractéristiques du mode de fonctionnement du champ scientifique. Bruno Latour a parfaitement décrit dans son article *Portrait d'un biologiste en capitaliste sauvage* la structure de ce qu'il appelle le cycle de la crédibilité qui amènent les scientifiques à choisir des objets de travail leur permettant

⁹ <http://www.inra.fr/dryade/>

¹⁰ Défoliation des arbres et mortalité

¹¹ Arbres présentant des chutes d'aiguilles anormales

¹² <http://www.agence-nationale-recherche.fr/programmes-de-recherche/appel-detail/vulnerabilite-milieux-climat-et-societes-2008/>

d'accroître leur capital de crédibilité au sein de la communauté disciplinaire à laquelle ils appartiennent (Latour 1993).

« Ce capital de crédibilité n'est pas réservé à la reconnaissance (symbolique) que les chercheurs peuvent avoir les uns pour les autres, mais à l'ensemble du cycle – données, vérités, concepts et articles compris » p107.

Le cycle de la science moderne est le suivant: (i) poser un problème ni trop complexe car il demande trop de temps à être résolu ni trop simple car il n'apporte pas d'informations nouvelles rentabilisables du point de vue du capital de crédibilité, (ii) obtenir de l'argent pour créer ce que Latour appelle de nouvelles situations scientifiques : achat d'équipements, recrutement de personnels, mise en place d'observations ou d'expérimentations en laboratoire, (iii) de ces nouvelles situations découlent des faits qui sont valorisés en publications scientifiques.

En conclusion, Latour opère une analogie efficace entre la plus-value du capital dans la philosophie marxiste et la plus-value informationnelle dans la science.

« Au cycle Marchandise-Argent-Marchandise, qui doit finir par une égalité de valeur (M-A-M) s'est substitué dit Marx, un cycle Argent-Marchandise-Argent, stérile sauf qu'il est inégal (A-M-A⁺). C'est la définition même de la plus-value. Tout se passe comme s'il était possible de pratiquer la même conversion avec les énoncés. Jadis, des énoncés (E), servaient d'intermédiaires à des situations (S) (...). On parlait pour agir sur des situations et personne ne s'intéressait à la valeur d'échange de ces paroles qui ne servaient à faciliter le passage d'une situation à l'autre. Mais supposons que l'énoncé devienne le début et la fin du cycle, et qu'on se mette à capitaliser les énoncés. Cette capitalisation devient aussi stérile que celle de l'argent aussi longtemps que le cycle demeure équilibré. Elle ne peut devenir féconde que si le cycle finit par une inégalité et que si à la place d'un énoncé, je retrouve en fin de cycle, un nouvel énoncé, une plus-value d'information, c'est à dire au sens strict une information (E-S-E⁺). (...) Que deviennent les situations (S) dans cette nouvelle économie capitaliste du vrai ? Des intermédiaires, de simples intermédiaires sans plus de valeurs que les marchandises » p126

Cette analyse de Latour, nous pose deux questions, qu'en est-il en écologie d'une part et quelles conséquences concernant le débat entre pluralisme et monisme? L'écologie en France a connu à la fin des années 90, la même évolution que le reste de la science, avec un passage progressif de ce que Latour appelle l'état féodal (mandarin, reconnaissance institutionnalisée), à un capitalisme sauvage de la connaissance. En France avec la création de l'ANR, la recherche sur projets s'est développée, l'évaluation bibliométrique et la concurrence pour l'obtention des projets ont renforcé la concurrence entre laboratoires et les effectifs de personnels précaires et le nombre de publications ont augmenté. En 1970, 918 articles étaient référencés dans le monde par la base ISI pour les revues d'écologie, en 2005 il y en avait 10 488 (Neff & Corley 2009), soit une multiplication par 10 de l'information. Les articles courts, ne proposant que des réponses claires et simples à des problèmes nouveaux, sont maintenant largement promus. Le CNRS a lancé en 1998 une nouvelle revue d'écologie intitulée Ecology Letters qui de facto visait à concurrencer les deux grandes revues anglo-saxonnes : Ecology créée en 1920 et Journal Of Ecology créée en 1912. Cette nouvelle revue a favorisé les articles courts avec les objectifs éditoriaux suivants :

*« Ecology Letters is a forum for the very rapid publication of the most novel research in ecology. Manuscripts relating to the ecology of all taxa, in any biome and geographic area will be considered, and priority will be given to those papers exploring or testing clearly stated hypotheses. The journal publishes concise papers that merit urgent publication by virtue of their originality, general interest and their contribution to new developments in ecology. We discourage purely descriptive papers and those merely confirming or extending results of previous work ».*¹³

Les mots clés de cette ligne éditoriale qui ensuite impactent les pratiques de recherche sont « very rapid » pour augmenter la vitesse de circulation de l'information, « most novel » ce qui pousse à chercher les zones de recherches dans lesquelles le supplément d'information est statistiquement le meilleur et « *priority will be given to those papers exploring or testing clearly stated hypotheses* » favorisant ainsi une simplification des énoncés et à la production d'articles mono-énoncés. En 2012, son facteur d'impact (FI) de plus de 17 supplante très largement les deux anciennes grandes revues d'écologie (FI autour de 6) qui actuellement tendent à faire diminuer la taille des articles se rapprochant de la ligne éditorial d'Ecology Letters. Le schéma proposé par Latour est donc pertinent en écologie et je pourrais dresser un très grand nombre de portraits d'écologiste en capitaliste sauvage¹⁴.

L'intensification du poids du cycle de la crédibilité scientifique par le biais de la bibliométrie a plusieurs conséquences contradictoires concernant le débat sur le niveau de pluralité et d'unité dans les objectifs de recherche. D'un côté, le papillonnage des scientifiques qui voguent de projets en projets en changeant de sujets de recherche au gré des appels d'offres ou des niches à forte rentabilité bibliométrique renforce une forme de pluralité. Souvent celle-ci déboussole le personnel technique qui ne comprend pas pourquoi tous les deux ans, les types de mesures ou d'objets de recherche changent. Cela déstabilise la continuité de l'accumulation des savoirs pratiques dans les laboratoires et met à mal la cohérence des objectifs de recherche d'un chercheur ou d'un laboratoire. Par contre, paradoxalement, chaque situation scientifique (expérience, observation) doit faire la preuve d'une grande unité logique et présenter un supplément d'information le plus identifiable possible. Le pluralisme des interprétations et des points de vue est alors expurgé de nombreuses publications scientifiques. La nuance et le doute concernant certains résultats deviennent parfois indicibles. De plus, à l'échelle plus globale d'une discipline, les phénomènes de niche bibliométrique renforcent la convergence et l'unicité des objectifs de recherche. Pour le dire plus prosaïquement, tout le monde cherche alors à travailler là où l'on publie le mieux, avec ceux qui publient le plus et sur les sujets où il y a de l'argent pour financer les recherches. Mais il faudrait voir si ces phénomènes ne contribuent pas plus à renforcer le conformisme que l'unité de la science de la discipline.

De cette analyse de la pratique contemporaine de la science en écologie ressort que ce qui guide de plus en plus les chercheurs n'est pas la compréhension d'une situation dans le monde réel ou la résolution d'une énigme, mais plus de trouver des situations

¹³ <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-ELE.html>

¹⁴ Il suffirait de regarder ceux qui publient le plus dans ces domaines et d'aller sur leur page WEB personnel.

qui permettent de passer de E à E+ (énoncé avec une plus-value informationnelle). Notons au passage qu'un principe est pour l'instant conservé, c'est ce que Bourdieu appelle le « principe de réalité ». Le passage de E à E+ a besoin à un moment donné d'une évaluation qui se traduit par la correspondance ou non entre les énoncés et les faits. La recherche d'une certaine manière de la valeur de vérité des énoncés demeure un principe régulateur. Reconnaître la pertinence du mécanisme proposé par Latour n'implique donc pas de renoncer au véritisme de la science comme l'explique bien Engel (2007).

Pour conclure sur cette partie, l'analyse des pluralités téléologiques (relatives aux buts) démontre que la pluralité semble irréductible à tous les niveaux : chercheur, champ scientifique, société dans son ensemble. Néanmoins, une analyse plus détaillée a fait émerger certaines formes de monisme. Russell voyait deux dimensions dans la pratique scientifique, une dimension relative au pouvoir, une autre relative à la contemplation et pensait que la première menaçait de faire disparaître la seconde (Bouveresse 2010). En écologie, comme ailleurs, la science donne le pouvoir d'agir et d'obtenir les effets escomptés de nos actions. Elle revêt donc un enjeu important pour la société et elle est donc de plus en plus arrimée aux intérêts technologiques et à l'innovation¹⁵. A l'échelle globale, celle des relations entre la science et la société, sous la pluralité des objectifs de recherche, se trouve une forme d'unité qui correspond à l'utilitarisme. A l'échelle locale, celle des intentions des chercheurs, cet utilitarisme produit une autre forme de monisme, la même recherche de situations permettant de passer le plus efficacement possible de E à E+. Le cycle E-S-E+ correspond, il me semble, à une logique d'une science « pouvoir » alors que l'ancien cycle S-E-S coïncide plus à une logique de science « contemplation ». Mais ce serait une erreur de croire que la recherche de vérités est directement mise en question par ce changement de cycle, car elle est à la base du pouvoir de la science. Sans correspondance des énoncés à des faits réels, la science ne servirait à rien dans le monde réel. Donc la troisième forme de monisme qui apparaît dans la recherche des buts de la science contemporaine demeure la vérité elle-même. A ce stade nous n'irons pas plus loin sur l'analyse du concept de vérité, mais je prends ici la version réaliste et donc d'une adéquation des énoncés aux faits.

L'unité de la science n'est donc pas un des objectifs de la science, néanmoins la généalogie des buts que se donne la science à tous les niveaux montre que **la recherche de vérités pour pouvoir agir sur le monde** tend à devenir le principe unifiant de la science moderne.

3.3. Unité et pluralité des points de vue en écologie

Pour comprendre les enjeux du débat entre monisme et pluralisme en écologie, il est important d'étudier comment l'unité et la pluralité sont inscrites dans les institutions qui organisent la recherche. Les deux principales questions que l'on se pose dans cette partie sont : Est-ce que l'écologie est une discipline unifiée du point de vue sociologique ? Comment la pluralité de points de vue issus de traditions de recherche différentes ou imposées par l'existence d'une pluralité d'objets s'organise-t-elle ?

¹⁵ On pourrait aussi montrer pourquoi l'innovation technique est aussi importante pour le capitalisme mais c'est un autre débat....

Bourdieu (2001) explique d'abord que la discipline est un champ reconnu socialement :

« La discipline est un champ relativement stable et délimité, donc relativement facile à identifier : elle a un nom reconnu scolairement et socialement (...) ; elle est inscrite dans des institutions, des laboratoires, des départements universitaires, des revues, des instances nationales et internationales, des procédures de certification des compétences, des systèmes de rétribution, des prix » p128

Appartenir à une discipline requiert un droit d'entrée et conditionne l'activité des scientifiques (Bourdieu, 2001):

« La discipline est définie par la possession d'un capital collectif de méthodes et de concepts spécialisés dont la maîtrise constitue le droit d'entrée tacite ou implicite dans le champ. Elle produit un transcendantal historique, l'habitus disciplinaire comme système de schèmes de perception et d'appréciation (la discipline incorporée agissant comme censure). Elle est caractérisée par un ensemble de conditions socio-transcendantales, constitutives d'un style » p129

Dans cette partie, nous analyserons ce que l'organisation contemporaine de l'écologie nous dit de son caractère unitaire, puis nous ferons une généalogie des pluralités en ayant recours à l'histoire de la discipline. Enfin, nous conclurons sur le débat monisme et pluralisme. La question des styles sera traitée dans la partie suivante dédiée aux méthodes en écologie et nous n'aborderons pas ce que Bourdieu appelle « les droits d'entrée » pour lesquels l'écologie n'apporte rien de spécifique.

3.3.1. Analyse statique de l'écologie en tant que discipline

Toute discipline scientifique est constituée de sous disciplines. Ces sous disciplines se distinguent les unes des autres soit par des traditions de recherche différentes soit par l'étude d'objets différents. Pour analyser ces différences, il est possible en amont d'examiner la structuration des institutions et en aval l'organisation des publications. Pour les institutions je ne ferais que l'analyse du système français. L'analyse des institutions peut d'abord être menée à l'échelle des organismes de recherches eux-mêmes organisés en sections à l'université, en départements à l'INRA ou en instituts au CNRS.

Le Conseil national des universités (CNU) est l'instance nationale qui se prononce sur les mesures relatives à la qualification, au recrutement et à la carrière des enseignants-chercheurs (professeurs et maîtres de conférence) de l'université française. Il est composé de groupes, eux-mêmes divisés en sections ; chaque section correspond à une discipline. L'écologie émerge essentiellement à la section 67 intitulée : Biologie des populations et écologie, mais en fait certaines branches de l'écologie peuvent être rattachés aux sections 68 - Biologie des organismes, voir mêmes aux sections 64 (Biochimie et biologie moléculaire), 65 (Biologie cellulaire) et 66 (Physiologie). L'écologie est en fait une discipline transversale qui touche quasiment l'ensemble de la biologie excepté les neurosciences. L'écologie est aussi présente en Section 37 - Météorologie, océanographie physique de l'environnement. En effet, l'évolution du climat comme celle des sols est fortement conditionnée par l'activité des êtres vivants.

Revenons à la section 67, les mots clés rattachés à cette section donne une délimitation de certaines sous disciplines de l'écologie¹⁶:

« *Biologie des populations, Ecologie comportementale, Ecologie de la conservation, Ecologie des communautés, Ecologie évolutive, Ecologie fonctionnelle, Ecologie marine, Ecologie microbienne, Ecologie moléculaire, Ecotoxicologie, Génétique des populations, Phylogénie, Biomathématiques, Biostatistiques, Bioinformatique.* »

Au CNRS l'écologie dépend principalement de l'INEE¹⁷ (Institut Ecologie et Environnement) mais de nombreux projets concernant la biosphère sont aussi du ressort de l'INSU¹⁸ (Institut National des Sciences de l'Univers). L'INEE est subdivisée en trois branches : écologie fonctionnelle et changements globaux, écologie et évolution, interaction homme-milieus.

L'INRA (Institut National pour la Recherche Agronomique) est un institut de recherche appliquée originellement orientée vers l'agronomie, mais il est aussi le principal lieu de la recherche forestière et halieutique. A l'INRA l'écologie émerge essentiellement dans le département EFPA¹⁹ (Ecologie des Forêts, des prairies et milieux aquatiques), même si des recherches sur le milieu physique ou l'écophysiologie sont aussi présentes au département EA (Environnement et Agronomie). La liste des unités de recherche INRA donne aussi une bonne idée de la structuration de la communauté selon deux axes : objet et tradition de recherche (Table 3).

Table 3: Noms des laboratoires du département EFPA à l'INRA

Nom du laboratoire	Lieu	Type
Ecologie des forêts de Guyane	Kourou	UMR
Ecologie des forêts méditerranéennes	Avignon	UR
Biodiversité, gènes et communautés	Bordeaux	UMR
Transfert sol-plante et cycle des éléments minéraux dans les écosystèmes cultivés	Bordeaux	UMR
Ecologie comportementale et biologie des populations de poissons	Pau	UMR
Ecologie fonctionnelle et physique de l'environnement	Bordeaux	UR
Physiologie intégrée de l'arbre fruitier et forestier	Clermont Ferrand	UMR
Unité de recherche de l'Ecosystème Prairial	Clermont Ferrand	UR
Laboratoire d'écologie microbienne	Lyon	USC
Centre Alpin de recherche sur les réseaux trophiques des écosystèmes limniques	Thonon les bains	UMR
Laboratoire de Biologie Environnementale	Besançon	USC
Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes	Montpellier	UMR

¹⁶ <http://www.cpcnu.fr/section.htm?option=menuSection&numeroSection=67>

¹⁷ <http://www.cnrs.fr/inee/>

¹⁸ <http://www.insu.cnrs.fr/>

¹⁹ <http://www4.inra.fr/efpa/>

Centre de biologie et de gestion des populations	Montpellier	UMR
Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols	Montpellier	UMR
Laboratoire d'Études des ressources forêt-bois	Nancy	UMR
Interactions arbres-microorganismes	Nancy	UMR
Écologie et écophysiologie forestière	Nancy	UMR
Biogéochimie des écosystèmes forestiers	Nancy	UMR
Amélioration, génétique et physiologie forestières	Orléans	UR
Zoologie forestière	Orléans	UR
Arbres et réponse aux contraintes hydriques et environnementales	Orléans	USC
Ecobiologie et santé des écosystèmes	Renne	UMR
Dynamiques forestières dans l'espace rural	Toulouse	UMR
Comportement et Ecologie de la Faune Sauvage	Toulouse	UR
Biogéochimie et Ecologie des Milieux Continentaux	Versailles	UMR

Ce qui caractérise donc un laboratoire c'est soit un objet de recherche (forêts tropicales, forêts méditerranéennes, espace rural) soit une sous discipline (zoologie, botanique, écologie fonctionnelle).

Table 4: Noms des équipes de trois laboratoires d'écologie

Laboratoires	Equipes ou départements
Ecologie Systématique et Evolution²⁰	Biodiversité, Systématique et Evolution
	Ecologie des Populations et des Communautés
	Ecophysiologie Végétale
	Génétique et Ecologie évolutives
Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive²¹	Ecologie fonctionnelle
	Ecologie évolutive
	Dynamique et gouvernance des systèmes écologiques
	Interactions écologie et sociétés
Laboratoire « Ecologie & Evolution »	Evolution des Sociétés Animales
	Changements Globaux et Processus Adaptatifs
	Eco-évolution Mathématique
	Ecophysiologie Evolutive
	Ecologie des Populations et des Communautés.

²⁰ <http://www.ese.u-psud.fr/>

²¹ <http://www.cefe.cnrs.fr/>

Cette analyse sémantique peut aussi s'opérer à l'échelle infra-laboratoire entre différentes équipes. Comme il existe peu de laboratoires généralistes de l'écologie en France, l'analyse est donc aisée de ce point de vue. Je m'en tiendrais ici à la liste des équipes en 2012 des trois principaux laboratoires d'écologie en France (Table 4).

En aval, l'analyse peut se faire à l'échelle internationale à partir des publications. Commençons par lister les principales revues généralistes de l'écologie (Thomson Reuters's Essential Science Indicators database, January 1, 1998 through October 31, 2008). En écologie et dans les sciences de l'environnement en 2008, 168 journaux sont comptabilisés dans la base Thomson Reuters.

Table 5: Listes des principales revues publiant des recherches en écologie

Rank	Journal	Papers	Citations	Citations Per Paper
1	Annual Review of Ecology, Evolution & Systematics	131	15,293	116.74
2	Nature	395	41,042	103.9
3	Science	397	34,568	87.07
4	Trends in Ecology and Evolution	727	39,356	54.13
5	Ecological Monographs	309	11,310	36.6
6	Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA	491	17,088	34.8
7	Systematic Biology	416	12,194	29.31
8	Ecology	3,161	80,313	25.41
9	Ecology Letters	1,133	26,327	23.24
10	The American Naturalist	1,618	36,694	22.68
11	Conservation Biology	1,729	36,209	20.94
12	Environmental Health Perspectives	3,374	70,023	20.75
13	Molecular Ecology	3,345	69,275	20.71
14	Ecological Applications	1,711	34,899	20.4
15	Journal of Ecology	1,081	20,969	19.4
16	Global Change Biology	1,508	27,995	18.56
17	Journal of Applied Ecology	1,162	21,032	18.1
18	Oecologia	3,219	56,010	17.4
19	Ecosystems	705	12,199	17.3
20	Environmental Science & Technology	10,006	171,816	17.17

Les vingt premiers titres de cette base sont des journaux généralistes, trois sont même non spécifiques de l'écologie (Nature, Science et Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA), onze d'entre eux inclue le mot « écologie » et trois le terme « biologie ». Cela tend à montrer l'existence d'une discipline relativement unifiée.

Rappelons que l'écologie est d'abord une discipline en forte expansion (Neff & Corley 2009):

« In 1970, there were 918 articles in the ISI database of ecology journals; by 2005 the annual total was 10 488 articles. Therefore, when we use articles in ISI journals as a measure, the field of ecology has grown over 10-fold since 1970 in terms of the number of articles published annually. Similarly, the number of journals publishing ecology research has undergone rapid growth, increasing from 17 in 1970 to 106 in 2005. » p663

Ceci explique l'expansion du nombre de références aux concepts de l'écologie qui donc débordent de leur champ scientifique initial et contamine d'un point de vue sémantique d'autres secteurs de la biologie (e.g Molecular Ecology), voir même des secteurs de la physique (e.g Remote sensing of Environment). S'il on examine un domaine plus spécifique de l'écologie par exemple celui de la réponse des arbres aux changements climatiques (domaine sur lequel je travaille), on s'aperçoit mieux de la pluralité des disciplines impliquées. En effet, sur ces questions on retrouve des revues listées plus hauts (Science, Nature, Global Change Biology, Ecology Letters ou Ecosystems), mais aussi des revues agronomiques ou forestières (Agricultural and Forest Meteorology, Annals of Forest Science, Forest Ecology and Management...), des revues de physiologie (Tree physiology, Plant Cell and Environment), de botanique (Annals of Botany, New Phytologist) et même de physique (Journal of Geophysical Research, Remote Sensing of Environment)

Enfin Neff & Corley (2009) ont aussi étudié l'évolution de la structuration des concepts clés en écologie en groupant statistiquement les mots clés et en comparant l'évolution de ces regroupements entre deux périodes 1970-1987 et 1988-2005. Ils montrent une augmentation de la dispersion des groupes de mots clés qui passent de trois noyaux à treize, ce qui indique un certain éclatement de l'unité de la discipline.

Pour conclure cette analyse nous avons montré que l'écologie présentait une certaine unité en termes d'organisation de la recherche à la fois en amont, les institutions reconnaissent l'écologie en tant que discipline à part entière et en aval il existe de nombreuses publications d'écologie. Cette reconnaissance d'une discipline unifiée est même ancienne puisque la société britannique d'écologie date de 1913²² et la société américaine d'écologie de 1915²³. La société française d'écologie (SFE) est plus récente puisqu'elle a été fondée en 1968²⁴. Néanmoins, l'écologie demeure une discipline aux contours flous, elle entretient d'étroites relations avec le reste de la biologie (biologie moléculaire, génétique, biologie cellulaire et physiologie), mais aussi avec des secteurs de la physiques (climatologie, géologie, pédologie, télédétection) et les sciences appliquées (agronomie, foresterie). Enfin, elle est subdivisée en fonction des objets d'études (notamment entre écologie animale et écologie végétale) et selon certaines traditions de recherches: l'écologie fonctionnelle, la dynamique des populations, l'écologie des communautés, l'écologie du comportement et l'écologie évolutive.

3.3.2. Généalogies des grandes traditions de recherche en écologie

Nous allons maintenant faire une généalogie des différentes traditions de recherche en écologie pour voir les points de blocages à une unification plus poussée. Délégé (1991) rappelle :

« Au début des années vingt, l'écologie est surtout développée selon deux lignes de recherche : l'autécologie qui traite du rapport des êtres vivants à leur environnement

²² <http://www.britishecologicalsociety.org/>

²³ <http://www.esa.org/>

²⁴ <http://www.sfecologie.org/>

et l'écologie des communautés vivantes ou synécologie grâce à des travaux comme ceux de F. Clements ou de H.C Cowles ». p151

Commençons donc par les racines de l'autécologie appelé plus tard écophysiologie puis écologie fonctionnelle. **L'écologie fonctionnelle** est la partie de l'écologie qui traite des fonctions des organismes et des écosystèmes en interaction avec leur environnement. La réalisation de ces fonctions se traduit par des flux d'éléments et d'énergie. L'écologie fonctionnelle étudie donc les processus et les organismes à l'origine de ces flux ainsi que leurs réponses aux variations naturelles et anthropiques du milieu. Un des articles fondateurs de ce type d'écologie est l'article de Raymond Lindeman intitulé « *the trophic dynamic aspect of Ecology* » publié en 1942 dans la revue américaine Ecology. A l'époque le débat portait sur les facteurs influençant les successions d'espèces (voir la controverse entre Clements et Gleason) au cours de l'évolution des écosystèmes (Lindeman, 1942).

« The trophic-dynamic viewpoint, as adopted in this paper, emphasizes the relationship of trophic or « energy-availing » relationships within the community unit to the process of succession » p399

Le programme de recherche déduit de ces prémices est de quantifier au travers des chaînes trophiques les bilans d'énergie et de matière. Tout commence donc par la production primaire des végétaux qui dépend de l'acquisition de l'énergie lumineuse lors de la photosynthèse (Lindeman, 1942).

« All function, and indeed all life, within an ecosystem depends upon the utilization of an external source of energy, solar radiation. A portion of this incident energy is transformed by the process of photosynthesis into the structure of living organisms » p400.

Nous retrouvons une fondation par la physique équivalente à celle que Haeckel proposait 50 ans plus tôt. Lindeman propose une formalisation des chaînes trophiques. Les plantes organismes autotrophes accumulent de la matière qui est utilisée par les animaux autotrophes herbivores eux-mêmes à la base de la nourriture pour les prédateurs. En fin de cycle, les organismes décomposeurs, bactéries et champignons, décomposent la matière organique et rendent au milieu (e.g l'océan ou le sol) les éléments minéraux (cf figure tiré de l'article de Lindeman).

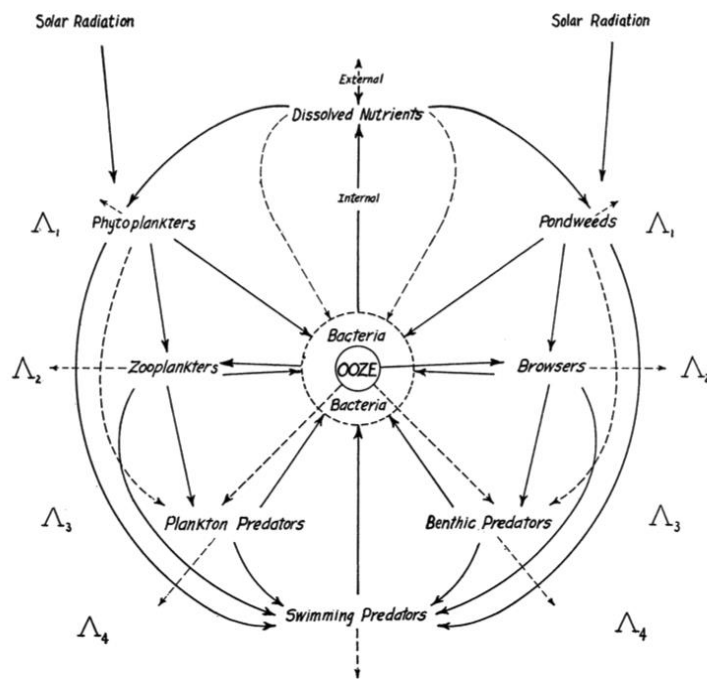


Figure 1: Le cycle des relation trophiques en milieu lacustre (Lindeman 1942)

Un des objets de recherches est alors de quantifier la production de matière à chaque étape de la chaîne trophique et le rendement de chacune des mailles de la chaîne. Lindeman en propose une formulation mathématique (Lindeman 1942).

« Considering any food-cycle level Λ_n , energy is entering the level and is leaving it. The rate of the energy content Λ_n therefore may be divided into a positive and a negative part :

$$\frac{dL_n}{dt} = I_n + I_n'$$

where λ_n is by definition positive and represents the rate of contribution of energy from Λ_{n-1} (the previous level) to Λ_n , while λ_n' is negative and represents the sum of the rate of energy dissipated from Λ_n (...). » p403

Depuis cet acte fondateur, l'écologie fonctionnelle traite de la réponse des organismes aux variations du milieu et des conséquences de ces réponses sur les cycles des éléments minéraux et les flux d'énergies au sein des écosystèmes. L'écologie fonctionnelle dépend donc structurellement de la physique et de la physiologie.

L'écologie des communautés étudie les interactions entre les espèces d'une même communauté à différentes échelles spatiotemporelles. Cela inclue l'analyse des distributions des espèces (biogéographie), l'étude de la structure des communautés, la quantification de l'abondance relative des différentes espèces ainsi que leur fluctuation démographique et enfin les interactions qu'elles entretiennent. Elle a ses racines avec les premières études de biocénose réalisées par Karl Möbius. L'écologie des communautés s'est développée aux états unis avec la théorie des successions et en Europe avec la phytosociologie.

Mais le concept même de communauté est contesté des origines à aujourd'hui (Ricklefs 2008).

« In spite of decades of evidence to the contrary, ecologists have been reluctant to abandon a local concept of the community. It has been eight decades since Gleason (1926) challenged Clements's (1916) perception of the community as an integral unit in ecology, and more than 50 years have passed since Whittaker's (1953, 1967) definitive work on the distributions of plant species across ecological gradients. In spite of the influence of MacArthur and Wilson's (1963, 1967) theory of island biogeography, in which colonization of islands from external sources was a primary driver of diversity, ecologists broadly began to accept the influence of regional processes on the species membership of local ecological assemblages only about 25 years ago » p742

Aujourd'hui un consensus émerge cependant sur le fait que la composition d'une communauté dépend du climat (ce que l'on appelle le filtre abiotique ou environnemental), du pool d'espèces locales qui peuvent s'installer et des interactions entre les espèces (filtre biotique). Un autre concept central de l'écologie des communautés est celui de la niche écologique développée pour la première fois par Hutchinson (1957) lors d'une conférence devenue célèbre. Il définit de la manière suivante la niche fondamentale :

« Consider two independent environmental variables x_1 and x_2 , which can be measured along ordinary rectangular coordinates. Let the limiting values permitting a species Sl to survive and reproduce be respectively x_1' , x_1'' respectively for x_1 and x_2' and x_2'' for x_2 . An area is thus defined, each point of which corresponds to a possible environmental state permitting the species to exist indefinitely. If the variables are independent in their action on the species we may regard this area as the rectangle (...). We may now introduce another variable x_3 and obtain a volume, and then further variables $x_4 \dots x_n$, until all of the ecological factors relative to Sl have been considered. In this way an n -dimensional hypervolume is defined, every point in which corresponds to a state of the environment, which would permit the species Sl to exist indefinitely. For any species Sl , this hypervolume N_i will be called the fundamental niche of Sl . »

Mais dans la réalité, les espèces ne sont pas seules, elles sont en interaction avec d'autres espèces qui diminuent leur niche réelle (dans le cas de la compétition ou de la prédation). La niche réalisée se définit donc comme suit (McGill et al., 2006) :

« The subset of n -dimensional environmental space where a species is present. It is usually assumed that the realized niche is a subset of (smaller than) the fundamental niche » p178

Les accents actuels sont mis d'une part dans le caractère potentiellement neutre et aléatoire de l'association des espèces (Hubell, 2001) et d'autre part sur lien à recréer entre écologie fonctionnelle et écologie des communautés (McGill et al., 2006).

La **dynamique des populations** est issue d'une autre branche de l'écologie. Elle s'intéresse à la dynamique des effectifs des populations d'êtres vivants. L'évolution des tailles, du poids, et de la composition en âge des individus, font également partie

de son champ d'étude. Ces études ont pour but, outre de prévoir les accroissements ou diminutions des populations, de comprendre les influences environnementales sur les effectifs des populations. Elles sont incontournables par exemple pour la gestion de la pêche, la gestion cynégétique, le management des zones protégées, le contrôle des populations d'animaux dits nuisibles...

Comme le rappelle Déléage (1991) :

« La démographie des populations animales intéresse depuis toujours les naturalistes (...). Le véritable initiateur de la démographie est Thomas R. Malthus qui développe dans son essai sur le principe de population la contradiction entre croissance géométrique du nombre des hommes et progression arithmétique des ressources. Plus d'un siècle durant, le paradigme malthusien restera le modèle indépassable de toutes les études de démographie animale. La première expression mathématique de ce modèle est due à P.-F. Verhulst en 1838, sous la forme de la courbe logistique » p147

La dynamique des populations entretient un rapport privilégié avec les mathématiques et la modélisation. Un des travaux les plus célèbres est celui de Lotka (1920) et Volterra (1926) qui ont proposé un modèle mathématique de l'évolution des proies et des prédateurs dont les effectifs sont sensés fluctuer dans le temps indépendamment des conditions du milieu. Ce modèle totalement théorique ne sera testé expérimentalement sur des paramécies par Gause qu'en 1944.

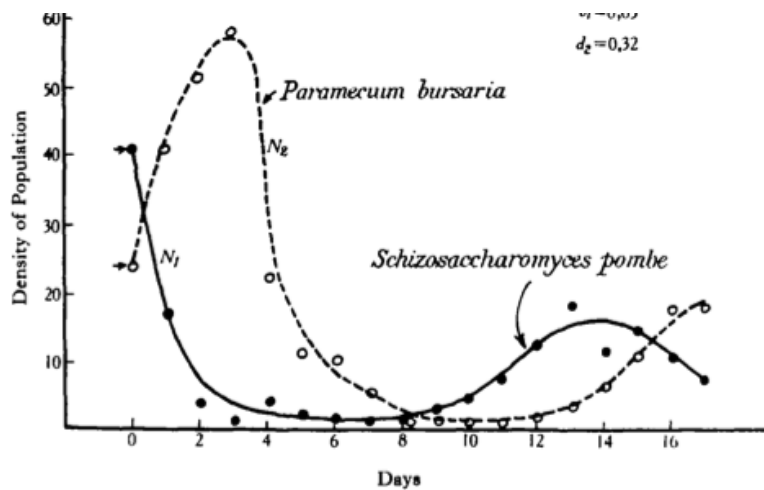


Fig. 1. Fluctuations in the density of population of *Paramecium bursaria* (number of organisms per 0.5 c.c.) and *Schizosaccharomyces pombe* (per 0.1 c.mm.).

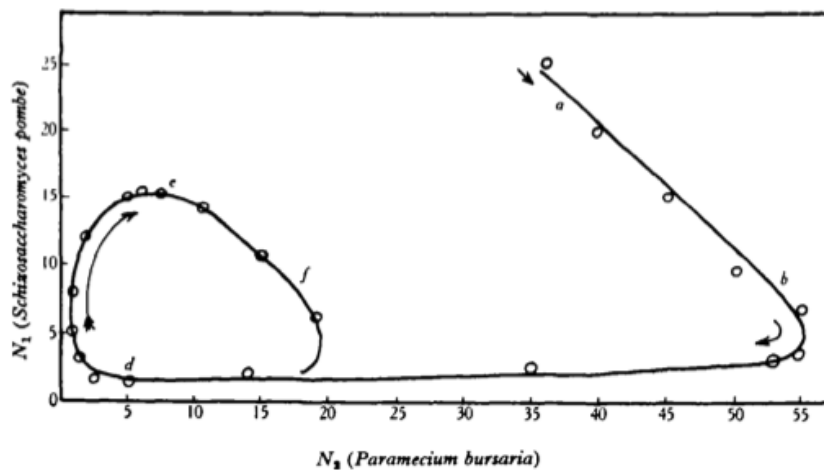


Figure 2: Fluctuations de densité de populations de Paramécie (Gause, 1944)

La dynamique des populations étudie donc des systèmes dynamiques dont l'évolution temporelle est une conséquence des interactions au sein de la population (compétition intra-spécifique). Les différents types d'interaction entre populations de différentes espèces sont la compétition (interactions négatives réciproques), la prédation ou parasitisme (interactions négatives pour l'une positive pour l'autre), la facilitation (interactions positives pour l'une neutres pour l'autre) et la symbiose (interactions positives pour les deux) :

Table 6: Tableau des types d'interactions biotiques

	Espèce A	Espèce B
Compétition	-	-
Prédation/ parasitisme	+	-
Facilitation/ commensalisme	0	+
Symbiose/mutualisme	+	+

L'écologie évolutive se situe à la frontière de l'écologie, de la génétique et de l'évolution. L'écologie évolutive est une branche des sciences de l'évolution qui traite plus particulièrement de l'influence des contraintes de l'environnement sur l'évolution des organismes vivants ainsi que de leurs comportements (éthologie). Le fondateur de l'écologie évolutive est Darwin lui-même. En effet, Darwin cherche à comprendre l'origine des espèces et développe un mécanisme en trois temps pour expliquer l'évolution des organismes : l'existence de variations entre individus (il étudie d'abord les variations domestiques puis les variations naturelles), la transmission de ces variations et la sélection des individus détenteurs des caractères les mieux adaptés à leur environnement biotique et abiotique. L'unité initiale entre écologie et évolution est ensuite partiellement rompue. Les sciences de l'évolution dépendent de deux théories : la théorie de l'hérédité et la théorie de l'évolution.

La théorie de l'évolution vise à expliquer pourquoi les organismes vivants sont adaptés à leur milieu naturel et comment évoluent les formes du vivant au cours du temps. Pour expliquer le mécanisme évolutif, rappelons que les allèles sont des variantes d'un même gène qui permettent une expression différenciée des phénotypes selon les individus. Ceux qui portent les allèles qui permettent l'expression d'un phénotype favorable dans leur environnement survivent mieux ou se reproduisent plus et ces allèles par conséquent envahissent la population qui s'adapte ainsi à son milieu au cours des générations. On recense quatre forces évolutives qui font varier les fréquences alléliques. La migration qui apporte de nouveaux allèles (d'ailleurs potentiellement maladaptés) en provenance de populations extérieures, la dérive qui correspond à la perte statistique d'allèles qui augmente quand les populations sont petites, la mutation et la sélection. Dans ces quatre forces, *in fine* seule la sélection produit de l'adaptation, mais les quatre contribuent à l'évolution. Enfin, les trajectoires d'évolution dépendent évidemment de bien d'autres facteurs entre autres la contingence architecturale du développement des organismes. La théorie de l'évolution est présentée par Darwin dans l'origine des espèces. Le mécanisme reste le même dans la théorie contemporaine.

La théorie de l'hérédité vise à expliquer la transmission héréditaire des caractères dans la descendance. La plus ancienne théorie de l'hérédité est celle d'Hippocrate que André Pichot (1999) décrit ainsi:

« Selon Hippocrate, les différentes parties du corps émettent des humeurs qui gagnent les organes génitaux où elles forment les semences (...) si une partie du corps d'un des parents est modifié, l'humeur qu'elle envoie dans les organes génitaux peut en subir le contrecoup, d'où une altération de la composition de la semence » p12

Buffon et Maupertuis vont adapter au XVIII^{ème} siècle, cette théorie à la chimie de leur époque et les humeurs deviennent des particules chez Maupertuis et des molécules organiques chez Buffon. La théorie de l'hérédité de Darwin est proche de celles-ci. L'originalité de Darwin est que ces gemmules sont en puissance des représentations du corps et non des parties de celui-ci. Darwin appelait sa conception de l'hérédité la pangenèse (i.e. engendrement par le tout).

Mais les premières lois de l'hérédité sont énoncées par Mendel en 1866. Il établit des lignées de plantes qu'il appelle formes constantes (lignées pures). Il croise ensuite deux lignées différant d'un seul caractère (graines lisses ou ridées). Il obtient après

une génération (G1) la forme dominante (graine lisses) et en G2 (produit du croisement de deux G1) le retour du type ancestral et surtout la ségrégation $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, puis en G3 les proportions $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$. Il réalise la même expérience avec d'autres caractères et voit qu'ils ségrégent indépendamment les uns des autres.

La synthèse de la théorie de l'évolution et de la théorie de l'hérédité va être opérée plus tard dans les années 30. Cette synthèse fut menée au cours des années 1930 et 1940 par R.A. Fisher, J.B.S Haldane, Sewall Wright, Theodosius Dobzhansky, Julian Huxley, Ernst Mayr... Le nom de théorie synthétique lui fut donnée par Julian Huxley en 1942; elle est aussi qualifiée de néodarwinisme pour souligner le fait qu'elle constitue une extension de la théorie originale de Charles Darwin, laquelle ignorait les mécanismes de l'hérédité génétique. La théorie sera ensuite complétée par la découverte de la double hélice par Watson & Crick. La synthèse réconcilie les généticiens qui avaient fait de la mutation le moteur d'une évolution saltationniste et les naturalistes et écologues qui défendaient une évolution graduelle par sélection naturelle et qui n'avaient pas renoncé à une hérédité flexible (hérédité des caractères acquis). Lors de son centième anniversaire voilà comment Mayr (2004) relate la synthèse :

« Beginning in 1910, the work of the Columbia University group in New York under T. H. Morgan led to a refutation of the theories of the saltational Mendelians, and established the basis for the origin of a rigorous school of mathematical population genetics, culminating in the work of R. A. Fisher, J. B. S. Haldane, and Sewall Wright. Most important, this new school of population geneticists fully accepted natural selection—and that permitted a synthesis ». p47

L'écologie évolutive entretient donc un lien privilégié avec la génétique des populations et est depuis ces débuts une discipline fortement mathématisée. Fisher (1890-1962) fut par exemple à la fois un des fondateurs à la fois des statistiques et de la génétique des populations.

3.3.3. Pluralité due aux différents objets étudiés

La classification selon les objets est plus aisée à faire, nous pouvons établir le tableau suivant (non exhaustif) qui croise les entités biologiques et les milieux:

Table 7: Tableau des objets d'études en écologie

Milieux		Animaux		Végétaux		
Aquatique	Pélagique ²⁵	Poissons	Arthropodes	Algues		
	Benthique ²⁶			Plantes	Algues	
	Riparien ²⁷					
	Lac					
Terrestre	Boréal	Insectes	Oise aux	Mammifères	Arbres	Herbacées
	Tempéré					
	Désertique					

²⁵ Milieux océaniques en eaux profondes

²⁶ Milieux océaniques côtiers

²⁷ Relatif aux rivières

	Tropical					
--	----------	--	--	--	--	--

Chacun des objets et des milieux a ses spécificités et des modes d'investigations qui lui sont propres. Par conséquent, au cours de l'histoire des disciplines, des champs de compétences et des traditions de recherche se sont aussi structurés selon cet axe que je qualifierais d'objectal. Certains organismes ne sont étudiés que dans un type d'écosystème, alors que d'autres peuvent être transversaux à plusieurs biomes. Enfin, certains objets de recherche tendent à développer certaines parties de la théorie générale de l'écologie et à en laisser de côté d'autres. Par exemple, la biologie végétale ignore évidemment les théories de l'écologie du comportement qui sont le plus souvent appliquées aux mammifères ou aux oiseaux. Le choix d'un objet de recherche particulier rend spécifique certaines conclusions ce qui accroît une pluralité parfois irréductible. Mais en écologie, les grandes traditions sont suffisamment unifiées pour que la recherche de lois générales qui soient transversales aux différents taxa et aux différents biomes contrecarrent les particularismes obtenus par des recherches localisées.

3.3.4. Tendances monistes contemporaines

Cette histoire des différentes disciplines est utile à rappeler. D'abord, historiquement écologie et évolution étaient un champ commun d'investigation. De plus, Darwin utilisait aussi les résultats des sciences agronomiques, tout le chapitre de *L'origine des espèces* intitulé « Variations des espèces à l'état domestique » leur est consacré. Nous avons aussi vu que Haeckel traitait autant des bases physiques de l'écologie (reprises plus tard par Lindeman), que des considérations évolutionnistes. Donc, l'écologie de Darwin et Haeckel est un champ scientifique unifié par le paradigme puissant développé par Darwin. Mais ce champ va se fragmenter au cours de l'histoire en différentes composantes que nous avons étudié (nous avons néanmoins laissé de côté l'écologie du comportement et la systématique). Cette histoire pèse encore puisque nous avons vu que les noms des institutions ou des laboratoires se faisaient encore l'écho de ces grandes traditions de recherche.

Pourtant ces sous disciplines sont structurellement connectées. Si l'on résume : les sciences de l'évolution étudie l'évolution génétique des organismes au cours du temps, cette évolution dépend de la structure des communautés dans laquelle l'espèce étudiée vit, mais aussi des dynamiques de populations de chacune de ces espèces puisque la fitness de chaque individu dépend de la reproduction et de la mortalité et de la réponse de chacun des individus aux variations de l'environnement abiotiques (sol et climat) étudiées par l'écologie fonctionnelle.

Aujourd'hui, un retour à l'unité originelle de l'écologie est préconisé par de nombreux auteurs pour des raisons théoriques (e.g affiner le paradigme darwinien) et pour des raisons pratiques. En effet, chaque situation réelle sur laquelle la société veut agir est la conséquence de l'ensemble de ces processus. Par exemple, pour établir des recommandations pour adapter nos forêts aux changements climatiques, il faut savoir : (i) Comment ces forêts vont répondre aux variations du climat (écologie fonctionnelle) ? (ii) Quelles nouvelles structures forestières seront la conséquence de ces changements en termes de taille et d'âge des arbres caractéristiques qui conditionnent la gestion (dynamique des populations) ? (iii) Est ce que des espèces en

remplaceront d'autres et quels seront les impacts des insectes parasites (écologie des communautés) ? (iv) Une adaptation génétique des populations d'arbres aux nouvelles conditions environnementales aura-t-elle le temps de se produire (écologie évolutive) ?

Pour toutes ces raisons McGill et al., (2006) pensent qu'il faut refonder l'écologie des communautés à partir de l'écologie fonctionnelle pour mieux intégrer l'effet des filtres abiotiques.

« We assert that community ecology should return to an emphasis on four themes that are tied together by a two-step process: how the fundamental niche is governed by functional traits within the context of abiotic environmental gradients; and how the interaction between traits and fundamental niches maps onto the realized niche in the context of a biotic interaction milieu » p178

Kraft et al., (2007) démontrent la nécessité de relier les recherches sur les phylogénies (i.e. évolution sur le long terme) et l'écologie des communautés.

« Phylogenetic community structure is most meaningfully interpreted, from an ecological standpoint, in the context of community assembly theory ». p271-272

Johnson & Stinchcombe (2007) promeuvent plus largement une nouvelle synthèse entre écologie des communautés et écologie évolutive :

« A synthesis between community ecology and evolutionary biology is emerging that identifies how genetic variation and evolution within one species can shape the ecological properties of entire communities and, in turn, how community context can govern evolutionary processes and patterns. » p250

Holt (2009) explique que le concept de niche écologique gagnerait à prendre en compte la dynamique des populations :

« A cross-cutting conclusion from the discussion of ecological subtleties in the niche concept reflected on above is that patterns of dispersal and population connectivity are not merely perturbations of species' distributions from the inherent mapping of niches onto distributions, but are subtly woven into the very fabric of the niche itself. In like manner, patterns of dispersal playing out against a shifting mosaic of spatiotemporally shifting selective pressure and demographic asymmetries surely loom large in determining whether species' niches are highly labile or instead tightly conserved over evolutionary time » p19664

Si l'on prend au sérieux ces avis, la question de la réunification de l'écologie est donc centrale pour les chercheurs du domaine et ces pétitions de principe monistes sont importantes à prendre en considération.

3.4. Unité Linguistique

L'unification d'une discipline repose toujours en premier lieu sur une unification linguistique. L'harmonisation de savoirs, l'acquisition d'un langage commun était un

des enjeux que le cercle de Vienne avait promu. Cette unité revêt une importance car elle permet de relier des domaines différents entre eux. Dans les essais introductifs de l'encyclopédia Morris (Neurath et al., 1955) écrit :

« *The degree of unity or disunity of science reveals itself here in the degree to which the sciences have or can have a common linguistics structure* » p69.

Pour analyser ce qu'il en est en écologie, on peut mesurer le partage des concepts clés utilisés en écologie ou bien déterminer le niveau d'unification d'apprentissage de la discipline, ce qui passe par l'analyse des formations. La première méthode est probablement la plus puissante, mais elle demande un travail d'analyse lexicale qui est hors de notre portée à ce stade. Nous pouvons néanmoins lister certains des concepts clés en écologie :

Table 8: Liste des concepts clés de l'écologie

Nom	Principales sous-disciplines
Adaptation	Evolution
Plasticité	Evolution, fonctionnelle
Phénotype ²⁸	Evolution
Génotype	Evolution
Sélection naturelle	Evolution
Niche écologique	Communauté, fonctionnelle
Ecosystème	Fonctionnelle
Facilitation	Communauté
Compétition	Dynamique, communauté
Climax	Communauté, fonctionnelle
Successions	Communauté, dynamique
Stabilité	Dynamique
Diversité	Communauté
Productivité	Fonctionnelle
Chaîne trophique	Fonctionnelle, communauté
Complexité	Communauté
Cycle des éléments	Fonctionnelle

Ces concepts se sont parfois développés au sein d'une sous discipline de l'écologie, mais ils sont pour la plupart commun à toute l'écologie scientifique. Les chercheurs en écologie connaissent les concepts d'une autre sous discipline que la leur, car l'enseignement de l'écologie est en partie unifié. En effet, par exemple, en France avant la réforme LMD, l'écologie était enseignée dans les licences de Biologie des organismes et les Maîtrises de Biologie des Populations des Ecosystème. La spécialisation se faisait au cours du DEA, durant lequel, il existait néanmoins encore un tronc commun.

Actuellement en France les différentes formations en écologie sont les suivantes :

²⁸ En génétique, le phénotype est l'état d'un caractère observable (caractère anatomique, morphologique, moléculaire, physiologique, ou éthologique) chez un organisme vivant

Table 9: liste des formations françaises en écologie

Nom des Masters (2012)	Ville
Ecologie, Biodiversité, Evolution ²⁹	Paris
Ecologie ³⁰	Toulouse
Ecologie ³¹	Lille
Ecologie tropicale ³²	Kourou
Ecologie, Biodiversité ³³	Montpellier
Biodiversité, Ecologie, Environnement ³⁴	Grenoble
Sciences de la terre et environnement, écologie ³⁵	Bordeaux
Biodiversité Ecologie Environnement ³⁶	Rennes
Sciences de la Biodiversité et Ecologie ³⁷	Marseille

Au sein des masters sont ensuite proposés des parcours dans lesquels nous retrouvons en partie les différents sous disciplines de l'écologie. Par exemple, le master EBE (Paris), propose les quatre parcours de recherche suivant :

- Ecologie évolutive - milieux terrestres & marins
- Ecologie Théorique et Modélisation
- Biodiversité et Fonctionnement des écosystèmes
- Ingénierie écologique
- Biologie de la Conservation

L'acquisition d'un langage commun est donc assurée par l'existence de formations communes. Elle est renouvelée par la participation ensuite des chercheurs à des conférences communes d'écologie français (<http://www.ecologie2010.fr/>), européens (<http://www.intecol2013.org/>) ou américains (<http://www.esa.org/portland/>).

Néanmoins certains concepts posent problème et demandent une clarification car ils n'ont pas le même sens dans deux domaines. C'est le cas du concept de plasticité. En effet, la plasticité phénotypique d'un trait se définit en génétique comme la norme de réaction du trait à génotype constant en réponse à des variations biotiques ou abiotiques externes à l'organisme. La plasticité est donc une propriété d'un trait en réponse à un facteur externe donné, et non une caractéristique d'un individu. Néanmoins, dans la littérature une certaine confusion continue de régner. Certains écophysiologistes habitués à utiliser le terme d'acclimatation utilisent parfois encore le concept de plasticité quand ils comparent des populations différentes, alors qu'elles

²⁹ <http://www.master-ebi.u-psud.fr/>

³⁰ http://www.master-ecologie.ups-tlse.fr/71824385/0/fiche___pagelibre/&RH=ACC_MASTERECOLOGIE&RF=1296050539198

³¹ <http://master-ecologie.univ-lille1.fr/>

³² <http://calamar.univ-ag.fr/ecotrop/>

³³ <http://www.masters-biologie-ecologie.com/blog/>

³⁴ <http://www-biologie.ujf-grenoble.fr/SiteBio/index.php/offre-de-formation/masters/recherche/biologie-ecologie-environnement-majeure-bee-1ere-annee.html>

³⁵ <http://www.u-bordeaux1.fr/formation/formations-2011-2015/master-sciences-technologies-sante/oxcs-formation/diplome/BX1-PROG39101/BX1-PROG39101.html>

³⁶ <http://osur.univ-rennes1.fr/page.php?103>

³⁷ <http://www.masterset.fr/sbe/>

diffèrent génétiquement. D'autres auteurs parlent de plasticité à l'échelle d'individus ou de populations. Certains concepts nécessitent donc des clarifications quand différentes sous-disciplines entrent en dialogue. Mais globalement, le champ linguistique de l'écologie apparaît comme relativement unifiée, ce qui est une conséquence de la relative unification des institutions (laboratoires, département, revues) qui organisent la recherche en écologie.

3.5. Pluralité des méthodes de l'écologie

L'écologie apparaît comme une science éminemment plurielle du point de vue méthodologique. Comme l'écrivent Keller & Golley (2000), elle est tiraillée entre observations et théorisation :

« The differences in methodology is nicely illustrated in scientific ecology by two stereotypes : the field worker and the theoretical modeler. What is the best way to learn about the fundamental relationship between biota and the abiotic environment? Does one get out in the field, forest, or fen and indefatigably compile data from observations, trying to make sense of it later? Or is it better to work on computers and develop theoretical models? » p133

3.5.1. Les styles de Crombie

Nous avons vu dans l'analyse historique que la question des méthodes est aussi centrale. Elle est au cœur de la critique du monisme à laquelle se livre McIntosh. Mais derrière le mot méthode, il existe une pluralité de sens qu'il faut déjà clarifier. Il existe différentes façons de classer les différents types de recherche. Par exemple le concept de style de recherche a été développé par Crombie. Dans son cours au Collège de France de 2002-2003, Hacking (2003) les reprend :

« Le terme de style est adapté de l'historien des sciences, A.C. Crombie. Selon lui : Nous pourrions distinguer dans le mouvement scientifique classique six styles de pensée ou méthodes d'enquête et de démonstration scientifique (...) ». Voici sa liste, dans ses propres termes :

- 1. La méthode par postulats et dérivation des conséquences (l'établissement de postulats simples) en mathématiques.*
- 2. L'exploration et la mesure expérimentale de relations observables plus complexes.*
- 3. La construction hypothétique de modèles analogiques.*
- 4. La mise en ordre du divers par la comparaison et la taxonomie.*
- 5. L'analyse statistique des régularités dans les populations.*
- 6. La dérivation historique du développement génétique. » p541*

Certains de ces styles comme les trois derniers sont directement applicables à l'écologie, mais en fait l'écologie théorique utilise aussi le premier style et de nombreuses branches de l'écologie (e.g l'écophysiologie qui étudie la réponse des êtres vivants aux variations de leur environnement) comportent une forte composante expérimentale et relèvent du second style. L'écologie prise dans son ensemble utilise 5 des 6 styles définis par Crombie et elle est donc *de facto* éminemment pluraliste. Mais cette classification ne semble pas totalement opérante pour l'écologie. En effet,

dans le débat précédent sur le pluralisme en écologie, McIntosh référait explicitement aux modes d'inférences utilisés pour établir des vérités (induction, hypothético-déductif, IME). De plus, des différences très importantes en écologie, comme entre l'approche basée sur les processus et l'induction statistique ne se retrouvent que partiellement dans la distinction entre les styles 2 et 5.

Avant d'entrer dans le débat sur ce qu'il y a d'unité et de pluralité dans les méthodes pratiquées en écologie, il faut donc faire une analyse plus précise du concept de méthode. Reprenons le cycle Enoncé – Situation – Enoncé⁺ (E-S-E⁺). La méthode se caractérise par l'ensemble des moyens mis en œuvre pour que la séquence E-S-E⁺ soit un succès. Notons bien que la vision décrite précédemment où S est interchangeable facilement demeure paradigmatique car dans la réalité le poids de S (i.e situation scientifique) demeure fort. Une équipe et un chercheur est en effet encore souvent spécialisé dans un domaine et sur un objet. Par conséquent, les situations de recherche sont contingentées par cette spécialisation sur un objet. Mais nous utiliserons la séquence E-S-E⁺ pour analyser les différentes méthodes de recherche en écologie. Ce qui nous intéressera c'est le mode d'inférence utilisé, l'extension du domaine d'application de la situation scientifique S et le niveau de clarification des énoncés et de la plus-value informationnelle.

3.5.2. Dédutions théoriques

Le cas le plus simple est celui de l'écologie théorique qui est de fait une branche des mathématiques appliquées à une classe spécifique d'objets. Dans ce cas, on passe de E à E⁺ par un raisonnement déductif. L'originalité correspond dans ce à quoi réfère S. La situation scientifique n'en est pas vraiment une. S correspond ici le plus souvent à une classe de résultats en écologie qui ne sont pas expliqués. Plus S rend compte d'une classe de phénomènes dont l'extension est importante plus la plus-value informationnelle est forte et l'article théorique important. Plusieurs articles de ce type ont eu un rôle important en écologie, nous allons prendre un exemple en écologie des communautés. Longtemps il paraissait évident pour les écologistes que la diversité des espèces renforçait la stabilité des écosystèmes comme l'explique McCann (2000) dans un article publié dans la revue Nature.

« Before the 1970s, ecologists believed that more diverse communities enhanced ecosystem stability. A strong proponent of this view was Charles Elton, who argued that “simple communities were more easily upset than that of richer ones » p228.

Déjà Darwin écrivait dans l'Origine des espèces :

« Bien des circonstances naturelles nous démontrent la vérité du principe, qu'une grande diversité de structure peut maintenir la plus grande somme de vie » p164

De ce problème on peut déduire l'énoncé suivant :

E= Dans le milieu naturel, la stabilité augmente quand la diversité augmente

Puis en 1973, Robert May semble démontrer le contraire (McCann 2000) :

*« These early intuitive ideas were challenged by the work of Robert May in 1973. May turned to mathematics to rigorously explore the diversity–stability relationship. By using linear stability analysis on models constructed from a statistical universe (that is, randomly constructed communities with randomly assigned interaction strengths), May found that diversity tends to destabilize community dynamics ».*p228

E⁺ = Mathématiquement, la stabilité diminue quand la diversité augmente

La démonstration de May est purement mathématique. La plus-value informationnelle est claire, il existe une contradiction entre ce qui est rapporté par la communauté des écologistes et ce qui mathématiquement devrait arriver.

3.5.3. L'expérimentation in situ

Le second type de recherche concerne l'expérimentation *in situ* c'est à dire en milieu naturel. Reprenons l'exemple précédent, la structure est alors extrêmement simple, on part d'une hypothèse :

H : La stabilité augmente quand la diversité augmente.

Puis le chercheur met en place une expérimentation pour tester cette hypothèse David Tilman (1996) applique cette méthode pour tester H. L'expérimentation célèbre de Tilman mérite qu'on s'y arrête, cela donne une description de ce que peut être une situation scientifique dans ce type de recherche. Elle consiste en la mise en place de 4 parcelles de prairie pour lesquelles la culture agronomique a été abandonnée respectivement il y a 14, 25 et 48 ans pour les trois premières. La dernière parcelle est une prairie native brûlée tous les deux ans de manière à mimer le fonctionnement d'une savane. Chacune de ces parcelles est ensuite divisée en placettes à lesquelles sont assignées aléatoirement neuf traitements faisant varier l'apport en nutriments. La situation scientifique mise en place est à la fois restreinte par rapport à l'ensemble de la nature (système de prairie, un seul climat testé) et à la fois complexe (parcelles aux histoires passées différentes, différents modes de gestions, séquence temporelle forte de 12 ans, différents niveaux de stress hydrique et de richesse minérale).

Il obtient les résultats suivants

« Results demonstrate that biodiversity stabilizes community and ecosystem processes, but not population processes. Specifically, year-to-year variability in total aboveground plant community biomass was significantly lower in plots with greater plant species richness both for the entire 11-yr period and for the nine non-drought years. » p1

Pour analyser dans le détail la plus-value informationnelle, il faut comparer ces résultats à l'état des connaissances décrit en introduction. Tilman rapporte la séquence suivante :

1. Elton en 1958 donne de sérieux arguments indiquant que la perte de biodiversité entraîne une perte de fonctionnalité et de stabilité des écosystèmes

2. May démontre en 1973 théoriquement que la dynamique d'une population est moins stable quand le nombre d'espèces augmente
3. MacNaughton en 1977 donne raison à Elton avec des données issues du Serengeti, résultats confirmés par modélisation par King & Pimm en 1983.

Par conséquent, il n'y a pas de consensus, ce qui nous donne comme énoncé de départ du travail de Tilman:

E : Pas de consensus concernant le lien diversité-stabilité

L'expérimentation de Tilman montre que la biodiversité stabilise la communauté et les processus de l'écosystème (accumulation de biomasse) mais pas la dynamique de la population. La plus-value informationnelle peut être réduite à cela, mais en fait cela dit plus comme le conclut lui-même Tilman :

« These results support both the predictions of Robert May concerning the effects of diversity on population stability and the diversity-stability hypothesis as applied to community and ecosystem processes, thus helping to reconcile a long-standing dispute. » p1

E+ : Les deux énoncés sont vrais, il suffisait de mieux reformuler l'énoncé initial en séparant dynamique des populations des processus à l'échelle de la communauté interspécifique.

3.5.4. L'expérimentation ex situ

Le troisième type est assez classique ; c'est celui de l'expérimentation en laboratoire. L'écologie étudie les relations des êtres vivants et de leur milieu, elle favorise donc *a priori* les études *in natura* (ou *in situ*) mais pour tester certaines réponses des organismes aux variations de l'environnement les études en laboratoire et en conditions très contrôlées demeurent incontournables. Je vais prendre un exemple dans un domaine différent de l'écologie, celui de l'écophysiologie qui étudie les réponses des organismes aux variations de l'environnement. Un sujet important concerne la réponse de la photosynthèse des plantes aux différents facteurs du milieu dont la température, l'humidité de l'air ou la teneur en CO₂ de l'air. En 1980, Farquhar publie un modèle de photosynthèse devenu très célèbre, qui permet de prédire la réponse de la photosynthèse des plantes aux variations de lumière, de température et de CO₂ à partir des mécanismes physiologiques impliqués dans la photosynthèse. Nous reviendrons longuement sur ce modèle dans la seconde partie. En 2001, Bernacchi et collaborateurs réalisent une expérimentation pour améliorer les courbes de réponse du modèle de Farquhar à la température. Ils expliquent en effet :

« The temperature functions used in this model have been based on in vitro measurements made over a limited temperature range and require several assumptions of in vivo conditions. » p253

En effet, le modèle de Farquhar décompose la photosynthèse en deux composantes : la première est limitée par la lumière, la seconde par la carboxylation et notamment l'activité de la RUBISCO enzyme qui permet d'assimiler le CO₂ dans la production des sucres. *In vivo* on ne peut donner des réponses de chacune de ces composantes à

la température, Farquhar a donc travaillé *in vitro*. Les auteurs ont travaillé *in vivo* mais sur les plants transgéniques à faible teneur en RUBISCO pour lesquels la photosynthèse est donc toujours limitée par la carboxylation.

« In this study, transgenic tobacco containing only 10% normal levels of Rubisco were used to measure Rubisco-limited photosynthesis over a large range of CO₂ concentrations. From the responses of the rate of CO₂ assimilation at a wide range of temperatures, and CO₂ and O₂ concentrations, the temperature functions of Rubisco kinetic properties were estimated in vivo. These differed substantially from previously published functions. » p253

La situation expérimentale est hautement artificialisée. Certes, les auteurs travaillent sur des plantes entières (*in vivo*) mais c'est du tabac transgénique. Ils mesurent ensuite les échanges gazeux avec des appareils relativement complexes :

« Leaf gas exchange rates were measured using an open gas exchange system with independent [CO₂] control using a 6 cm² clamp-on leaf cuvette (LI 6400; LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA). (...). Leaf temperature was measured using a chromel-constantan thermocouple appressed to the lower leaf surface » p255

Enfin ces mesures sont réalisées en plus dans un contexte expérimental très spécifique pour s'affranchir d'autres effets qui pourraient impacter la photosynthèse :

« Photosynthesis was measured at PPFD³⁸ of 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ to prevent photo-inhibition from occurring. This PPFD was light-saturating for the genotype. PPFD was controlled using a red-blue led light source built into the leaf cuvette calibrated against an internal photodiode (LI-6400-03; LiCor, Inc.). The vapour pressure deficit in the cuvette was maintained between 0.5 and 2.0 kPa to prevent stomatal closure. » p255

Ce type d'expérience produit donc des situations scientifiques qui rendent compte d'une classe de phénomènes dont l'extension est extrêmement restreinte et qui tombe sous la critique de Cartwright (1980). Les faits et lois scientifiques produites par ce type d'expérience ne sont pas selon elle de nature à pouvoir expliquer le fonctionnement réel du monde naturel :

« Les lois qui expliquent par composition des causes échouent à satisfaire le réquisit de factualité » p227.

La limitation extensionnelle des résultats issus de ces expérimentations semble donc inhérente à ce type de situation scientifique qui implique structurellement une artificialité forte. Pourtant, Bernacchi et al., (2001) expliquent:

*« Because the properties of Rubisco enzyme kinetics are conserved among higher plants, the in vivo temperature functions developed with this research should provide increased accuracy of leaf, canopy, and global vegetation models. »*p253.

³⁸ Lumière photosynthétiquement active

Ils revendiquent donc un large domaine d'application de leurs résultats, qui pourraient rendre compte d'une très grande classe de phénomènes. L'histoire réelle de la discipline ne semble pas les contredire, le modèle de Farquhar de 1980 qui recueille plus de 3000 citations est utilisé dans la grande majorité des modèles de plantes agronomiques et forestières. Leur nouvelle paramétrisation de ce modèle a largement été utilisée et cet ensemble sert dans les modèles globaux de végétation aujourd'hui couplés aux modèles climatiques, qui permettent de développer des scénarios d'évolution de la biosphère. Les expériences très contrôlées et très locales rendent en général compte d'une classe restreinte de phénomènes, mais dans certains cas comme ici, elles servent par contre à expliquer une classe large de phénomènes. C'est une forme de paradoxe, entre la classe de phénomènes dont une expérimentation est censée rendre compte et celle plus grande dont elle rend effectivement compte.

Concernant les énoncés et le mode d'inférence, *a priori* l'expérimentation *in situ* fonctionne de la même façon que l'expérience *ex situ*. Nous sommes face à un raisonnement hypothético-déductif avec une hypothèse qui permet d'apporter une plus-value informationnelle à un énoncé ancien. Dans l'exemple pris cette lecture n'est pas si évidente, notamment car ici l'objectif est d'affiner l'estimation de paramètres d'un modèle de photosynthèse. Néanmoins, nous pouvons nous y rapporter avec les énoncés suivants :

E= Photosynthèse est une fonction f1 de la température

E+= Photosynthèse est une fonction f2 de la température, f2 procurant une plus grande adéquation empirique avec la réalité.

3.5.5. Observations

Le quatrième type de méthode de recherche est la compilation d'observations. L'objectif dans ce cas est de corrélérer certaines caractéristiques à d'autres. Pour exemplifier ce type de méthode, je vais partir de l'article de Wright et collaborateurs, publié dans la revue *Nature* en 2004 dont le résumé commence ainsi :

« *Bringing together leaf trait data spanning 2,548 species and 175 sites we describe, for the first time at global scale, a universal spectrum of leaf economics consisting of key chemical, structural and physiological properties. The spectrum runs from quick to slow return on investments of nutrients and dry mass in leaves, and operates largely independently of growth form, plant functional type or biome* » p 821

L'objectif était d'établir les corrélations entre les différentes caractéristiques des feuilles entre elles (appelées traits fonctionnels en écologie) et de voir si certains de ces traits sont structurés avec le climat. Toutes les plantes doivent acquérir de l'énergie et la transformer en matière par le biais de la photosynthèse et l'organe de cette conversion est majoritairement les feuilles. Les auteurs obtiennent deux résultats importants : (i) il existe différentes stratégies qui correspondent chacune d'entre elles à ce qu'on appelle un syndrome de traits (e.g feuilles à forte durée de vie et forte épaisseur mais à faible teneur en azote, faible capacité photosynthétique), (ii) ces traits sont finalement peu corrélés avec les variations spatiales du climat.

L'extension de la classe de phénomènes dont la situation scientifique (S) peut rendre compte est forte ; c'est ce qui fait l'intérêt de l'article. Dans ce type d'études, ce qui

importe d'abord c'est la qualité de l'échantillonnage (représentativité, taille) par rapport à la question sous-jacente.

Ici on discerne bien la conclusion mais il est assez difficile de traduire cela en énoncés E et E^+ . En effet, les auteurs ne tentent pas d'invalider une hypothèse comme dans les cas précédents. Il quantifie à une échelle nouvelle des variations déjà connues entre espèces décidues (perdant leurs feuilles) et sempervirentes (conservant leurs feuilles). La plus-value est plus dans l'extension de la classe des phénomènes dont S rend compte : ici ces stratégies sont quantifiées à l'échelle de la planète avec un très grand nombre de plantes.

Souvent les études corrélatives en écologie sont de ce type, elles valident un énoncé théorique pour un nouveau domaine d'extension des phénomènes (nouvelle espèce, nouveaux sites). Mais parfois elles peuvent faire émerger une contradiction avec un résultat théorique précédent, on retombe alors dans un schéma plus proche de celui décrit précédemment et qui concernent les expérimentations. Le mode d'inférence est plutôt inductif dans la partie « résultats », mais dans la « discussion », le raisonnement relève plutôt d'une inférence à la meilleure explication. En effet, pour interpréter des résultats, les auteurs recherchent dans les théories existantes des explications aux corrélations observées comme le montre bien la conclusion de l'article de Wright :

« The leaf economics spectrum reflects a mixture of direct and indirect causal relationships between traits. For example, the linkage of high A_{mass} ³⁹ with high N_{mass} ⁴⁰ is in large part the result of a direct causal relationship. Similarly, long LL ⁴¹ requires the robustness and low palatability (including chemical defences) associated with high LMA ⁴². More indirectly, high A_{mass} tends to be associated with short LL because it requires high N_{mass} and/or low LMA , which increase leaf vulnerability to herbivory and physical hazards, and because high A_{mass} drives fast growth, rapidly shading older leaves, leading them to senesce once their resources become more valuable when transferred to better-lit newer foliage » p826

3.5.6. Classification et histoire

Un cinquième type de méthode est la classification des formes du vivant. Elle correspond au style 4 de Crombie. C'est probablement la plus ancienne des méthodes. Elle consiste à comparer des êtres vivants entre eux à partir de leurs caractéristiques pour établir des classifications de ces mêmes êtres vivants. Aristote écrivait déjà :

« Certains animaux ont des parties qui ne sont identiques ni par la forme ni selon l'excès et le défaut, mais qui le sont suivant l'analogie, comme l'os à l'arête (...). C'est donc en vertu des parties que chacun possède en son particulier que les animaux sont identiques et différents, de plus, ils le sont par la position de ces parties (...) ».
p61

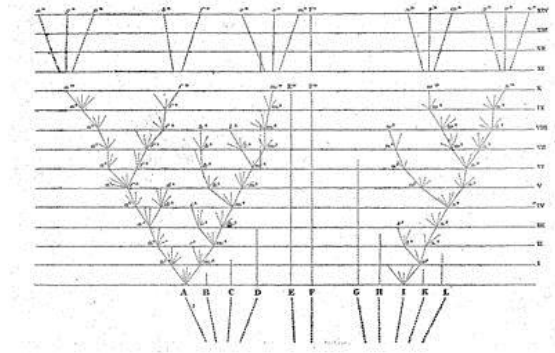
³⁹ Assimilation c'est à dire photosynthèse exprimée par unité de masse

⁴⁰ Quantité d'azote présente dans les feuilles, exprimée par unité de masse

⁴¹ Durée de vie des feuilles

⁴² Rapport entre la masse et la surface des feuilles : masse surfacique

La classification va se systématiser avec Linné, mais elle ne changera de sens radicalement avec Darwin car les différences de caractères sont alors connectées à une distance généalogique comme en témoigne le célèbre diagramme présent dans « *De l'origine des espèces* » :



Aujourd'hui la biologie moléculaire permet de revisiter les classifications car certaines portions du génome sont dites neutres, elles ne subissent pas la sélection et changent donc dans le temps uniquement du fait des mutations dont le taux peut être supposé constant. Ce processus donne une véritable horloge moléculaire. Prenons un exemple sur la classification des arthropodes (Giribet et al., 2001). Ils décrivent leurs objectifs de la façon suivante :

« Here we assess relationships within Arthropoda based on a synthesis of all well sampled molecular loci together with a comprehensive data set of morphological, developmental, ultrastructural and gene-order characters. » p 157

Ces classifications peuvent donc se ramener aux énoncés suivants :

E = classification entre des espèces ou des genres selon un diagramme A

E+= classification entre des espèces ou des genres selon un diagramme B avec B s'approchant plus de l'histoire phylogénétique réelle.

Ensuite ils décrivent leur méthode de recherche (Giribet et al., 2001) :

« The molecular data include sequences of three nuclear ribosomal genes, three nuclear protein-coding genes, and two mitochondrial genes (one protein coding, one ribosomal) » p157

La situation scientifique mise en place consiste souvent dans le choix des matériels végétaux (nombre d'individus par genre ou par espèce, origine de ces individus), puis des séquences de gènes à comparer.

La classe de phénomènes dont cette situation de science est censée rendre compte est particulière. Elle correspond à l'établissement de généalogies. Donc l'objectif est de rendre compte d'une histoire évolutive et non des mécanismes sous-jacents à cette évolution. Le mode d'inférence est du type IME, la meilleure explication de l'histoire d'une généalogie est donnée par le nouveau diagramme.

3.5.7. Modélisation par simulation

Le dernier type de méthode ou de style rencontré en écologie est la modélisation de type simulateur. Nous ne rentrons pas dans les détails. Une partie a déjà été explicitée lorsque nous avons traité du modèle de Farquhar, nous reviendrons de plus largement sur les modèles dans le chapitre suivant.

3.5.8. Conclusion : Un pluralisme irréductible des méthodes

J'ai résumé ces analyses dans le tableau suivant :

Table 10: Pluralisme méthodologique en écologie

	Extension de S	Mode d'inférence	Lisibilité des énoncés
Déduction théorique	Maximale	HD	Forte
Expérimentation in situ	Faible	HD	Forte
Expérimentation ex situ	Faible à forte	HD	Forte
Observation	Faible à forte	I	Faible
Classification	Faible à forte	IME	Forte
Modélisation par simulation	Faible à intermédiaire	IME	Faible

En écologie, différentes méthodes sont utilisées pour aboutir à un résultat scientifique. L'observation de phénomènes en milieu naturel et les études corrélatives fournissent une masse importante de données. Mais en général, comme nous l'avons vu en discussion les auteurs interprètent les résultats corrélatifs pour en déduire des chaînes causales à partir des connaissances existantes. Ces connaissances existantes proviennent d'expérimentations ou d'hypothèses théoriques acceptées par la communauté. Dans un même article on peut donc trouver des inférences inductives (corrélations statistiques), des inférences à la meilleure explication et de l'hypothético-déductif stricte.

Enfin aucun style ni aucun mode d'inférence n'a finalement supplanté les autres malgré certaines tentatives bien exprimées par McIntosh. Il ne semble donc pas qu'il y ait dans les faits un monisme. D'un point de vue normatif, il serait difficile de se prononcer pour la suppression d'un de ses modes de recherche. Ils jouent tous un rôle important. D'ailleurs, le fait qu'un mode d'inférence soit plus fiable qu'un autre est un long débat finalement non tranché par l'épistémologie sur lequel nous pouvons rapidement revenir.

L'induction a d'abord été critiquée par Hume. Popper (1979) rappelle et reformule les deux problèmes de l'induction soulevés par Hume. Le problème psychologique (Hp) est que du fait de l'habitude, nous nous attendons à ce que l'expérience de répétitions, nous permette de prédire un nouveau phénomène que nous n'avons pas expérimenté. Pourtant, le problème logique (Hl) est que nous ne sommes pas justifiés à raisonner à

partir de cas répétés dont nous avons l'expérience sur d'autres cas que nous n'avons pas encore expérimentés (e.g levée du soleil au-delà du cercle polaire arctique). Par conséquent, Popper (1979) explique :

« Des énoncés expérimentaux vrais, quel qu'en soit le nombre, ne sauraient justifier l'affirmation qu'une théorie universelle est vraie » p47

Par contre, pour Popper : *« le fait d'admettre la vérité de certains énoncés expérimentaux nous autorise parfois à justifier l'affirmation qu'une théorie explicative universelle est fausse »*. p47.

De cette critique, Popper conclut à la primauté de la connaissance conjecturale qui mène au raisonnement hypothético déductif. Néanmoins, à l'échelle des théories, la possibilité de falsifier ou non une théorie dans son ensemble n'est pas possible comme l'ont montré selon Gillies (1993) Duhem et Quine.

Nous l'avons partiellement entrevue avec nos exemples. Il est en fait difficile dans un article même basé sur une méthode expérimentale d'isoler clairement les énoncés. De ce fait une expérience quand elle invalide une hypothèse ne peut pas conclure directement sur la valeur de vérité de l'énoncé, il se peut que le faux provienne des arrières plans théoriques qui justifient l'énoncé ou qui structurent le dispositif expérimental mis en place.

L'IME va elle aussi être fortement critiqué notamment par Larry Laudan (1981) car rien ne nous dit que dans les hypothèses choisies pour expliquer un phénomène on ait l'ensemble des hypothèses qui comprennent la meilleur. Ce à quoi, dans le débat entre réalisme et antiréalisme, Boyd (1983) montre que l'IME est un mode d'inférence qui est sur le même bateau que la déduction et l'induction. Finalement, aucun des modes d'inférences n'est en fait justifiable *a priori*.

3.6. Unité épistémologique et réductionnisme

Nous avons donc traité l'unité et la pluralité du point de vue des fins et des méthodes, il est maintenant temps d'examiner ce qu'il en est des contenus scientifiques. C'est l'objet de l'article de Mitchell, que nous avons étudié dans la première partie qui portait comme titre *« Pluralism without integration »*. L'unité ou l'intégration si on reprend le terme de Mitchell peut se faire dans deux directions. Face à un phénomène, on peut chercher à l'expliquer par réduction verticale, c'est à dire en expliquant le phénomène à partir d'autres phénomènes agissant à une échelle plus fine. Cette intégration pose la question du réductionnisme et du holisme. Il est d'abord important d'étudier quand et pourquoi ce type de réduction verticale est nécessaire avant d'examiner s'il est possible. Le second type d'intégration consiste à rechercher une unité horizontale, qui met en cohérence deux points de vue différents sur un même objet.

J'utiliserais le terme de réduction dans le sens qu'Ernst Nagel (1979) lui donne :

« Reduction, in the sense in which the word is here employed, is the explanation of a theory or a set of experimental laws established in one area of inquiry, by a theory usually though not invariably for the same domain » p338

Le concept de réduction est donc asymétrique et produit une hiérarchie épistémique puisqu'il y a une théorie réduite par une autre. La théorie première dispose d'un pouvoir explicatif supérieur à la théorie secondaire puisque la réduction est censée expliquer la seconde. Chez Nagel comme chez Carnap la réduction est avant tout explicative c'est une réduction nomologique, elle n'implique pas forcément une réduction ontologique (Nagel 1979) :

« Throughout the present discussion stress has been placed on conceiving the reduction of one science to another as the reduction of one set of empirically confirmable statements from another such set. However, the issues of reduction are frequently discussed on the supposition that reduction is the derivation of the properties of one subject matter from the properties of another ». p364

Pour Nagel, la réduction ontologique, celle qui a trait aux propriétés de la matière et du réel, pose plus de problèmes et il adopte une position antiréaliste vis à vis de la nature ontologique des inobservables (Nagel 1979) :

« We must now briefly indicate that the conception of a reduction of properties from other properties is potentially misleading and generates spurious problems. The conception is misleading because it suggests that the question of whether one science is reducible to another is to be settled by inspecting the « properties » or alleged « natures » of things rather than by investigating the logical consequences of certain explicitly formulated theories. For the conception ignores the crucial point that the nature of things, and in particular of the elementary constituents of things are not accessible to direct inspection (...). » p364

Dans notre analyse des réductions, il nous faudra bien séparer l'aspect nomologique de l'aspect ontologique, que nous traiterons dans le chapitre suivant. Enfin il est nécessaire de distinguer ce concept de réduction de celui d'intégration qui consiste en une mise en cohérence de différentes théories, mise en cohérence qui prouve leur compossibilité (je reprends à dessein le terme de Leibnitz).

3.6.1. Réductionnisme verticale et holisme en écologie

Comme le rapporte Steel (2004), Kitcher explique que le fait que la biologie n'a pas été réduite à la seule biologie moléculaire depuis Watson & Crick semble montrer que le programme réductionniste a échoué.

« Apparently, if reductionism were right, then all provinces of biology other than molecular biology would be, in principle at least, superfluous » p55

A l'origine l'écologie est une science plutôt holiste qui s'intéresse au fonctionnement des groupes d'individus d'une même espèce (population) ou entre espèces au sein d'un même écosystème (écologie des communautés, écologie fonctionnelle). La notion de propriétés émergentes est centrale en écologie, une population est par exemple caractérisée par un accroissement moyen de la population ou une diversité allélique pour un gène, traits propres à la population qui n'ont aucun sens à l'échelle de l'individu. De plus nous retrouvons en écologie nombre d'exemples de ce que Fodor a appelé la multi-réalisabilité (Fodor 1974):

« Il y a trois raisons pour lesquelles les chances qu'à chaque espèce naturelle correspondent à une espèce physique sont minces. (a) On peut souvent obtenir des généralisations intéressantes (notamment des généralisations compatibles avec des situations contrefactuelles) concernant des événements dont les descriptions physiques respectives n'ont rien à voir l'une avec l'autre. (b) Il arrive souvent que la vérité, la fécondité, le degré de confirmation, ou n'importe qu'elle autre propriété épistémologiquement importante de ces généralisations ne soit pas le moins du monde affectée par le fait que les descriptions physiques des événements auxquels s'appliquent ces généralisations aient ou non quelque chose en commun. (c) La tâche des sciences particulières est fréquemment de formuler des généralisations de ce genre » p425

Fodor (1974) complète ce raisonnement par une figure qui montre pourquoi expliquer les lois d'une science particulière par des prédicats disjonctifs d'une science dite plus fondamentale peut s'avérer complexe et entraîner une augmentation inutile des causes invoquées.

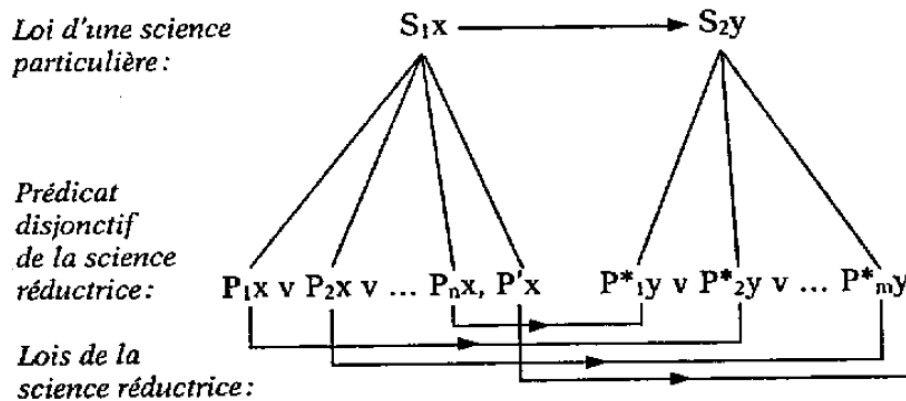


Figure 3: Illustration de la multi réalisabilité (Fodor 1974)

L'écologie nous donne de nombreux exemples de ce type. Une même fonction (e.g le vol) peut être réalisée par des structures totalement différentes (ailes des oiseaux et des insectes). En biochimie la production d'une même protéine peut aussi suivre des voies distinctes. La réduction peut alors compliquer la compréhension d'un point de vue fonctionnel (Figure 3). Ces caractéristiques de l'écologie devraient la rendre sourde aux logiques de réductions verticales.

Or ce n'est pas aussi simple. Nous avons vu dans les parties précédentes que l'écologie était connectée à la physique et aux autres domaines de la biologie. Depuis, Haeckel le vitalisme a été abandonné et si la biologie comme l'écologie reconnaît la spécificité de certains niveaux d'intégrations, aucun écologiste ne remet en question le fait que les lois physiques s'appliquent à la biologie et par extension à l'écologie. Par conséquent, du point de vue ontologique, il est évident que ce que nous observons à une échelle donnée peut s'expliquer par des changements à une échelle inférieure. Et la recherche de ces explications physiques a été permanente en écologie.

Le fait que l'écologie fonctionnelle étudie les flux de matière et d'énergie a conduit cette partie de l'écologie vers un réductionnisme vertical. La réponse de la photosynthèse aux variations environnementales a été étudiée à l'échelle intra

cellulaire. En effet, la lumière est absorbée par la membrane des chloroplastes et la capacité d'absorption de l'énergie lumineuse dépend de protéines membranaires. L'assimilation du carbone dérive en plus de l'énergie disponible de la teneur en CO₂ au niveau des sites de carboxylation et cette teneur découle de l'ouverture ou non des stomates. La même réduction est nécessaire dans de nombreux autres domaines. D'autre part, l'unification de l'écologie et de l'évolution conduit l'écologie évolutive à explorer les liens entre gènes et phénotypes. Si l'écologie fonctionnelle base ses théories à partir des connaissances de la physique, de la physiologie et de la biochimie, l'écologie évolutive dépend de plus en plus de la biologie moléculaire. Nous sommes donc face à une discipline qui paradoxalement a fait du holisme et de la diversité des processus un argument central pour justifier son existence (et son autonomie vis à vis de la biologie et de la physique) et qui pourtant dans les faits opèrent au cas par cas des réductions verticales fortes.

Mais pour Steel (2004), il n'y a pas de contradiction entre le pluralisme affichée de la biologie et de l'écologie et l'emploi du réductionnisme vertical. Il y a d'abord selon lui, plusieurs types de réductionnisme, qui correspondent à différents objectifs.

« I introduce four possible goals of reduction: ontological parsimony, unification, decomposition, and correction. I show how these four potential reductive goals can be used as the basis for a categorization of distinct varieties of reductionism and to specify what reductionisms are appropriately associated with the “reductionist anti-consensus ». p59

Steel (2004) réalise donc une typologie des différents objectifs poursuivis lors d'un processus réductionniste :

1. La parcimonie ontologique vise à limiter le nombre d'entités.
2. L'unification a pour objectif de subsumer une large diversité de généralisations sous un nombre réduit de généralisations plus fondamentales.
3. La décomposition vise à expliquer le fonctionnement d'un système donné par la compréhension des dynamiques de ses parties.
4. La correction permet d'identifier et d'expliquer des exceptions à des généralisations moins fondamentales à l'aide de généralisations et de détails obtenus à partir d'une description plus fondamentale.

Steel (2004) énonce trois thèses anti-réductionniste :

- i. Il existe de multiples stratégies légitimes de représentation de la nature : *« principle of multiple perspectives »* (Kitcher)
- ii. Il n'y a pas de représentation idéale qui suffirait à répondre à tous les objectifs d'explication *« non-completeness »* (Kitcher)
- iii. Il y a différents niveaux d'explication potentiellement autonome. *« autonomy of levels »* (Dupré)

Et Steel (2004) montre que le premier principe pluraliste (i) est compatible avec toutes les formes de réductionnisme et que les deux autres principes (ii, iii) sont compatibles avec des versions modérées du réductionnisme. Pour analyser la pertinence d'un programme réductionniste donné, il faut en regarder les conséquences au cas par cas. Pour Steel (2004), on a donc surestimé les problèmes posés par la

multi-réalisabilité et le réductionnisme au cas par cas (« token-token ») est d'ailleurs compatible avec un pluralisme ontologique.

« Token-token reductionism asserts, in effect, that it is always possible (in principle) to provide a causal explanation of a particular biological event at the molecular level. This does imply that representations at this level are sufficient for a particular set of explanatory purposes » p68

Il me semble que les réductions opérées en écologie valident l'analyse de Steel. Si l'on prend l'exemple du modèle de photosynthèse de Farquhar (1980). Celui-ci permet de prédire la réponse de la photosynthèse aux facteurs du milieu en prenant en compte le fonctionnement biochimique à l'échelle des chloroplastes. Par rapport, aux théories précédentes de photosynthèse, le modèle réducteur est moins parcimonieux, car il implique plus de variables et plus de processus. Par contre, il rend mieux compte de la réponse de la photosynthèse à la lumière notamment lorsque de la teneur en CO₂ varie, il joue donc un rôle de correction et de décomposition. Ce modèle a eu une immense importance notamment depuis que la question des changements climatiques est devenue centrale, parce qu'il prend explicitement en compte l'évolution des teneurs en CO₂ et l'impact des variations de températures. Cela renforce l'idée de réduction au cas par cas.

Le modèle d'Enquist et al., (1998) développe lui une relation entre la densité et la masse à partir d'une théorie métabolique :

« Here we use this relationship to develop a mechanistic model for relationships between density and mass in resource- limited plants. It predicts that average plant size should scale as the $-4/3$ power of maximum population density, in agreement with empirical evidence and comparable relationships in animals, but significantly less than the $-3/2$ power predicted by geometric models » p163.

Ce modèle relève plus d'une réduction de type unificatrice.

Le fait que le débat entre holisme et réductionnisme nécessite une meilleure clarification des termes est aussi pointé par Keller & Golley (2000) :

« The reductionism/holism debate, of course is not black and white. David Blitz (1992 :178) discerns several shades of gray by identifying five epistemic/metaphysical methodologies along a reductionism/holism continuum » 171

Je reproduis ici le tableau que propose Blitz en 1992 car il me semble pertinent:

Table 11: Différents engagements du débat réductionnisme holisme (Blitz 1992)

Méthodologie	Ontologie	Epistémologie
Thèse réductionniste	Les propriétés du tout sont toujours obtenues à partir des propriétés des parties	La connaissance des parties est à la fois nécessaire et suffisante pour comprendre le tout
Thèse mécaniste	Les propriétés du tout sont les effets des parties et de	Connaître le type de causes suffit à comprendre

	leur structure	le type d'effets
Thèse émergentiste	Certaines propriétés du tout ne sont la propriété d'aucune des parties	La connaissance des parties est nécessaire mais non suffisante à la connaissance des parties
Thèse organiciste	Les parties n'existent pas indépendamment du tout	La connaissance du tout est nécessaire pour comprendre les parties et vice versa
Thèse holiste	L'unité de base est le tout qui est indépendant des parties	La connaissance des parties n'est ni suffisante ni nécessaire à la connaissance du tout

Finalement, si l'on suit la classification de Blitz, l'écologie ne se retrouve au sens strict ni dans la théorie holiste ni dans la théorie réductionniste. Il me semble que l'écologie a comme pétition de principe la thèse organiciste, qui la pousse à étudier ou tout du moins à prendre en compte le plus possible le « tout », la biosphère, le biome ou l'écosystème. Mais dans la pratique des recherches, selon les classes de phénomènes, les écologues mettent en œuvre soit la thèse émergentiste, soit la thèse mécaniste. L'écologie reconnaît donc une relative autonomie des niveaux, mais les chercheurs n'hésitent pas pour expliquer un phénomène à opérer des réductions mécanistes au cas par cas. Odum reconnaissait déjà cette double nécessité réductionniste et holiste (cité dans Keller & Golley 2000) :

« It is self evident that science should not only be reductionist in the sense of seeking to understand phenomena by detailed study of smaller and smaller components, but also synthetic and holistic in the sense of seeking to understand stand large components as functional whole » p177

Ces réductions ne sont possibles que si les différents niveaux peuvent communiquer et donc si les théories entre les différents niveaux sont compatibles en termes épistémiques (théories compatibles) et sémantiques (langage commun). L'absence de compatibilité entre ces niveaux hiérarchiques est même heuristique : cela conduit les chercheurs à les rendre compatibles et donc à trouver les principes ponts reliant ces différents niveaux. Notons au passage, que la réduction verticale en écologie ne s'apparente finalement que faiblement au schéma général de réduction proposée par Nagel. En effet, la pratique de réductions au cas par cas rend caduque l'idée qu'une théorie dans son ensemble est totalement réduite à une autre. Comme dans une mine, les chercheurs qui opèrent une réduction suivent une veine et ne systématise pas forcément la réduction.

Ces réductions requièrent la compossibilité comme la simple intégration défendue par Mitchell, mais la portée explicative est bien présente, c'est donc plus qu'une intégration. Ce programme réductionniste diffère du programme réductionniste de Oppenheim & Putnam (1958), car il ne nie, ni la possibilité de recherches fructueuses à un niveau donné sans réduction, ni l'impossibilité dans certains cas d'effectivement opérer ces réductions. Pour le dire autrement, le réductionnisme n'est ni toujours nécessaire, ni toujours possible. Or Oppenheim et Putnam semblaient donner une

valeur normative et inéluctable au réductionnisme qui me semble contredit par les faits en écologie.

Mais l'existence de laboratoires dont l'intitulé est « *Biodiversité, gènes et communautés* » ou d'articles ayant pour titre « *From genes to ecosystems: an emerging synthesis of eco-evolutionary dynamics* » (Bailay et al., 2009) sont la preuve que le réductionnisme vertical est bien à l'œuvre en écologie, et ce malgré les difficultés que cette forme de réductionnisme entraîne (notamment relié à la multi-réalisabilité).

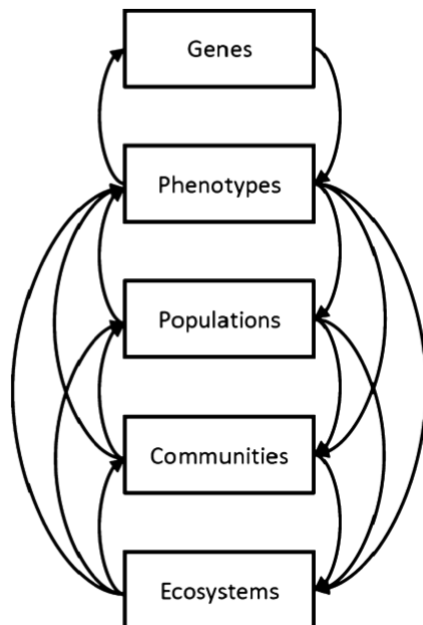


Figure 4: Modèle conceptuel des boucles de rétroaction entre niveaux d'organisations (Bailay et al., 2009)

L'impact de ce réductionnisme vertical sur la tension entre pluralité et unité est double. A l'échelle du corpus scientifique global, ce réductionnisme renforce l'unité linguistique et sémantique parce qu'il requiert une unité de langage et une compatibilité des théories. A l'échelle de l'étude d'un phénomène, il peut par contre renforcer la pluralité du fait de la multi-réalisabilité. En effet, puisqu'un phénomène à l'échelle supérieure peut être produit par plusieurs causes, on multiplie la complexité causale du processus étudié. Mais la réduction verticale permet aussi de délimiter des niveaux hiérarchiques, les niveaux supérieurs agissant comme cadre pour les niveaux inférieurs et les niveaux inférieurs étant responsables de certains phénomènes observés aux niveau supérieur. Picket a proposé la hiérarchie ordonnée suivante (Keller et Golley 2000) :

Biosphere, Ecosystème, Communauté, Population, organisme, tissu, cellule, structure sub-cellulaire, molécule.

Ce type de hiérarchisation produit à la fois de l'unité en terme d'organisation des connaissances pour peu que des ponts existent entre ces niveaux, mais tend aussi à diviser la réalité ontologique d'une entité en une pluralité d'entités emboîtées, ce qui nous conduit sur le terrain ontologique

3.6.2. Intégration horizontale

L'intégration horizontale vise à connecter plusieurs théories issues de différentes traditions de recherche. C'est en grande partie, ce dont il était déjà question dans l'article de Dietrich & Mitchell, que nous avons étudié dans la partie précédente. Un même phénomène en écologie est toujours la conséquence d'une pluralité de causes comme l'expliquent Dietrich & Mitchell (2006) :

« Thus, pluralism in the explanations of some feature of the biological world might refer to competing hypotheses (endemic vs. novel in a particular population) or multiple contributing causes (climate change and disease acting jointly) or multiple constellations of causes (climate change and disease in one population and disease and nonnative species in another) acting in different contexts or at different times. There is little evidence to suggest that any single causal factor typically accounts for the total effect or that any successful causal explanation appealing to one or many causal factors will account for all cases in all contexts. Thus, any simple hypothesis will fail to generalize and thus fail to adequately explain similar effects in all situations. » p73

Nous avons déjà noté que l'inexistence d'une cause unique à un phénomène ne veut pas dire qu'il n'existe pas de lois ou de mécanismes unificateurs pouvant subsumer cette pluralité sous une unité (comme la synthèse néodarwinienne le montre). Ce type d'intégration horizontale est très commun en biologie comme en écologie. Il est souvent utilisé pour expliquer un phénomène complexe observé dans la nature : un feu, un dépérissement, une modification de la répartition des populations... Contrairement au réductionnisme vertical, la plupart du temps, cette intégration n'est pas une réduction. On ne cherche pas à expliquer une théorie à l'aide d'une autre comme dans l'approche de Nagel, on explique un phénomène à partir de la synthèse de plusieurs théories. Cette intégration requiert tout de même que les théories soient compatibles, notamment quand on veut coupler des modèles numériques. Il faut donc qu'elle participe d'un même arrière-plan sémantique et épistémologique. Ce type d'intégration suppose donc une certaine forme d'unité (au moins linguistique et sémantique) mais plus important elle pose un problème ontologique : peut-on expliquer un phénomène local et historicisé (un feu par exemple) à partir de lois ou de théories ?

3.7. Les paradoxes produits par la question ontologique

Barberousse et al. (2000) rappellent que la science a longtemps tourné le dos à la question ontologique de la nature des entités observés :

« La science cherche à expliquer ce qu'il y a dans le monde. Mais peut elle répondre à la question, beaucoup plus générale, qui consiste à déterminer ce qu'il y a dans le monde ? » p200

Selon eux, renoncer à traiter la question métaphysique de la nature des choses n'est plus possible. D'abord, les sciences jouent un rôle central dans la façon dont nos sociétés voient le monde, elles sont donc sans cesse questionnées sur la nature même des choses et des processus. D'autre part, les sciences sont elles mêmes contaminées par la dimension ontologique, la plupart des théories présentant implicitement des

engagements ontologiques. Nous avons vu dans le débat entre Gleason et Clements que la question de la nature des associations végétales est centrale dans leur controverse.

Six types d'entités ont été listés par Ferré (1996). Les entités agrégées comme le granite sont caractérisées par des relations externes entre leurs parties. Les entités systématiques qui incluent les écosystèmes sont caractérisées des boucles de rétroactions. Les entités formelles sont des fictions basées sur l'intention subjective de l'observateur. Les entités organiques comme les individus sont faits de parties qui sont reliées entre elles et dont le fonctionnement global assure la survie de l'entité. Les entités fondamentales comme les molécules organiques présentent des relations internes fortes mais sans système dynamique apparent. L'écologie a trait à au moins trois de ces types : entités systématiques, entités formelles et entités organiques.

Une autre typologie plus simple est communément utilisée. La question ontologique présente deux aspects : la nature des entités théoriques et la nature des entités observationnelles. Cette distinction n'est pas évidente puisque nous savons que l'observation est toujours en partie guidée par des présupposées théoriques. Mais si l'on reprend l'exemple des associations végétales, Clements distinguait une association végétale donnée (appelé série) que nous observons sur le terrain et que nous caractérisons par la mesure de la présence et de l'abondance des différentes espèces qui la composent et le concept d'une certaine association végétale (e.g. *Fagetum Sylvaticae*) qui subsume toutes les hêtraies européennes sous le même concept. Nous traiterons du problème de la nature des inobservables dans le chapitre suivant qui concerne la modélisation. Nous mettrons aussi ici de côté la réflexion sur la nature ontologique des processus, qui nous sera plus simple de traiter avec la modélisation.

Regardons les problèmes issus de la nature des entités observables donc dans la typologie de Ferré : les entités systématiques comme la série et les entités organiques. Souvent, ces entités observationnelles sont ignorées et le problème ontologique est surtout posée en ce qui concerne les inobservables (débat réalisme-antiréalisme), car la nature des observables ne semblent pas poser de problème. Or ce n'est pas le cas. En effet, ce que nous observons est déterminé spatialement et temporellement. Comment choisir l'endroit dans l'espace et le moment dans le temps de telle façon que l'entité soit réellement définie et relativement fixe ?

L'écologie constitue une source de réflexions pour cette question. En effet, Keller et Golley (2000) rappelle que l'écologue travaille à la fois sur les structures, les patterns spatiaux et sur les dynamiques et les patterns temporelles. Sa réflexion métaphysique sur l'ontologie des entités et des processus est donc très ancienne, mais finalement elle demeure peu aboutie, notamment en ce qui concerne les processus. Le premier problème auquel est confrontée l'écologie est l'existence d'entités au contour flou. Il y a continuité temporelle et spatiale dans tous les processus étudiés. La définition d'une entité ne peut se faire que selon un point de vue et une échelle donnée, cette définition est donc essentiellement relative. Le plus souvent elle passe par la reconnaissance de similarités de structure, de composition ou d'évolution. L'écologie se caractérise aussi par l'existence d'une réflexion sur les hiérarchies (voir aussi 3.6). Les entités écologiques sont imbriquées les unes dans les autres comme des poupées

russes. La continuité des processus et l'imbrication des entités fait que leur délimitation n'est donc pas simple.

Même l'ontologie d'un phénomène est problématique. A un moment donné, le scientifique observe un phénomène, par exemple la mort d'une population d'arbres. Or ce phénomène s'inscrit dans un espace et dans l'écoulement du temps, il est donc connecté avec ce que j'appellerais le reste du monde. En effet, les causes de la mort d'un arbre donné dans une forêt sont en fait multiples, voir infini. Chaque événement porte donc en lui le monde dans sa totalité. La recherche ontologique la plus locale aboutit au holisme le plus intégral. L'écologie a parfaitement compris cette tension, c'est le sens même de la pétition de principe organiciste que nous évoquions précédemment et qui est exprimée dans l'hypothèse Gaïa⁴³ (Lovelock & Margulis 1974). La dissolution de l'être d'une entité dès qu'on tente scientifiquement de s'en approcher est aussi mise en relief par Kupiec (2012), qui démontre que notre notion même d'individu est problématique notamment à cause des lignées germinales (quelle est la nature ontologique des gamètes ?) ou par Dawkins (1976) qui réduit l'individu au simple avatar de ses propres gènes.

Pourtant, l'écologue doit dire quelque chose du phénomène observé qu'il traduit en un énoncé (e.g les arbres du Ventoux sont morts) et de ces entités (e.g les arbres). Et il arrive parfois à dire quelque chose de suffisamment censé pour que cela soit utilisé de façon pratique. Pour expliquer cela, j'utiliserais une analogie. En génétique, l'expression d'un phénotype donné est souvent la conséquence d'un grand nombre de gènes, mais certains ont plus d'effets que les autres, qui sont alors nommés « gènes à effets majeurs ». Il me semble que tout phénomène naturel est la conséquence de causalités multiples, mais certaines causes sont à effet majeur et si on multiplie l'analyse de phénomènes relatifs à une même entité, alors le scientifique peut en déduire pour ce type d'entités, le complexe des causes qui les font en moyenne évoluer. L'entité est alors définie par ses propriétés ce qui revient à la définition intentionnelle des concepts.

Cette façon de voir le problème ontologique permet de réconcilier d'une part l'unicité de chaque individu et de chaque collection d'espèces ou d'individus, qui donc est une source irréductible de diversité et de pluralité et d'autre part la possibilité de délimiter et d'unifier cette pluralité. Mais, il semble que la résolution du paradoxe de la nature ontologique d'un phénomène, dont la nature semble indissociable du reste du monde, ne peut se résoudre que par une réflexion sur la nature ontologique des inobservables

3.8. Conclusion provisoire : le pari d'un monisme heuristique, la reconnaissance de pluralités irréductibles

Ce travail d'analyse des différentes sources de pluralités en écologie a été long. Mais il m'a permis d'abord de faire un état des lieux du débat, ensuite d'en déduire les nécessaires clarifications que nous devons apporter à ce débat, avant de proposer une typologie des différentes sources de pluralité.

⁴³ Le système autorégulé constitué par la totalité des êtres vivants (biomasse) et des constituants non vivants composant la masse totale de la Terre, et sans doute aussi le rayonnement solaire extérieur, possède des mécanismes internes pouvant le faire considérer comme un être vivant.

Notre première conclusion est que la volonté unificatrice en écologie est quasi paradigmatique. Elle est présente évidemment chez Darwin et Haeckel, mais elle s'est reposée régulièrement comme en témoigne la réaction de McIntosh et les articles récents qui promeuvent l'unification des différentes branches de l'écologie. Cette unification présente une base solide car l'écologie apparaît relativement unifiée du point de vue institutionnel (revue, département, laboratoires), comme du point de vue linguistique. Le monisme n'est donc pas seulement l'effet de l'importation d'idées régulatrices dans un champ scientifique éminemment plurielle comme semblait le suggérer McIntosh. La thèse moniste semble en écologie émerger de façon interne à l'histoire de la discipline. Finalement, comme dans le débat entre réalisme et antiréalisme, il est possible que l'histoire de chacune des disciplines tranche le débat entre monisme et pluralisme.

Néanmoins, cette naturalisation du débat, permet aussi d'éviter les pétitions de principes du type : il faut unifier, il faut réduire. En effet, ce travail d'analyse des pluralités démontre aussi l'existence d'obstacles récurrents à la résorption des pluralités.

Le premier obstacle est la conséquence du fonctionnement de la science moderne. Après Darwin et Haeckel, l'écologie et les sciences de l'évolution ont évolué séparément. Au sein même de l'écologie, de nouveaux concepts ou de nouvelles méthodes ont conduit à des développements disciplinaires locaux. Par conséquent, l'écologie du XX^{ème} siècle a été divisée en différentes sous disciplines dont nous avons essayé d'établir la généalogie : écologie évolutive, écologie fonctionnelle, écologie des communautés et dynamiques des populations. Une autre compartimentation s'est opérée selon les objets d'études dont les spécificités dépendent du type de milieux (e.g marin ou terrestre) et/ou du type d'organisme (e.g végétal ou animal). Néanmoins, ce premier obstacle semble en partie surmontable du fait de l'existence d'enseignements ou de colloques communs. Il existe maintenant un champ scientifique unifié de l'écologie.

Le second obstacle gît dans la tension entre unicité et connectivité. Chaque objet d'études en écologie est unique. Il n'existe pas deux organismes semblables, nous ne trouverons jamais deux communautés dont les compositions soient identiques, et deux écosystèmes ne sont jamais le lieu de flux de matière et d'énergie similaires. Cette unicité se conjugue à une forte connectivité. En effet, les systèmes écologiques sont des systèmes ouverts. L'énergie à la base de toutes les chaînes trophiques⁴⁴ provient du soleil, l'atmosphère est elle aussi reliée connectée aux êtres vivants par production d'O₂ ou d'O₃ et la consommation de CO₂. Tout organisme dépend donc des organismes qui l'entourent et de son environnement physique. Comme l'écologie cherche à comprendre les phénomènes dans la nature, nous ne pouvons pas faire l'économie de la prise en compte de cette connectivité. L'unicité de chaque entité tend à produire une pluralité qui semble irréductible, alors que la connectivité requiert la compréhension du tout dans son ensemble et pousse à l'unification soit par intégration horizontale soit par réduction verticale.

⁴⁴ Excepté certains écosystèmes du fond des océans.

Le troisième obstacle provient de l'existence d'une pluralité de méthodes d'investigations en écologie. Nous avons conclu que cette pluralité ne pouvait pas et ne devait pas disparaître. Il ne semble pas y avoir de raison de préférer une approche hypothético-déductive à une approche inductive. Mais cette pluralité des méthodes peut être un frein à l'unification des théories ou dans l'explication de classes de phénomène dont l'extension est importante.

Nous allons maintenant voir dans le chapitre suivant si la modélisation mathématique permet de lever certains de ces obstacles (notamment méthodologiques) et si elle éclaire certaines des contradictions que nous avons pointées. Mais avant, je peux brièvement conclure que le monisme semble être à ce stade un pari au sens pascalien du terme. Le monisme est un peu comme le finalisme en biologie, il n'est pas justifiable *a priori*, mais il semble être une idée régulatrice assez répandue. Je suis donc en accord avec le point de vue pragmatique défendue par Oppenheim et Putnam (1958) :

« Nous mentionnerons en passant certains points de vue pragmatiques et méthodologiques favorables à notre hypothèse de travail :

- (1) Elle possède une valeur pratique, parce qu'elle fournit un bon synopsis de l'activité scientifique (...)*
- (2) Elle est fructueuse, au sens où elle stimule différentes sortes de recherches scientifiques (...)*
- (3) Elle correspond à ce qu'on pourrait appeler la « tendance » démocratéenne de la science; c'est à dire au courant méthodologique puissant qui consiste à essayer, dans toute la mesure du possible, d'expliquer des phénomènes apparemment dissemblables au moyen de parties qualitativement identiques et de leurs relations spatio-temporelles » p389*

La modélisation unificatrice ou productrice de pluralités ?

1. La modélisation mathématique, candidat naturel à l'unification

Pour explorer le rôle que peut jouer la modélisation mathématique, je vais dans un premier temps essayer de clarifier le sens du terme « modélisation ». Ensuite, j'expliquerai pourquoi la modélisation mathématique est un bon candidat pour l'unification en suivant la typologie des pluralités que nous avons dressée dans la première partie. Je regarderai d'abord les relations entre unification des phénomènes et abstraction mathématique. Ensuite, je montrerai comment la modélisation facilite l'unification linguistique et sociologique. Le rôle de la modélisation en ce qui concerne l'unification nomologique et l'unification des méthodes ne va pas de soi et sera reporté au chapitre suivant.

1.1 Une première définition de la modélisation

Le terme de modélisation n'est pas si simple à définir. Partons du langage commun. Le mot « modèle » vient du latin classique *modulus* qui est le diminutif de *modus*. Or *modus* signifie à la fois la mesure, la règle, la manière. C'est semble-t-il une racine commune à l'ensemble des langues européennes, on le trouve notamment dans *μέδομαι* du grec ancien qui signifie « *je cherche* ». Notons que les racines du mot « modèle » conduisent à une diversité sémantique recouvrant de nombreuses caractéristiques de la science (la mesure, la recherche, le mode). Dans le langage courant, le modèle aussi est ce qui doit être imité. Il correspond à une forme idéale parfaite à laquelle on compare le réel.

La modélisation est une pratique scientifique maintenant courante, elle vise à représenter des systèmes étudiés pour pouvoir mieux comprendre ou prédire leur évolution. L'émergence de la modélisation scientifique a été pointée par de nombreux auteurs (Bouleau, 1999 ; Morrison 2011).

Bouleau (1999) écrit :

« Le principal changement dans les utilisations des mathématiques vient de l'usage de la notion de modèle qui s'est généralisé et intensifié dans tous les secteurs d'activité économique depuis les quelques décennies où l'informatique a pris son essor » p266.

Le modèle est donc souvent un mode de représentation associée à l'informatique et à la nécessité d'établir des prédictions. Mais en fait comme activité de représentation le modèle s'apparente d'abord aux deux modes de représentations hérités l'un de l'antiquité, la géométrie (Euclide), l'autre des mathématiciens arabes, l'algèbre (Al-Khawarizmi). Il n'est donc pas inutile de revenir à ces modes fondamentaux avant de rechercher les spécificités et les questions propres à la modélisation contemporaine.

Le cercle et le triangle sont peut être les deux premiers modèles scientifiques de l'histoire. Les *Eléments* d'Euclide sont la première forme axiomatisée de la géométrie, ils présentent un degré remarquable de complétude. Les définitions du

cercle et du triangle comme modèle de forme sont donc extrêmement rigoureuses dans cet ouvrage.

La seconde naissance de la modélisation est l'algèbre. Prenons un exemple célèbre en écologie, le modèle de Lotka et Volterra. La quantité de proies, qui apparaissent au cours d'un intervalle de temps dans une population donnée, dépend des facteurs suivants : la population de proies au début de l'intervalle de temps (X), le nombre de descendants produits par proie au cours de cet intervalle (r), le nombre de prédateurs (Y) et le nombre de proies que chaque prédateur tue (g).

$$\frac{dX}{dt} = r \times X - g \times X \times Y \quad (i)$$

L'équation (i) permet d'abstraire un phénomène à l'aide de deux variables (X et Y) et de deux « constantes⁴⁵ » (r et g), elle sépare le monde en deux : les facteurs et la variable à prédire (la dérivé de X par rapport au temps) et elle prédit l'évolution quantitative de ce phénomène.

Le système devient clos et dynamique quand on adjoint une seconde équation qui concerne cette fois ci les prédateurs :

$$\frac{dY}{dt} = e \times g \times X - m \times Y \quad (ii)$$

e étant un coefficient de conversion spécifiant le nombre de jeunes prédateurs générés par proies capturées et m est le taux de mortalité des prédateurs. Le système mathématique produit est celui de deux équations différentielles à deux inconnues. Comme dans le cas du modèle géométrique, il y a représentation, simplification (ou passage à la limite), puis comparaison des dynamiques observées de proies et de prédateurs à des dynamiques fictives issues de la prédiction mathématique. Si le modèle géométrique permet une mesure géométrique dans l'espace, le modèle algébrique permet une mesure numérique et il présente donc un niveau d'abstraction plus élevé. Le passage de la géométrie à l'algèbre est un moment important car il éloigne encore un peu plus le modèle du concept traditionnel de la représentation comme image.

Les notions contemporaines de modèle doivent beaucoup à cette double origine, géométrique et algébrique. Par la suite, on parlera par exemple en astronomie du modèle géocentrique de Ptolémée et du modèle héliocentrique de Copernic. Les modèles géométriques joueront moins de rôles par la suite dans les théories scientifiques. Mais on peut rappeler que le modèle de la double hélice de l'ADN a été découvert par une équipe de chercheurs qui a utilisé des maquettes en 3D afin de comprendre l'agencement des acides aminés. Le modèle algébrique est évidemment au cœur de toutes les modélisations qui passent par une formalisation mathématique. La plupart des modèles numériques actuels comportent des systèmes d'équations plus ou moins compliquées. La seule nouveauté concerne le langage logique et

⁴⁵ En fait si on change de système ou d'hypothèse ces constantes peuvent redevenir des variables.

l'algorithmique. Les modèles contemporains utilisent des instructions hypothétiques du type if <> then <> else <> et réalise des tests de vérité sur divers énoncés.

Néanmoins certains auteurs comme Pierre Duhem (1906) ont distingué les théories mathématiques des modèles mécaniques. Pour comprendre la nature de cette distinction, il faut rappeler quelques éléments de la science physique du XIX^{ème} siècle. Duhem explique qu'il existe deux approches de l'explication qui diffère entre les physiciens français et allemand d'une part et anglais d'autre part. Il prend l'exemple de l'électro-statique (Duhem 1906) :

« Le physicien français ou allemand concevait dans l'espace qui sépare les deux conducteurs, des lignes de force abstraites, sans épaisseur, sans existence réelle : le physicien anglais va matérialiser ces lignes, les épaissir jusqu'à la dimension d'un tube qu'il remplira de caoutchouc vulcanisé ; à la place d'une famille de lignes de forces idéales concevables seulement par la raison, il aura un paquet de cordes élastiques, visibles et tangibles, solidement collées par leurs deux extrémités aux surface des deux conducteurs, distendues, cherchant à la fois à se raccourcir et à grossir » p108

Les modèles mécaniques ont joué un rôle important en physique (e.g le pendule). Mais finalement, la différence entre les deux types d'abstraction tient surtout à la nécessité dans le cas des modèles mécaniques de projeter l'abstraction sur de la matière réelle. De ce point de vue, les modèles mécaniques sont d'une certaine manière aux théories, ce que la géométrie est à l'algèbre. Cette analogie semble rejoindre le point de vue de Duhem. En effet, pour lui, les modèles mécaniques emblématiques de la tradition scientifique anglaise, sont le propre de ce qu'il appelle des esprits faibles mais amples, alors que l'esprit français, fort mais étroit⁴⁶, développe des théories mathématiques. Et concernant la géométrie, Duhem (1906) conclut :

« En maintes circonstances, l'esprit géométrique vient se ranger auprès de l'esprit de finesse, parmi les esprits amples mais faibles » p100

Donc il existe quelque chose de fondamental dans la distinction entre théorie mathématique et modèle mécanique qu'opère Duhem. Aujourd'hui les modèles mécaniques sont rarement utilisés, par contre cette distinction nous dit quelque chose de générique concernant la modélisation. Dans cette tension entre se rapprocher de la matière et de l'observation ou mettre l'accent sur la pureté abstraite des formes, nous retrouvons un air de famille avec la distinction entre modèles théoriques et modèles empiriques sur laquelle nous reviendrons plus tard. La généalogie du concept de modèle fait émerger une première forme de pluralité que nous retrouverons par la suite.

Concernant la nature des modèles, il nous reste une question à traiter. Quelle est la place du langage dans la nature du modèle ? Pour Tarski, le modèle ne dépend pas de

⁴⁶ Je ne partage pas cette essentialisation des esprits...notamment quand on voit que l'exemple pris par Duhem pour représenter le paroxysme de l'esprit ample n'est autre que Napoléon.

sa formulation sémantique. Les modèles informatiques actuels tendent à valider cette vision du modèle. En effet, tout système d'équations mathématiques peut être traduit dans des langages informatiques différents (Java, C++, Fortran) sans changer les résultats des modèles ainsi construits. De la même façon, la nature du langage mathématique lui-même ne semble pas changer le contenu informationnel du modèle. En effet, les résultats du modèle proie-prédateur peuvent s'obtenir en utilisant le système d'équations différentielles que nous avons décrit avec par conséquent « dt » infiniment petit, être simulée de façon séquentielle avec un pas de temps réel (e.g. une année) ou découler de la résolution d'une modélisation selon l'algèbre de Boole avec deux niveaux. Nous pouvons conclure comme Tarski, que le modèle est une entité non linguistique (Morgan & Morrison 2008) :

« According to Alfred Tarski (...) a model is a non linguistic entity. It could, for example, be a set theoretical entity consisting of an ordered tuple of objects, relations and operations on these objects ». p3

1.2 Processus d'abstraction, d'idéalisation et modélisation

Repartons des exemples géométriques et algébriques. Commençons par le cercle. Avant d'être un objet d'étude, c'est une figure qui permet la mesure de l'égalité ; elle est utilisée par Euclide dans de nombreuses propositions du Livre I des Eléments, bien avant d'être étudiée en tant que telle dans le livre III. Mais c'est aussi une figure importante dans la nature (soleil, lune, fleurs...). Pour Aristote c'est la figure la plus éminente, qui par conséquent a aussi une symbolique importante dans la cité. Le cercle est aussi essentiel dans la cosmogonie platonicienne présentée dans le Timée, il sert à signifier la dialectique entre le Même (unité) et l'Autre (pluralité):

« Voici de quels éléments et de quelle manière il la composa. Avec la substance indivisible et toujours la même et avec la substance divisible qui naît dans les corps, il forma, en combinant les deux, une troisième espèce de substance intermédiaire, laquelle participe à la fois de la nature du Même et de celle de l'Autre, et il la plaça en conséquence au milieu de la substance indivisible et de la substance corporelle divisible. Puis, prenant les trois, il les combina toutes en une forme unique, harmonisant de force avec le Même la nature de l'Autre qui répugne au mélange. Quand il eut mélangé les deux premières avec la troisième et des trois fait un seul tout, il le divisa en autant de parties qu'il était convenable, chacune étant un mélange du Même, de l'Autre et de la troisième substance (...). Alors il coupa toute cette composition en deux dans le sens de la longueur, et croisant chaque moitié sur le milieu de l'autre en forme d'un X, il les courba en cercle et unit les deux extrémités de chacune avec elle-même et celles de l'autre au point opposé à leur intersection. Il les enveloppa dans le mouvement qui tourne uniformément à la même place et il fit un de ces cercles extérieur et l'autre intérieur. Il désigna le mouvement du cercle extérieur pour être le mouvement de la nature du Même, et celui du cercle intérieur le mouvement de la nature de l'Autre ». 34c 36c

La mesure du cercle revêt une importance particulière à la fois dans le domaine des techniques appliquées (architecture, agriculture) et dans l'histoire de la pensée et des mathématiques. L'histoire de sa mesure remonte assez loin, en 2000 av. JC, les babyloniens connaissaient déjà Pi comme le rapport constant entre la circonférence d'un cercle et son diamètre, mais pas comme objet mathématique. Quand on étudie la

mesure du cercle d'Archimède, il apparaît que sa démonstration vise probablement aussi à répondre à un besoin pratique. En effet, Archimède utilise un polygone de seulement 96 cotés alors que plus on augmente le nombre de cotés plus on affine la valeur de π . D'après Knorr (1975, 1978), Archimède aurait eu des estimations plus précises mais il voulait probablement obtenir une valeur facile d'utilisation comme $3 \frac{1}{7}$; ce qui conditionne le nombre de côtés des polygones inscrits et circonscrits.

Examinons le processus d'abstraction. La géométrie exprime le passage d'une pluralité d'objets circulaires que nous observons couramment dans la nature à un concept fixe qu'Euclide a défini de la façon suivante :

Définition 15, Livre I : *Un cercle est une figure plane contenue par une ligne unique (celle appelée circonférence) par rapport à laquelle toutes les droites menées à sa rencontre à partir d'un unique point parmi ceux qui sont placés à l'intérieur de la figure sont égales entre elles.*

L'idéalisation et le passage au modèle s'opèrent par une définition des propriétés de la figure. Ces propriétés rendent compte d'une diversité de figures, mais l'idéalisation est aussi un passage à la limite. En effet, dans la réalité, rares sont les figures planes (la plupart sont des sphères ou la projection d'une sphère sur un espace en deux dimensions), encore plus rares sont les figures issues de processus parfaitement isomorphes et donc circulaires. Ensuite, la figure idéale ainsi définie joue le rôle du modèle et d'étalon : c'est ce à quoi une entité observée dans le monde est comparée.

Qu'en est-il de la modélisation algébrique ? Revenons au système proie-prédateur. Le processus d'abstraction s'opère en plusieurs étapes. D'abord, on part d'une situation réelle, ici un milieu avec des cerfs et des loups. En effet, sans une situation réelle de cette sorte, c'est à dire des proies d'un certain type (des cerfs) à propos desquels on observe qu'elles sont effectivement tuées systématiquement par un autre type d'animaux (les loups), aucun scientifique n'aurait imaginé le système proie-prédateur. Donc comme dans le cas du modèle géométrique, la construction de tout modèle même le plus théorique part d'une situation réelle et ce même si c'est parfois indirect. On simplifie cette situation réelle en ne conservant que les cerfs et les loups et en évacuant ici toute dimension spatiale ; la position des cerfs et de loups n'étant pas prise en compte. Puis on réduit la pluralité des propriétés des cerfs et des loups, à l'effectif des populations. Ensuite on idéalise les cerfs et les loups en passant à la limite, tout cerf représentant des proies et tout loup des prédateurs. Dans ce passage à la limite, on réduit d'une autre façon les loups et les cerfs. Ce qui agit sur leur effectif ne tient qu'à leur rôle en tant que proies ou en tant que prédateurs. On ne s'occupe ni des autres relations que des cerfs et des loups peuvent entretenir, notamment en termes d'occupation de l'espace, ni des autres facteurs pouvant agir sur les effectifs de deux populations (e.g. le climat, l'abondance de la végétation). Ensuite on idéalise les relations entre prédateurs et proies. On définit un taux d'accroissement intrinsèque des proies (r), un nombre fixe (g) de proies que chaque prédateur tue au cours d'une année, un coefficient (e) de conversion spécifiant le nombre de jeunes prédateurs générés par proies capturées et un taux de mortalité (m) des prédateurs. Enfin, les relations entre proies et prédateurs sont données comme étant valables sur n'importe quelle portion de l'espace temporelle, c'est ce que signifie le « dt ». Le pouvoir unificateur est néanmoins fort, car tout système présentant des proies et des prédateurs peut présenter des oscillations de populations, conséquences caractéristiques de ce

système ultra simplifié. L'expérience de Gause présentée dans le chapitre précédent a d'une certaine manière validé ce modèle. Cette unification est possible car dans la réalité, de nombreux facteurs faisant varier les effectifs de populations particulières de proies et de prédateurs ont moins d'impact que les conséquences de la relation de prédation. La puissance unificatrice d'un modèle provient du processus d'abstraction durant lequel les facteurs causaux principaux, que j'appelle « facteurs à effets majeurs », ont été pris en compte dans la construction du modèle.

Pour l'instant nous avons traité de l'unification par l'abstraction sans distinguer la nature des différents objets à l'origine de ces abstractions. Or suivant Duhem (1906), le pouvoir d'unification des abstractions peut être étudié à plusieurs niveaux. La première étape est celle de l'élaboration de lois à partir d'un ensemble d'objets réels :

« En premier lieu, l'esprit analyse un nombre immense de faits particuliers, concrets, divers, compliqués, et ce qu'il voit en eux de commun et d'essentiel, il le résume en une loi, c'est à dire en une proposition générale reliant des notions abstraites » p77

Et la seconde étape est relative à la production de théories à partir d'un ensemble d'entités conceptuelles :

« En second, lieu, il contemple tout un ensemble de lois ; à cet ensemble, il substitue une tout petit nombre de jugements extrêmement généraux, portant sur quelques idées abstraites, il choisit ces propriétés premières, il formule ces hypothèses fondamentales, de telle sorte qu'une déduction fort longue peut-être, mais très sûre en puisse tirer toutes les lois appartenant à l'ensemble qu'il étudie. Ce système des hypothèses et des conséquences qui en découlent œuvre d'abstraction, de généralisation et de déduction, constitue la théorie physique. » p77

La succession abstraction, induction, abstraction de second niveau, déduction permet d'éclairer la décomposition du modèle proie-prédateur que nous avons présenté. Le passage de loups nourris par des cerfs au concept de la relation de prédation constitue la première abstraction, qui dans ce cas est double, ontologique d'une part (cerfs -> proie) et relationnelle d'autre part (se nourrir de cerfs -> prédation). Puis le second niveau d'abstraction consiste à comparer différents cas de relations entre proies prédateurs, afin d'en déduire une forme générale. Mais cet exemple démontre aussi l'écart entre la proposition de Duhem et la réalité du développement scientifique. Car en fait dans le cas de ce modèle, la phase inductive, n'a pas été menée jusqu'au bout. C'est *a posteriori* que la validité du modèle proies-prédateur a été évaluée empiriquement. Dans beaucoup de théories écologiques, la double abstraction se fait dans un même mouvement et si une certaine forme inductive existe car le théoricien a bien en tête normalement une série d'exemples de prédateurs, le passage par la loi empirique n'est pas explicite. Dans d'autres cas, nous retrouvons l'analyse séquentielle que donne Duhem, mais elle ne me semble pas aussi systématique que cela.

Pour conclure, dans le cas du modèle géométrique, comme dans celui du modèle algébrique, le modèle unifie donc une pluralité de phénomènes importantes, mais plus l'extension de la classe des phénomènes expliqués est grande, plus les simplifications produites par le modèle sont fortes et plus il s'éloigne de la réalité. Ces modèles paradigmatiques, que sont la figure géométrique et le couple d'équations

différentielles, nous démontrent la tension qui existe entre représentation d'une réalité et unification de cette réalité.

Ce pouvoir d'unification explique pourquoi historiquement une des seules façons de dépasser le problème de la fragmentation des résultats locaux a été l'usage de la modélisation et des mathématiques. Je conclurai avec Poincaré :

« L'expérience est la source unique de vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude. Voilà deux points que nul ne peut contester. Mais alors si l'expérience est tout, quelle place restera-t-il pour la physique mathématique ? (...) Et pourtant la physique mathématique existe ; elle a rendu des services indéniables ; il y a là un fait qu'il est nécessaire d'expliquer. C'est qu'il ne suffit pas d'observer, il faut se servir de ses observations et pour cela il faut généraliser ». La science et l'hypothèse p157

1.3 La modélisation comme vecteur d'une unité linguistique et sociologique

Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'il était nécessaire de distinguer l'unité linguistique de l'unité nomologique. La première est une condition nécessaire à la seconde comme le suggérait Carnap. Regardons en quoi la modélisation comme activité scientifique conduit à une unification linguistique.

L'expression en langage mathématique et logique d'une théorie facilite l'unité linguistique, or comme le modèle est souvent traduit en langage mathématique et logique, il doit bénéficier des mêmes capacités d'unification. En effet, le langage mathématique et la logique formelle ont le même sens dans tous les pays quelle que soit la langue en usage. Le modèle permet donc de mettre en relation des chercheurs de différents pays ou de différentes disciplines. Mais le pouvoir unificateur du modèle ne tient pas qu'à cela, sinon l'anglais aujourd'hui ou le latin hier, qui sont des langues devenues partagées en ce qui concerne l'expression du savoir, auraient une capacité unificatrice similaire. La modélisation passe par une abstraction dans laquelle la définition rigoureuse des entités idéelles ainsi produite est importante. Nous avons vu comment la figure géométrique qu'est le cercle a été précisément définie par Euclide. Cette clarification du langage que Platon appelait déjà de ses vœux dans le Cratyle fut aussi un des leitmotivs des philosophes du cercle de Vienne. La rectitude des concepts est donc un produit de l'usage des mathématiques et de la logique. Elle permet de limiter la diversité sémantique d'un concept. Souvent lorsqu'on passe à la transcription mathématique d'une situation réelle, puis à sa traduction algorithmique dans un langage informatique, ce besoin de rigueur nous apparaît clairement. Cette unité linguistique revêt donc deux facettes, la première concerne la connexion efficace de pensées de différents chercheurs, la seconde l'amélioration de la définition sémantique des termes. Pour le dire autrement avec les termes de Gödel sur lesquels nous reviendrons plus tard, le passage à la modélisation unifie le concept dans sa dimension intensionnelle (une définition moins polysémique) et unifie le concept dans sa version intensionnelle (une pluralité de point de vue peut être mise en dialogue).

Néanmoins, cette clarification qu'opère le langage mathématique a une limite. Une même équation par exemple $y=ax+b$ peut être utilisée dans un nombre de champs quasi infini. Ce qui est spécifié par l'équation concerne la dimension relationnelle,

l'équation est muette en ce qui concerne la dimension ontologique de x et de y . L'équation comme toute fonction propositionnelle dans sa dimension intensionnelle est donc d'une certaine manière insaturée (Frege 1891). Ce constat est important pour la dimension ontologique du problème de l'unification que nous aborderons plus tard, elle a aussi des conséquences sur la dimension linguistique. Pour bien le comprendre, il faut revenir au processus d'abstraction. En effet, chaque équation (algèbre), figure géométrique (géométrie) ou fonction propositionnelle (logique), est produite à l'origine à partir d'un cas particulier : la forme de la Lune, la prédation des cerfs par les loups. Or ce cas particulier laisse son empreinte dans la généralisation. L'application de l'abstraction ou de la généralisation dans un autre contexte en oubliant la généalogie du modèle produit, peut être source de confusions sémantiques et par voie de conséquences linguistiques. Le mésusage des modèles comme de toute abstraction provient parfois de ce type de confusion.

Je vais exemplifier ce problème avec un concept en écologie déjà mentionné dans le chapitre précédent : la plasticité phénotypique. Je traite ici ce problème avec un concept et non un modèle, mais je pourrais montrer la même chose avec des modèles de simulations. Rappelons d'abord la définition de ce concept: La plasticité phénotypique d'un trait se définit comme la norme de réaction du trait à génotype constant en réponse à des variations biotiques ou abiotiques externes à l'organisme. Prenons un exemple concret dans lequel ce concept est utilisé. Des relevés individuels sur 47 années dans une population de mésange charbonnière ont montré que sur une durée d'un demi-siècle, les mésanges ont avancé leurs dates de ponte en moyenne de 14 jours. Les données sur l'abondance de nourriture dans la forêt ont permis de montrer par ailleurs que ces 14 jours correspondent à l'avancement de la présence des chenilles dans les bois, la principale nourriture apportée aux poussins au nid (Charmantier et al., 2008). Les auteurs ont montré que ces ajustements étaient le fait de changements individuels, l'adaptation n'est donc pas génétique, il s'agit de plasticité adaptative. Les généticiens ont souvent étudié la plasticité pour comparer l'effet de la plasticité et de l'adaptation génétique, donc dans un contexte où ce que l'on recherche c'est de la plasticité adaptative : c'est à dire des variations de caractéristiques des individus améliorant leur survie. Ce concept de plasticité peut s'appliquer à de nombreux autres domaines. Par exemple, l'étude des largeurs de cernes des arbres donne des séries temporelles importantes de variations d'un caractère (la largeur du cerne, mais aussi sa densité). On peut ainsi comparer différents arbres selon les différences de variance de leurs largeurs de cernes. Ces variances sont l'expression mathématique d'une plasticité. Or cette réutilisation est l'objet de nombreuses confusions. La première est que la plasticité ne peut s'appliquer qu'à un caractère individuel. Or rapidement, les chercheurs parlent d'arbres plus ou moins plastiques oubliant de signifier que c'est pour un caractère donné. Pire, la plasticité est intuitivement depuis la création du concept associée à la notion d'adaptation. Donc si un arbre est plastique c'est bien, il s'adaptera au climat. Or en fait c'est faux, la plasticité peut être purement passive. Dans notre exemple, plus la taille d'un arbre est importante, plus ses fluctuations de croissance en positif comme en négatif sont importantes. Mais la plasticité peut être mal adaptive. Par exemple, répondre fortement aux variations du climat peut aussi rapprocher l'arbre de seuils létaux. Ces confusions ont des conséquences sur l'interprétation de résultats, et elles proviennent bien d'un flou sémantique qui prend sa source dans l'insaturation ontologique des équations. En effet, transposer en équations, la plasticité n'est rien

d'autre qu'une variance. Mais la signification des variations de cette variance dépend de la variable que l'on étudie.

Nous avons donc vu que la modélisation était un puissant moyen d'unifier le langage, notamment du fait de son usage des mathématiques et de la logique. La pratique de la modélisation peut néanmoins être producteur de confusion sémantique et menacer l'unité conceptuelle dans sa composante intensionnelle, si on méconnaît la généalogie des modèles. Néanmoins, la science moderne n'est pas une activité intersubjective seulement médiatisée par le langage mathématique, c'est aussi une activité sociale, et l'interaction entre groupes de chercheurs dépend de nombreux autres facteurs que les facteurs linguistiques. Evidemment l'unification linguistique est une condition nécessaire de l'unification sociale du champ, mais est ce que l'activité de modélisation est facteur d'une unification à une échelle spécifiquement sociale ? Il me semble que cette question n'a pas encore fait l'objet de recherches philosophiques, je vais donc essayer de donner quelques éléments à partir de ma propre expérience.

A un premier niveau, l'insaturation des modèles mathématiques permet leur usage dans quasi toutes les disciplines. On ne compte plus les exemples d'outils mathématiques utilisés dans un domaine et importés dans un autre. Les théories du signal développées en ingénierie ont été importées en écologie (Cazelles et al., 2008), l'analyse de variance produite par l'agronomie a ensuite été utilisée en économie et en sociologie, les modèles multi-agents créés pour les systèmes sociaux sont maintenant en usage en écologie. Cet usage transdisciplinaire des modèles mathématiques a été très fécond au cours de l'histoire des sciences, il est par conséquent vecteur d'unification sociologique. En effet, les chercheurs d'un domaine ont intérêt à se tenir au courant des avancées méthodologiques et mathématiques dans un autre domaine. Ces outils constituent des ponts entre les disciplines puisque ces mathématiques appliquées sont souvent le lieu de rencontres entre différentes disciplines. Ces rencontres prennent corps dans l'existence de colloques (e.g *International Congress on Environmental Modelling and Software*) ou de revues (e.g *ecological modelling*, *journal of theoretical biology*).

A un second niveau, les modèles de simulations et les plateformes de modélisations permettent l'interconnexion de différentes disciplines. Ces modèles numériques visent à modéliser de façon précise une série de phénomènes complexes en vue d'en prédire l'évolution. Ils se sont développés dans divers domaines : astrophysique, sciences de l'ingénieur, climatologie, économie ou écologie. Ces modèles sont souvent complexes car prévoir par exemple le niveau des productions agricoles dans les prochaines années ou le climat futur, requiert le couplage de lois issues d'un très grand nombre de domaines. Ces modèles produisent de l'unité sociologique à deux niveaux. D'abord, le chercheur qui travaille sur ce type de modèle est contraint à une connaissance relativement générique et interdisciplinaire. Pour simuler les flux d'eau et de carbone dans les forêts (Dufrêne et al., 2005), il faut connaître aussi bien les lois physiques pour réaliser des bilans énergétiques ou simuler les transferts d'eau dans le sol, que la physiologie végétale pour représenter les mécanismes gouvernant la respiration, la photosynthèse ou les transferts d'eau dans la plante. Si ces modèles deviennent dynamiques et ont vocation à simuler l'évolution de ces forêts, il faut rajouter des compétences concernant la génétique des plantes, ou les interactions biotiques avec le reste de l'écosystème (compétition, parasitisme). Comme ces compétences ne s'acquièrent pas dans l'isolement, cela conduit le chercheur à

connaître les autres domaines et à établir des liens entre différentes disciplines. Le second niveau intervient quand la mise en commun requiert une réelle collaboration entre plusieurs équipes, le modèle devient le lieu d'une élaboration collective à laquelle plusieurs chercheurs de disciplines différentes participent. Ce type de travail collectif aboutit à la production de plateformes multidisciplinaires de modélisation, qui fleurissent en écologie depuis maintenant une décennie.

La modélisation apparaît comme un vecteur, certes modeste, d'unification sociologique. Cette tendance positive du point de vue de l'unité peut néanmoins être contrecarrée par un autre phénomène. Le modèle de simulation devient aussi un objet de recherche en tant que tel. Or comme Bourdieu l'a montré, le champ scientifique est un champ où la compétition est importante. Cette compétition est renforcée par la logique contemporaine qui poussée à son paroxysme conduit au tableau du « biologiste en capitaliste sauvage » qu'a dressé Latour. L'activité de modélisation ne fait pas exception. Plusieurs équipes de recherches développent leurs propres modèles. Sur un même sujet, il existe donc souvent une pluralité de modèles dont le dialogue peut être entravé par la compétition. Le modèle devient un enjeu de pouvoir pouvant jouer un rôle important dans la crédibilité des scientifiques qui l'ont conçu. Outre les problèmes épistémiques auxquels ces mécanismes peuvent conduire, cela peut devenir un facteur limitant l'interaction entre chercheurs. Cette compétition est toujours un facteur entravant l'interaction, mais elle peut être exacerbée quand un objet comme le modèle matérialise les divergences.

2. L'intention modélisatrice productrice de pluralités

Nous avons dans la partie précédente montré en quoi la modélisation produisait mécaniquement de l'unité car en tant que processus d'abstraction elle fonctionne par élimination du pluriel et du différent. Mais dans l'analyse des processus d'abstraction et d'idéalisation, nous avons pour l'instant vu le caractère intentionnel du processus d'abstraction. Or l'intention du modélisateur lors de l'abstraction, ainsi que le contenu idéal dont il dispose pour traduire cette abstraction en concepts et en équations, sont sources de pluralités. En effet, les intentions et l'arrière-plan idéal n'ont aucune raison d'être identiques entre deux chercheurs et encore moins entre deux disciplines. Nous allons donc reprendre l'analyse du processus de modélisation, mais cette fois-ci en analysant ce qui se passe en amont du modèle. Ensuite nous verrons comment utiliser la dialectique platonicienne, la philosophie transcendantale kantienne, et le falsificationisme de Popper pour tenter de résoudre le dilemme entre l'existence d'une pluralité intentionnelle et la nécessaire production d'unité de formes intelligibles partagées et qui correspondent bien à quelque chose de réelle dans le monde.

2.1. L'intentionnalité source de pluralités

La modélisation se différencie des mathématiques pures en ce qu'elle est connectée à des phénomènes réels. Nous l'avons vu dans les exemples précédents, l'activité de la modélisation n'est jamais déconnectée de motivations individuelles et sociétales. Déjà la mesure du cercle et la forme de la démonstration qu'en donne Archimède répondait à un besoin pratique. Fisher a développé l'analyse de variance pour répondre à des problèmes agronomiques. De nombreux modèles écologiques ont pour but d'améliorer la gestion des ressources naturelles : gestion des stocks de poissons, production forestière, rendement agronomique, lutttes biologiques...

Revenons au processus d'abstraction. Au lieu de partir d'un modèle déjà donné (l'abstraction proies-prédateurs ou le cercle), nous allons partir d'un objet pris en soi indépendamment de l'observateur: ici une forêt de sapins.



Si on devait modéliser cette forêt en tant qu'objet réel dans toute sa complexité, comment s'y prendrait-on ? En fait, une réflexion rapide nous montre que cette détermination de l'en soi de la forêt est impossible. Deux photographies l'une prise à l'horizontale et l'autre à la verticale, ne nous donne déjà pas du tout la même image de la forêt. On pourrait prendre une infinité de photos cela n'y changerait rien car la forêt change aussi au cours du temps. La lumière n'est pas la même, les aiguilles tombent, le sous-bois change et sur le long terme des arbres meurent. L'observateur est donc prisonnier de l'existence d'une infinité de points de vue possibles sur les objets qu'il étudie. Le modélisateur est soumis à la même contrainte fondamentale, son abstraction et son idéalisation sont orientées vers certains aspects spécifiques de l'objet qu'il observe. L'abstraction scientifique est un processus qui commence donc par une question scientifique, qui elle-même découle d'une chaîne intentionnelle et motivationnelle complexe.

Or ce mécanisme est producteur de pluralités. Deux types de questions différentes produisent deux abstractions différentes. Si l'on cherche à comprendre quels sont les échanges de matière et d'énergie dans la forêt photographiée, nous choisirons plutôt le point de vue horizontal. En effet, les flux d'énergie et de matière dans une forêt dépendent de la lumière interceptée par les aiguilles et transformée en matière organique au cours de la photosynthèse, une partie de l'eau issue des pluies est aussi interceptée par la canopée ce qui conditionne le bilan hydrique du sol. Une bonne abstraction pour répondre à cette question peut ignorer les arbres pris individuellement, mais détaille plus finement les strates successive d'aiguilles qui absorbent la lumière. Une qualité essentielle de la forêt pour répondre à cette question spécifique est la surface foliaire par unité de surface de sol, appelée en anglais Leaf Area Index (LAI), grandeur très largement étudiée en écologie fonctionnelle.

Par contre, si la question concerne la gestion de cette forêt et la prédiction de sa dynamique, la nature de l'abstraction sera différente. Dans ce cas-là, l'image verticale est la plus appropriée. Pour rendre compte de la dynamique d'une population d'arbres, il faut dénombrer les arbres et donc les individualiser. Ensuite, il est nécessaire de classer ces arbres selon leur taille et de localiser spatialement la position de chacun d'entre eux, car ces paramètres jouent sur la future dynamique de la forêt. Une qualité

essentielle pour comprendre la forêt de ce point de vue, c'est la surface terrière⁴⁷ du peuplement, grandeur clé en foresterie et en dynamique des peuplements.

La question conditionne donc le processus d'abstraction, le chercheur élimine des aspects de la réalité et grossit les traits d'autres d'aspects en fonction de la question posée. Mais cette question s'inscrit dans un champ scientifique plus général et le passage à l'idéalisation porte aussi la marque de la pluralité des champs impliqués. Je définis ici l'idéalisation comme étant la traduction d'une situation abstraite, dans un langage conceptuel et mathématique. Or ce langage dépend du champ scientifique ou de la tradition de recherche dans lequel le chercheur se situe. L'intentionnalité inhérente à tout processus d'abstraction et d'idéalisation semble donc productrice d'une pluralité quasi irréductible. Le dialogue entre des modèles issus de processus d'abstractions différents car répondant à l'origine à des questions différentes est-il alors possible ? Cela pose la question de l'incommensurabilité entre différents modèles. Si les différents modèles sont le lieu de synthèse nomologique, alors l'impossibilité de les coupler est une barrière évidente à l'unification nomologique (i.e connecter différentes lois).

Morrison (2011) donne deux exemples de modèles inconsistants dans la physique contemporaine. Selon elle, le premier ne pose pas réellement de problème, il s'agit des modèles de turbulence, les physiciens n'utilisent pas le même modèle quand ils veulent simuler la dynamique du fluide au niveau des parois ou au milieu du fluide. Il y a selon Morrison dans ce cas-là, une pluralité des représentations mais pas un incommensurabilité des modèles. Par contre, les modèles concurrents de la physique nucléaire représentent de vrais cas d'incommensurabilité, car ils ont pour objectif de représenter le même objet. Nous voyons bien dans ces exemples pris en physique, qu'il existe des cas (i) où la pluralité de modèles est source de pluralités, qui *a priori* n'existent pas dans la réalité (e.g modèle nucléaire) et (ii) des cas où la pluralité des modèles n'est que le reflet d'une pluralité visiblement irréductible de la réalité (e.g turbulence). Mais dans les deux types de cas, le modèle n'est pas alors un instrument d'unification, il peut même être une source supplémentaire de pluralités.

2.2. Pluralité et unité dans la dialectique

Nous avons montré que la modélisation tire son pouvoir unificateur des mécanismes d'abstraction et d'idéalisation. Mais ces mêmes processus sont aussi potentiellement sources de pluralités du fait de leur caractère intentionnel. Il n'est donc pas inutile de faire un détour par les philosophes qui ont pensé le passage du réel à l'idéal et le premier d'entre eux a été Platon. Le fait que toute démarche réflexive commence par une question n'avait pas échappé à Platon, dont les écrits prennent essentiellement la forme de dialogues. Platon pense le questionnement comme source originelle de savoir. Mais Platon est aussi le théoricien de la recherche de formes et d'essences qui soient fixes et potentiellement partagées par les deux interlocuteurs, voir par toute la cité. Il est donc intéressant de voir si les dialogues platoniciens ne nous donnent pas des pistes pour comprendre comment un processus de questionnement forcément

⁴⁷ Cet indice correspond, pour un arbre donné à la surface de la section d'un arbre mesurée à 1,30 mètre du sol. La surface terrière d'un peuplement est la somme des surfaces terrières individuelles. Cet indice permet de quantifier l'effet de la compétition ainsi que le stade de maturité de la forêt.

subjectif et source de pluralités, peut avoir comme objet la recherche d'une unité naturelle.

Platon écrit dans le Phèdre :

« Voilà Phèdre de quoi je suis amoureux, des divisions et des rassemblements, dans le but d'être capable de parler et de penser. Si je crois avoir trouvé quelqu'un capable de porter ses regards vers une unité qui soit l'unité naturelle d'une multiplicité, « je marche sur ces pas et je le suis à sa trace comme si c'était un Dieu ». Qui plus est, ceux qui sont précisément capables de faire cela, jusqu'à présent je les appelle dialecticiens. » 266b3-c1.

Essayons donc de mieux comprendre ce qu'est réellement le travail du dialecticien pour Platon. Dixsaut (2001) remarque que finalement Platon ne décrit pas vraiment l'art de la dialectique de façon explicite. Pour comprendre ce qu'il entend par dialectique, il faut analyser la pratique du discours qu'il met en œuvre. La dialectique commence par le dialogue, dialogue avec l'interlocuteur, mais aussi dialogue avec soi-même. Ce dialogue se donne un objectif bien précis, la recherche de ce qui est, l'ousia ou l'être. La dialectique en tant que recherche des essences, s'oppose donc à « ceux qui s'occupent de géométrie, de calculs de choses semblables » et qui n'appréhendent les réalités qu'en se servant d'images (La République). Or le type de dialogue, qui sied à cette recherche, exige une brièveté de chaque phase du discours et la multiplication des questions et des réponses (Gorgias). Elle requiert aussi une « philia » entre les interlocuteurs, c'est à dire une orientation semblable vers un but commun (Ménon). Mais la dispute n'est vraiment évitée que si on ne s'en tient pas aux apparences, c'est pour cette raison qu'il ne faut pas « s'en tenir aux mots », mais diviser « selon les espèces ». Le dialecticien sait ainsi le vrai sens des mots, qu'il utilise à bon escient (Cratyle). La dialectique ne se résume donc pas à un art du dialogue, c'est aussi un art de la division (Dixsaut 2001) :

« Si la division sert à déterminer identités et différences, le critère permettant de les déterminer est un critère relatif à la question posée, non un critère absolu. Aucune division ne doit en conséquence être prise absolument, puisque les principes servant à diviser sont toujours choisis en fonction du problème à résoudre. C'est lui qui impose le point de vue à partir duquel devront être choisis les principes successifs d'une division » p67

Cette division n'a de sens que dans un rapport dialogique avec la question de l'interlocuteur. Or la question émerge souvent de la contradiction, d'où l'importance de celle-ci (Platon, la République livre VII) :

«...Certains choses sont propres à solliciter la pensée, et les autres non. Celles qui viennent frapper la sensation en même temps que leurs contraires, je les définis comme susceptibles de solliciter la pensée, alors que celles qui ne le font pas sont impropres à éveiller l'intellection.» La République 524d

Tout l'art de la dialectique réside dans la meilleure façon d'effectuer correctement ce que Dixsaut appelle l'entrelacement de l'un et du multiple, ces deux concepts étant finalement étroitement associés (Dixsaut 2001) :

« Penser une unité implique de la multiplier, c'est à dire de la diviser, penser une multiplicité c'est forcément la conduire à son unité. » p106

Pour le dire autrement, réfléchir à l'unité de phénomènes c'est mécaniquement dresser la classe des phénomènes que l'on veut subsumer sous cette unité et donc rechercher une pluralité. A *contrario*, vouloir penser une pluralité conduit mécaniquement à chercher ce qui peut bien les unir, sinon pourquoi avoir rassemblé dans le processus d'abstraction cette pluralité là et pas une autre ! Le concept de forme éclaire le sens du couple unité et pluralité. Chaque entité participe à une forme selon un point de vue et à une autre selon un autre point de vue. Une pluralité est unifiée selon un point de vue par la participation de chacun de ces éléments à une même forme (Platon, Parménide).

« Ne partages-tu pas ses convictions : il y a une forme en soi de la Ressemblance ; une telle forme a son contraire ce qu'est la dissemblance ; les choses dont nous disons qu'elles sont multiples, moi toi ou autre chose, participent à ces deux formes qui sont véritablement ; et c'est parce qu'elles participent à la Ressemblance et dans la mesure où elles en participent que les choses qui participent à la ressemblance sont semblables, tandis que les choses qui participent à la Dissemblance sont dissemblables, et que celles qui participent aux deux formes sont à la fois semblables et dissemblables. » Parménide, 129ab

Mais ce processus de division et d'unification doit aussi respecter d'une certaine manière les articulations naturelles des formes (Platon, Phèdre) :

« Elle consiste à pouvoir à l'inverse découper les espèces en tâchant de ne casser aucune partie comme le ferait un mauvais boucher sacrificateur. » Phèdre 265^e.

Le dilemme entre unité et pluralité semble donc être éclairé par cette lecture de Platon. L'opposition entre la pluralité et l'unité semble d'abord être une opposition factice. On comprend que la pluralité contenue dans les questions vise en même temps la recherche d'unité. Mais à ce stade rien n'indique comment deux interlocuteurs aux intentions différentes se mettent d'accord sur la valeur de l'unité ainsi produite. Le dialecticien peut se retrouver avec une multiplicité de pluralités et d'unités sans avoir fait avancer la connaissance de ce qui est réellement uni du point de vue des formes. On ne dépasse pas une unification subjective. Comment atteint-on alors une certaine objectivité ? Pour le comprendre, il faut se pencher sur la dynamique du dialogue. Socrate favorise des séquences de questions et de réponses où l'unité et la pluralité sont sans cesse réévaluées selon la question. Dixsaut (2001) entrevoit dans le Phèdre deux usages possibles de cette mécanique :

« L'entrelacement de l'un et du multiple est la structure même du discours et il en fonde deux usages également possibles. Le premier joue pour faire surgir sans cesse les contradictions, ne cessant de dénoncer cette multiplicité imposée par le discours à une même chose, et posant alors l'alternative : ou bien tout identité est fictive, ou bien il ne faut pas parler mais seulement désigner. Le second cherche à comprendre comment l'entrelacement doit s'opérer » p107-108

Ce travail doit permettre de trouver des espèces naturelles et d'aboutir à une définition des essences. Dans ce travail, il ne faut pas confondre l'étape inductive pré-dialectique qui consiste à rassembler des phénomènes individuels et l'étape

dialectique qui doit permettre par un travail sur les formes de donner une définition de l'essence (Dixsaut 2001):

« On ne doit pas confondre le rassemblement avec la collection socratique d'exemples individuels. L'induction socratique, le rapprochement d'exemples pris dans des champs empiriques différents, peut dans certains cas, être un préalable pré-dialectique, antérieur à l'examen qui aboutira à définir la réalité en question » p115.

Nous retrouvons donc ici d'une certaine manière la distinction entre la définition extensionnelle d'un concept par les classes qui le composent et sa définition intensionnelle par la définition du prédicat qui lui est associé. La dichotomie intension et extension sera précisée plus tard par Aristote. L'intension est la définition d'une espèce, l'extension étant l'ensemble des sous-espèces qui la constitue dans un arbre hiérarchique. Cette distinction recoupe la différence entre l'induction plutôt associée à l'extension et la déduction plutôt associée à l'intension. Pour Platon, il y a clairement une hiérarchie, la seule définition valable issue du processus dialectique se fait par déduction et concerne le concept en intension. La recherche du concept nécessite de commencer par fixer une définition et de se mettre d'accord sur les termes. Il faut figer pour pouvoir en déduire des conséquences, si les conséquences produisent des contradictions alors on est amenée à revenir sur la définition. C'est ce processus correctif par réitération qui est selon moi de nature à produire du savoir objectif.

Appliquons ce que nous avons appris de la dialectique platonicienne, au processus d'abstraction et à la modélisation. Tout processus d'abstraction démarre donc avec une question. A partir de cette question, le chercheur définit une totalité, une pluralité dirait Platon, un système dirions-nous aujourd'hui, qui comprend l'ensemble des formes qui sont susceptibles d'aider à répondre à la question. La pluralité du tout est unifiée dans un système puis réduite à une série de formes. En choisissant la pluralité étudiée, dans le même mouvement le chercheur produit son unification dans un même système. A ce stade il n'y a rien de pluriel ou d'unie en soi, la pluralité ou l'unité est construite. Mais ensuite on déduit de cette abstraction et des concepts que l'on en tire, des conséquences. Si ces conséquences aboutissent à des contradictions avec les concepts eux-mêmes ou avec les faits, cela repose une nouvelle question. Cette nouvelle question conduit à la reformulation d'une pluralité et d'une unité. L'itération de ce processus aboutit à forger des unités et des pluralités de plus en plus proches d'unités et de pluralités qui respectent les articulations naturelles.

Le fait que la dialectique puisse éclairer les problèmes scientifiques contemporains ne semble pas aller de soi, essentiellement car la dialectique est souvent apparue comme une mécanique fossilisée. Mais, certains auteurs comme Levins et Lewontin défendent un retour à la dialectique, selon eux indispensable en écologie (Keller & Golley 2001) :

« Both the internal theoretical needs of ecology and the social demands that it inform our planned interactions with nature requires an ecology that makes the understanding of complexity the central problem: it must cope with interdependence and relative autonomy, with similarity and difference, with the general and the particular, with chance and necessity, with equilibrium and change, with continuity and discontinuity, with contradictory processes. It must become increasingly self-

conscious of its own philosophy, and that philosophy will be effective to the extent that it becomes not only materialist, but dialectical » p225

Néanmoins la philosophie platonicienne présente plusieurs limites concernant notre recherche. D'abord le savoir est avant tout réminiscence d'un savoir préexistant. Ce présupposé platonicien explique que la phase inductive et la prise en compte de la réalité par l'observation soit relativement minorée. De ce fait, il n'analyse pas clairement le rôle de l'adéquation empirique aux faits dans la production d'unité et de pluralité référent réellement à quelque chose d'existant dans le monde matériel. Mais ce manque de prise en compte du réel, contamine aussi la vision du mécanisme d'abstraction et ne permet pas d'entrevoir la spécificité du rôle de la raison. Pour ces deux raisons, il me semble judicieux de se tourner vers Kant.

2.3. Synthèse, Analyse, Expérience

La pensée de Kant concernant le rapport entre les données de la raison et le réel est particulièrement subtile. C'est aussi le philosophe de la synthèse. Deux bonnes raisons de faire un détour par la Critique de la Raison pure quand on réfléchit sur la possibilité de résorber des pluralités par l'abstraction et la modélisation. Nous allons d'une certaine manière poser à Kant, la même question qu'à Platon : comment la subjectivité du questionnement à la base de la modélisation permet d'unifier le réel ?

Par rapport à Platon, Kant inverse la source originelle de la connaissance, elle ne provient pas d'abord de la réflexion mais de l'expérience :

« Que toute notre connaissance commence avec l'expérience, cela ne soulève aucun doute. En effet, par quoi notre pouvoir de connaître pourrait-il être éveillé et mis en action si ce n'est pas des objets qui frappent nos sens et qui, d'une part, produisent par eux-mêmes des représentations et d'autre part, mettent en mouvement notre faculté intellectuelle, afin qu'elle compare lie ou sépare ces représentations, et travaille ainsi la matière brute des impressions sensibles, pour en tirer une connaissance des objets, celle qu'on nomme expérience ? » Critique de la raison pure 2^{nde} Edition (CRP), p33.

Ce renversement induit deux conséquences fondamentales en ce qui nous concerne. D'abord, d'un point de vue épistémique, seule l'adéquation empirique aux faits nous dit *in fine* quelque chose concernant la réalité des pluralités et des unités produites. Du point de vue méthodologique, cela rend nécessaire une clarification du moment inductif qui a lieu lors du processus de modélisation et cela permet de mieux mettre en lumière la spécificité de la composante déductive. Par conséquent, le rapport des théories aux faits observés se situe à la fois en amont de la modélisation (abstraction à partir d'une situation réelle) et en aval (adéquation des résultats du modèle aux faits).

Commençons par clarifier la partie méthodologique. Selon Kant, le mode par lequel, nous nous rapportons aux objets est l'intuition. Outre le caractère intentionnel de cette intuition dont nous avons déjà largement traité, Kant pointe le fait que cette intuition se fait toujours dans l'espace et le temps, qui sont des intuitions pures *a priori*. Or l'espace et le temps pose des problèmes cruciaux à l'écologie. La continuité spatiale de nombreuses structures ou entités (e.g les communautés végétales dans le débat entre Clements et Gleason) rend difficile d'une part la définition d'entités spatiales au

contour net, d'autre part l'abstraction de ces entités en vue de les modéliser. L'écoulement du temps a pour conséquence qu'aucune entité biologique ne reste identique à elle-même. Par conséquent, toute abstraction menace de n'être plus valide la seconde suivant l'observation. Le fait que l'espace et le temps soient des intuitions et non des données issues des objets justifient une définition subjective des délimitations spatiales et temporelles.

La forme que prend notre intuition produit donc automatiquement une double pluralité dans le temps et dans l'espace, pourtant nous sommes capables d'unifier ces pluralités au cours d'une triple synthèse :

«Or celle-ci est le principe d'une triple synthèse qui se présente, d'une manière nécessaire dans toute connaissance et qui comprend la synthèse de l'appréhension des représentations comme modifications de l'esprit dans l'intuition ; celle de la reproduction de ses représentations dans l'imagination et celle de la recognition dans le concept. Ces trois synthèses conduisent aux trois sources subjectives de connaissances qui elle mêmes rendent possibles l'entendement et par lui toute expérience... » CRP, 1^{er} édition p109

Dans la seconde édition Kant, développe le rôle synthétique de l'aperception. Cette nécessaire synthèse des données issues de l'intuition est rendu possible par l'unité du sujet et du moi. C'est cette synthèse qui produit la possibilité de la connaissance *a priori*. D'une certaine façon et à une autre échelle, le modèle reproduit des synthèses analogues en unifiant dans le temps et dans l'espace les processus écologiques. Le cerveau humain synthétise le divers qui l'entoure en fonction d'une intention et selon les catégories de l'entendement. Le modèle numérique synthétise potentiellement une pluralité plus large dans le temps (plusieurs siècles) et dans l'espace (biosphère) en fonction d'une question scientifique donnée et suivant des règles logiques. L'unité ainsi réalisée correspond à ce que Kant nomme les jugements synthétiques :

« Dans tous les jugements où est pensé le rapport d'un sujet à un prédicat, ce rapport est possible de deux manières. Ou le prédicat B appartient au sujet A comme quelque chose qui est contenu dans ce concept A, ou B est entièrement en dehors du concept A, quoiqu'il soit à la vérité, en connexion avec lui. Dans le premier cas, je nomme le jugement analytique, dans l'autre synthétique » CRP, p37

La première étape de toute modélisation réside donc dans la synthèse de la pluralité issue d'une part des objets eux même et d'autre part produite par le processus d'abstraction, avec trois sources *a priori* de pluralités que sont l'intention, le temps et l'espace. A ce stade, comme dans la séquence Question-Pluralité-Unité-Contradiction de la dialectique platonicienne, les synthèses produites sont subjectives.

La séquence suivante consiste en l'analyse du modèle ainsi construit, qui correspond au moment du jugement analytique de Kant. On tire du modèle construit toutes les conséquences logiques et nécessaires dans l'espace logique que le modèle a permis de délimiter. C'est ici que Kant nous éclaire sur le rôle spécifique de la raison. Nous quittons alors l'apport méthodologique de Kant pour aborder l'apport épistémique. En effet, si l'expérience est la seule source de connaissance, la révolution copernicienne qu'opère Kant est de montrer que seule l'usage de la raison et un travail sur les

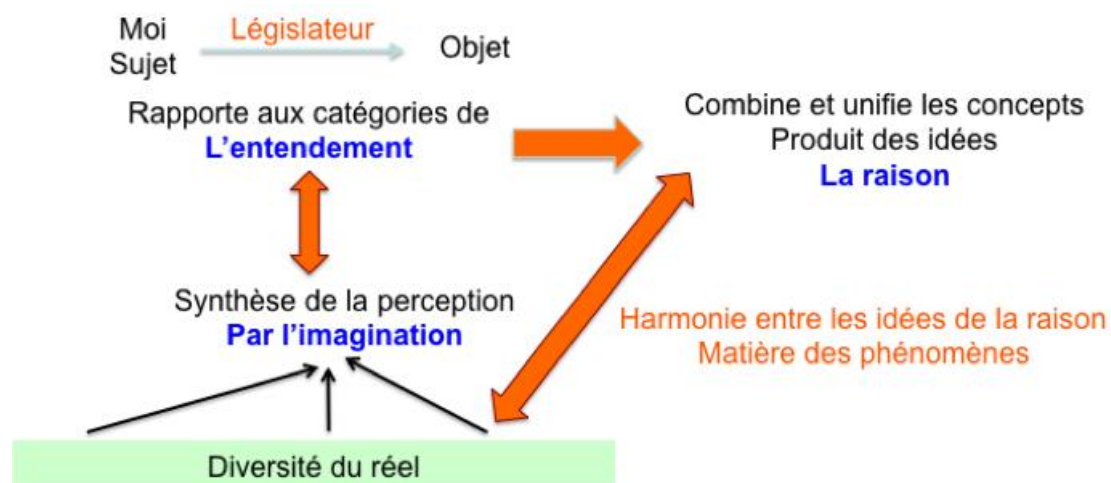
concepts abstraits est de nature à produire de la nécessité. En effet, suivant en cela Hume, il explique :

« L'expérience ne donne jamais à ses jugements une véritable et stricte universalité, mais seulement une universalité supposée et relative (par induction) (...). Quand au contraire, un jugement possède essentiellement une stricte universalité, on connaît à cela qu'il provient d'une source particulière de la connaissance, d'un pouvoir de connaissance a priori » CRP, 2nd édition, p33

Pour Kant seule la raison est législatrice et productrice de généralisations. Les modèles ainsi produits sont les seuls à permettre la réalisation de prédictions sûres et nécessaires. Mais rien n'indique que ces prédictions correspondent à quelque chose dans le monde matériel. La phase de déductions logiques qui est le propre du modèle est incapable de dire quoi que ce soit sur la valeur de vérité concernant le contenu :

« Donc le critère simplement logique de la vérité, c'est à dire l'accord d'une connaissance avec les lois générales et formelles de l'entendement et de la raison est-il est vrai la condition sine qua non et par suite, la condition négative de toute vérité ; mais la logique ne peut pas aller plus loin ; aucune pierre de touche ne lui permet de découvrir l'erreur qui atteint non la forme, mais le contenu » CRP p81

Nous pouvons déduire la figure suivante de la méthode Kantienne :



L'analogie avec les modèles est possible. La synthèse de la perception et son rapport à l'entendement correspond au processus d'abstraction et au moment inductif et synthétique de la modélisation. C'est l'étape de création du modèle. La raison qui combine et unifie les concepts correspond à la phase déductive et analytique de la modélisation. Le modèle permet alors de déduire de façon nécessaire les conséquences logiques de l'abstraction. L'espace logique de ces déductions est évidemment contraint par les choix d'abstraction. C'est l'étape de simulation du modèle. Ensuite la comparaison des déductions obtenues avec le réel consiste en la recherche de l'adéquation empirique des idées de la raison aux faits. C'est l'étape de validation du modèle. L'objectivité du savoir provient d'une part du fait que la raison est législatrice et produit du nécessaire et d'autre part de l'usage itératif de la boucle ainsi construite qui permet d'aboutir à un savoir qui soit à la fois nécessaire et en adéquation avec les faits empiriques. Nous retrouvons la même logique qu'avec la

dialectique platonicienne, mais le processus est très largement clarifié et surtout l'unité et la pluralité ainsi construites correspondent potentiellement à la fin du processus à une unité et ou une pluralité réellement structurante du monde.

La philosophie kantienne décrit relativement bien les mécanismes d'abstraction et l'articulation du pluriel et de l'unité, mais sa réponse au dilemme entre la subjectivité de l'abstraction et l'objectivité du savoir demeure insatisfaisante. En effet, pour l'instant rien ne nous dit que le processus itératif <Induction par synthèse, déduction par analyse, évaluation par mesure de l'adéquation aux faits> conduise vraiment vers une solution unique à l'unification d'une pluralité, unification sous-jacente au pari moniste et réaliste. Pour mieux comprendre comment ce processus se déroule nous allons nous tourner vers Bourdieu et Popper.

2.4. L'intentionnalité dans le champ scientifique et falsification des modèles

Le principal objectif de cette seconde partie était d'analyser si l'intentionnalité propre à l'activité de modélisation n'était pas productrice d'une pluralité irréductible qui rendraient les modèles structurellement incapables de produire une unification des phénomènes. Le détour par Platon et par Kant, m'a d'abord permis de confirmer l'intuition de la première partie. La modélisation correspond bien à une source originelle d'unification des phénomènes. Nous avons en plus démontré que pluralité et unité étaient intimement entrelacées et que l'intention qui gît dans la question était à la fois ce qui produisait une pluralité et ce qui était moteur d'unité ; le questionnement pousse mécaniquement à diviser et à unir. Nous avons enfin indiqué que l'unification présentait deux composantes, une unification en tant que méthode qui a le mérite de faire jaillir les contradictions, que nous devons distinguer de la recherche ce qu'il y a de réellement uni ou pluriel dans le monde matériel. Cette recherche de l'unité dans le monde réel, c'est à dire la recherche d'articulations naturelles, peut potentiellement être obtenue quand on parcourt de façon itérative la séquence <induction, déduction, validation>. Néanmoins, deux questions restent à traiter. Premièrement, j'ai étudié ces problèmes à partir d'une vision individuelle de la science. Qu'en est-il quand on plonge ce processus itératif dans le champ social scientifique réel ? Deuxièmement, existe-t-il des obstacles de nature méthodologique à l'avancement itératif de délimitation d'unité réel et non seulement idéal ?

Je partage l'idée défendue par Bourdieu que la science est une pratique sociale particulière. Nous ne pouvons-nous contenter d'assimiler la modélisation au processus d'abstraction et d'idéalisation tel qu'il se présente à nous dans la vie courante. Bourdieu (2001) explicite la spécificité des règles du champ scientifique. La circulation des idées et le mode de circulation de ces idées produit de la dépersonnalisation et donc dilue le caractère intentionnel de la science :

« Les études de laboratoires ont oublié ou grandement sous-estimé la logique inséparablement sociale et intellectuelle de cette circulation et les effets de contrôle logique et empirique, et par là d'universalisation qu'elle produit. La circulation critique est un processus de départicularisation, de publication, au double sens d'officialisation et d'universalisation, aboutissant à ce que Eugène Garfield appelle, l'oblitération de la source des idées, des méthodes et des découvertes par leur incorporation dans la connaissance admise » p147

Par conséquent au niveau interindividuel, la pluralité intentionnelle due à la pluralité de questionnements est partiellement dissoute par le processus social de la pratique de la science. Prenons un exemple en modélisation, un modèle utilisé dans une situation pour répondre à une question est souvent utilisé pour répondre à une autre question dans une autre situation. Cet usage intervient de façon opportuniste. Certes il peut produire des résultats faux car il ne convient pas à la nouvelle question et à la nouvelle situation. Mais le processus critique d'une part et ce que Bourdieu appelle le principe de réalité (i.e c'est à dire l'adéquation du modèle à la réalité empirique) corrige potentiellement les mésusages. Cela peut aboutir à une production de modèles, qui rendent compte d'une classe de phénomènes plus large que celle pour laquelle ils ont été créés. Dans ce processus, on a donc bien une dissolution de l'intentionnalité. La question et la situation qui ont prévalu à la création du modèle disparaissent bien.

Néanmoins, à une échelle sociale plus large, la discipline scientifique, le phénomène peut s'inverser. En effet, Bourdieu (2001) indique que :

« La discipline est définie par la possession d'un capital collectif de méthodes et de concepts spécialisés dont la maîtrise constitue le droit d'entrée tacite ou implicite dans le champ. Elle produit un transcendantal historique, l'habitus disciplinaire comme système de schèmes de perception et d'appréciation (la discipline incorporée agissant comme censure) » p129.

Par conséquent, la discipline fonctionne comme agent de canalisation des questionnements. Cette unité sociologique, dont nous avons déjà traité par ailleurs, crée de l'unité intentionnelle au sein de la discipline, mais sanctifie de la pluralité intentionnelle entre disciplines. En écologie, ceci peut se retrouver entre sous disciplines. Certaines d'entre elles ont des questionnements qui leur sont propres, ce qui aboutit à des abstractions propres à chacune des sous disciplines. Comme la circulation des idées est plus forte en intra-discipline, les moyens mis en œuvre dans la phase d'idéalisation des modèles puis leur analyse, peuvent être aussi similaires au sein de la même sous discipline. Cela conduit les modèles d'un même domaine à avoir entre eux un air de famille et des modèles issus de domaines différents à sembler incommensurables.

Néanmoins, comme le montre Bourdieu cette clôture du champ disciplinaire est ce qui donne à la science son efficacité à établir des vérités. En effet, face à un questionnement délimité, une communauté réduite est plus à même de régler le rapport critique nécessaire au progrès de la science. Le fonctionnement réel de la science tend donc à ce que les modèles puissent bien rendre compte des unités et pluralités dans la nature déduites à partir d'un questionnement scientifique local, mais moins celle qui correspondent à un raisonnement scientifique globale. Si on casse les barrières disciplinaires, on se donne la possibilité d'aboutir à des généralisations plus larges, mais on prend le risque qu'elles soient plus fausses et moins faciles à tester empiriquement. Les modèles en écologie sont souvent confrontés à ce dilemme. Par exemple, dans le cas étudié dans le chapitre précédent du modèle d'Enquist et al., (1998), qui développe une relation générique entre la densité et la masse de tous les végétaux à partir d'une théorie métabolique, les chercheurs spécialisés dans un domaine plus spécifique de l'écologie ont produit des contre-exemples de cas où cette

théorie était fausse. Notamment si cette loi semble juste pour comparer des espèces entre elles, elle est fausse au niveau intra-spécifique (Mencuccini 2002).

Nous avons donc bien ce que Popper (1979) nomme une épistémologie sans sujet connaissant qui opère par falsification et autocorrection et qui dissout la pluralité des intentionnalités individuelles. Mais dans la fabrique de ce qu'il appelle le 3^{ème} monde, il n'existe pas une circulation non faussée des questionnements et par conséquent des modes d'abstraction. Le processus itératif décrit précédemment qui devrait permettre de déduire les articulations naturelles du monde et les connecter, n'est pas parfait. Ce processus comprend lui-même une contradiction entre vérité et unité. Un modèle du « tout », s'il était possible à réaliser, ne serait pas vérifiable du point de vue empirique.

Cette conclusion nous amène à traiter le second point : celui des obstacles proprement méthodologiques et logiques à l'accomplissement du processus itératif dans le cas des modèles. Revenons brièvement au falsificationisme de Popper. La logique de la découverte suit une mécanique totalement similaire à celle de la sélection naturelle (Popper 1979):

« Nous pouvons donc dire que la science commence par des problèmes, et progresse à partir de là vers des théories concurrentes, qu'elle évalue de manière critique. L'évaluation de leur vérissimilitude a une portée particulière, car elle exige des tests critiques rigoureux et présuppose par conséquent, de hauts degrés de testabilité, qui dépendent du contenu de la théorie et que l'on peut évaluer a priori. Dans la plupart des cas, et dans les cas les plus intéressants, la théorie finira par s'effondrer et par donner naissance ainsi à de nouveaux problèmes. Et on pourra évaluer le progrès réalisé grâce à l'écart intellectuel entre le problème d'origine et le nouveau problème qui résulte de l'effondrement de la théorie » p230

Puis il décrit le cycle suivant :

« Problème P1 -> Théorie à l'essai -> élimination de l'erreur avec évaluation-> problème P2 » p230.

La théorie de la connaissance objective de Popper rejoint donc dans une certaine mesure le processus itératif que nous avons dressé avec Platon puis Kant. Mais Popper insiste sur deux points importants. Suivant en cela Darwin, le nouveau et le vrai émergent de la négation, seul moment logique qui permet de produire une certitude. Le second point est que l'évaluation de la théorie est centrale, or pour assurer que l'on puisse comparer la théorie aux faits, il faut que celle-ci soit falsifiable. Or Popper montre que les théories ont une fâcheuse tendance à se construire de manière à ne pas pouvoir être réfutées.

Si on revient aux modèles, il faut d'une part qu'ils puissent être effectivement comparer à des faits pour que les propositions théoriques qu'ils contiennent puissent être falsifiés et d'autre part qu'ils ne soient pas immunisés contre la falsification. Les modèles doivent donc aboutir à des prédictions pouvant être comparées à des mesures des phénomènes et ils ne doivent pas être plurivoques, c'est à dire aboutir après analyse à des conclusions contradictoires selon l'espace des paramètres. Cela nous

permet de délimiter certaines des caractéristiques des modèles de manière à ce que le processus itératif puisse être un succès.

Néanmoins, il demeure un dernier problème qui mine le processus de falsification de Popper dont nous avons déjà fait état dans le chapitre précédent. C'est la critique de Quine et de Duhem. En effet, le problème est que dans la réalité, il est difficile de falsifier avec assurance une théorie. Ce qui est vraie d'une théorie, l'est encore plus des propositions théoriques contenues dans un modèle numérique informatisé. En effet, une inadéquation entre les faits empiriques et les simulations ne permet pas de savoir quelle composante du modèle est invalidée. Par ailleurs, comme les erreurs d'une composante du modèle peuvent compenser les erreurs d'une autre composante du modèle, l'adéquation entre faits et simulations, ne conduit pas nécessairement à valider le modèle.

2.5. Conclusion aporétique

Notre conclusion à ce stade ne peut qu'être aporétique. Si la modélisation semble bien être un candidat sérieux pour dépasser le pluralisme en écologie, du fait même de sa nature. Trois problèmes se posent quant à la réalisation de ce dépassement.

- D'abord, le modèle produit une pluralité du fait de sa nature intentionnelle. Mais cette pluralité peut potentiellement être dépassée par un processus itératif intersubjectif critique. Certaines représentations sont éliminées et seules les pluralités et unités correspondant aux articulations du monde sont conservées. Néanmoins, dans les faits sociologiques, l'existence de disciplines scientifiques ne permet pas une disparition totale de cette pluralité intentionnelle.
- Ensuite, ce processus itératif critique est censé aboutir à délimiter des unités et des pluralités correspondant aux articulations réelles du monde. Mais pour cela, il faut que les modèles puissent être comparées aux faits. Or la falsification des propositions théoriques contenues dans les modèles semble a proprement parlé impossible, notamment car ces derniers sont toujours sous déterminés par les faits.
- Enfin, ce faisant, nous avons montré l'existence d'une contradiction apparemment insoluble entre accroître l'extension de la classe de phénomènes dont un modèle rend compte et évaluation du modèle par les faits.

Nous allons donc maintenant essayer de voir si une étude des modèles en écologie nous permet d'avancer et de sortir de cette situation aporétique.

3. Typologie des modèles en écologie

Par rapport aux types d'unifications que nous avons listés, nous allons voir ce que la modélisation actuelle en écologie peut nous apprendre de l'unification nomologique ainsi que de l'unification des méthodes et voir comment elle complète ce que nous avons dit de l'unification des phénomènes. Nous allons partir d'une pluralité, car

comme l'écologie est caractérisée par une pluralité de styles, que nous avons détaillée dans la partie précédente, elle est aussi le lieu d'une pluralité de types de modèles.

3.1. Modèles phénoménologiques statistiques

Les modèles statistiques ou « empiriques », permettent d'établir à partir d'observations ou d'expérimentations des liens entre différentes variables observées. Je vais me servir d'un exemple concret tiré de l'article suivant auquel j'ai moi-même participé (Davi et al. 2011): « Diversity of leaf unfolding dynamics among tree species: New insights from a study along an altitudinal gradient »

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le débourrement (i.e la mise en place des feuilles au printemps). La date à laquelle a lieu le débourrement est fortement dépendante de deux processus, (i) la quantité de froid accumulée au hiver ; au-delà d'un seuil, la dormance est levée, (ii) la quantité de chaleur accumulée au printemps. La date de débourrement est donc sensible dans l'espace (e.g entre altitudes) et dans le temps (e.g entre années) aux variations de températures. C'est donc aussi un bon indicateur des changements climatiques. Dans cet article, nous avons étudié comment la réponse dans le temps et dans l'espace de la date de débourrement changeait selon les espèces.

En général, la question détermine strictement le choix des observations. En réalité, ici ce fut l'inverse. Nous disposions dans le cadre d'un projet, d'un suivi sur certaines espèces de différentes caractéristiques d'arbres mesurées le long d'un gradient altitudinal. Le projet a été mis en place avant mon arrivée dans l'équipe, donc le questionnement qui était le mien, est postérieur au choix du dispositif. Néanmoins, cette inversion n'est pas décrite dans l'article qui correspond à un récit fictif reconstruit *a posteriori* de manière à rendre compte des résultats. Mais le choix des arbres et du site correspond bien à une intention et il contingente les résultats: la tradition de recherche dans notre laboratoire est de travailler sur les forêts du Ventoux et ici nous avons étudié un gradient environnemental ce qui est courant en écologie.

La première abstraction consiste à estimer des grandeurs quantitatives indicatrices de la précocité ou non du débourrement à partir de mesures hebdomadaires de l'état du débournement du feuillage de chaque arbre. Ces mesures se font à la jumelle et sont qualitatives (avec 5 stades). Les grandeurs quantitatives déduites de ces mesures sont les suivantes :

D4→5 la date moyenne de passage du stade 4 au stade 5.

SNP= Somme des notations phénologiques.

Ensuite nous avons regardé comment ces deux grandeurs variaient entre espèces, entre deux années de mesures, puis entre altitudes. Chaque effet a été étudié d'abord un par un, puis pris tous ensembles en utilisant des modèles linéaires généralisés. La formalisation mathématique du modèle prend cette forme :

$$SNP = a \times altitude + b \times espece + c \times année + d \times diamètre + \epsilon$$

Ici je présente le modèle complet sans les effets d'interaction (deux à deux). Mais celles ci ont aussi été prises en compte. Notons que dans ce type de modèle statistique, il est possible d'agréger des facteurs quantitatifs (altitude) et qualitatif

(espèce, année). Ce type de modèle correspond alors à une analyse de covariance (ANCOVA). Cette méthode statistique permet de tester par un modèle linéaire général, l'effet sur une variable dépendante continue (SNP) d'une ou plusieurs variables indépendantes catégorielles (espèce, année), indépendamment de l'effet d'autres facteurs quantitatifs continus, dits covariables (altitude). En d'autres termes, l'ANCOVA est une combinaison entre une ANOVA (analyse de variance) et une régression linéaire. La qualité du modèle est représentée par le coefficient de détermination, qui évalue l'écart entre les mesures et les estimations du modèle. Les résultats prennent la forme suivante :

Table 12: Tableau des résultats de l'ANCOVA pour expliquer les variations de dates de débourrement au Ventoux

Variables	Df	SumSq	MeanSq	Fvalue	Pr(>F)
Année	1	5832	5832	244.89	<2.2e-16
Altitude	1	3645	3645	153.05	<2.2e-16
Espèce	4	102973	25743	1081.01	<2.2e-16
Année * Espèce	4	596	149	6.2523	6.54E-05
Altitude: Espèce	4	926	231	9.7191	1.45E-07
Altitude*Diamètre	1	155	155	6.5008	0.0110914
Diamètre	1	71	71	2.995	0.0841618
Année*Altitude	1	77	77	3.2536	0.0718931
Résidus	482	11478	24		

Df= nombre de degrés de liberté, SumSq= racine carré de somme des carrés, Fvalue= la valeur de Fisher, Pr(>F) la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle (e.g la date de débourrement ou SNP ne varie significativement selon les années à tort)

La significativité de l'effet de chaque variable est testée à partir de la variance de SNP expliquée par chacune d'entre elles. Evidemment le résultat dépend des variables et des types d'interaction prises en compte dans le modèle. De plus, certaines variables peuvent être prise en tant que cofacteur quantitatif (e.g altitude en mètres), ou en tant que variable discontinue (e.g différentes classes d'altitudes). La construction du modèle dépend donc de la question posée, mais aussi des observations à disposition du chercheur.

Ce type de modèles empiriques embarque plus faiblement dans le modèle des présupposés théoriques. Ces modèles sont plutôt associés à un mode de raisonnement de type inductif et sont relativement proches des données. Leur niveau de généralisation est strictement limité à l'extension des phénomènes qui a prévalu à leur construction. Dans une autre forêt que celle étudiée et pour d'autres années, le modèle est potentiellement non valable. Il a donc un faible pouvoir générique. Mais l'interprétation des résultats issus du modèle fait en général intervenir les arrières plans théoriques dans la discussion. C'est le cas dans notre exemple (Davi et al., 2011):

« Although based on a subset of species, our work reveals that there are at least four essential leaf unfolding strategies in the studied tree species. First, early shade intolerant species (A. opalus, S. aria) showed a year effect whose plasticity (i.e. variability between years) concerns the beginning of the process of leaf unfolding. These species were also probably sensitive to water availability, which explains a

variable altitudinal effect that was more pronounced in a wet year than in a dry year. These characteristics are consistent with the autecology of shade intolerant deciduous species that need a very quick leaf unfolding strategy to avoid shade... » p1511.

Que nous dit l'analyse de ces modèles empiriques concernant le rôle unificateur des modèles ? Ces modèles permettent une unification linguistique comme tout modèle par la clarification des termes et le choix des entités abstraites. Mais comme l'abstraction est relativement conditionnée par le jeu de donnés, cette unité linguistique permise par les mathématiques est ici relativement circonscrite.

Ces modèles présentent un faible pouvoir d'unification nomologique. En effet, ils ne font pas explicitement référence à des lois théoriques connues dans le domaine. Néanmoins, ces lois sont implicitement prises en compte dans la création du modèle (i.e choix des variables explicatives) et dans l'interprétation du modèle en discussion. Donc qualitativement ces modèles apportent des informations sur l'arrière-plan théorique et donc peuvent participer à une unification nomologique. Mais le lien entre résultats du modèle empirique et unification nomologique est ténu.

Par contre, ils permettent assez précisément de quantifier le niveau d'unification des phénomènes. En effet, ces modèles sont par essence directement confrontés aux observations et le niveau d'adéquation entre le modèle et les observations donnent la part de la variance observée dans les phénomènes qui est expliquée par l'unification produite par le modèle. Ici c'est le rapport entre variances des différents effets sur la variance totale. Dans notre cas, les différentes variables mesurées expliquent plus de 50% de la variance totale des dates de débourrement mesurées. Mais l'unification ne correspond pas à une unification logique de la réalité. Le modèle empirique ne dit presque rien de la nature relationnelle entre les variables explicatrices. Il est muet quant à expliquer par exemple pourquoi les arbres de gros diamètre et de faibles altitudes débourrent plus tôt. Il nous dit juste que le phénomène « date de débourrement » de l'arbre x est statistiquement relié aux phénomènes « taille de l'arbre x », « altitude de l'arbre x », « année de mesure du débourrement », et « espèce de l'arbre x ».

3.2. Modèles théoriques

Comme le rappellent Keller & Golley (2000), l'utilisation des modèles théoriques pour unifier les théories écologiques est assez ancienne. Elle a pour origine le puissant courant rationaliste existant en écologie.

« Rationalism is well represented in scientific ecology. Ecologists have claimed over and over again that the science needs unifying principles- a well-developed and coherent body of theory. As early 1880, Stephen Forbes noted the importance of theoretical models in ecological investigation: « To determine the primitive order of nature by induction alone requires such a vast number of observations in all parts of the world, for so long period of time, that more positive and satisfactory conclusions may perhaps reached if we call in the aids of first principles, traveling to our end by the a priori road » ». p137

Un des actes fondateurs de l'écologie théorique demeure le modèle de prédation de Lotka et Volterra datant des années 1920 (Keller & Golley 2000) et que j'ai déjà

largement évoqué. Je vais prendre ici un exemple plus contemporain qui concerne l'analyse du concept de plasticité dans un article de 2010 de Chevin intitulé : « *Adaptation, Plasticity, and Extinction in a Changing Environment: Towards a Predictive Theory* » (Chevin et al., 2010).

Les changements globaux modifient fortement l'environnement abiotique des populations naturelles et menacent leur survie. Les organismes peuvent s'adapter à ces nouvelles conditions suivant deux mécanismes. La plasticité phénotypique correspond à la modification directe par l'environnement des caractéristiques des individus sans modification du patrimoine génétique des populations. L'adaptation génétique consiste en la modification du patrimoine génétique de la population et la sélection des individus plus adaptés aux nouvelles conditions. Les auteurs de l'article présentent leurs objectifs à la fin du résumé (Chevin et al., 2010):

«We use environmental tolerance curves and other examples of ecological and evolutionary responses to climate change to illustrate how these mechanistic approaches can be developed for predictive purposes. » p1

En introduction, ils rappellent que pour étudier l'impact des changements environnementaux sur la persistance des espèces, il existe deux types de modèles : les modèles de niche et les modèles simulant de façon mécaniste la dynamique des populations.

Les modèles de niche appliquent la théorie de la niche écologique de Hutchinson et estime à partir des distributions actuelles d'une espèce, la relation statistique entre sa présence/ absence d'une part et les variables climatiques d'autre part. Notons que ces modèles de niche correspondent typiquement aux modèles empiriques que j'ai décrit précédemment. Mais on voit bien que par-delà leur caractère empirique, ils s'inscrivent dans une théorie écologique qui permet de justifier leur utilisation (théorie de la niche). Il est intéressant de voir comment ces auteurs critiquent ces modèles empiriques (Chevin et al., 2010) :

« Aside from the methodological caveats of this approach (changing covariance of environmental variables, population demography not in equilibrium with changing climate, spatial scale of the analysis, and source-sink dynamics allowing individuals to exist outside their niche), its major drawback is that it does not account for the biological processes underlying adaptation of a species to its environment » p1

Le fait que ces modèles ne prennent pas en compte les mécanismes biologiques fondamentaux qui sont sous-jacent à l'adaptation potentielle des populations, les rendent impropres à prédire et à expliquer le devenir des espèces. A *contrario*, les modèles de dynamiques des populations couplées aux modèles d'évolution génétique permettent de prédire cette évolution avec plus d'assurance. Mais pour l'instant, ces modèles ne prenaient pas explicitement en compte l'impact de la plasticité des caractères sur la dynamique de la population. Les auteurs proposent d'utiliser ce type de modèle théorique en les complétant par une prise en compte de l'environnement. Ils donnent la description suivante de leur modèle :

« We assume that a continuous environmental parameter e (e.g., temperature or precipitation) changes at a constant rate g in time. Adaptation to this changing

environment is mediated by a quantitative trait z that determines fitness (...). Population growth is assumed to be density-independent (...). We include phenotypic plasticity in the trait z , such that a given change in the environment directly modifies the phenotype of each individual by a constant amount » p3

Cette prise en compte de la dynamique de la population comme de l'environnement ne correspond pas à une espèce donnée, c'est un modèle totalement théorique, qui abstrait les relations attendues entre adaptation, plasticité et survie de l'espèce. Nous retrouvons la même caractéristique que lors de l'étude du modèle proie-prédateur. L'objet écologique ne compte pas. Il n'y a pas vraiment de phase inductive puisqu'on ne part pas ici d'une situation réelle. Evidemment, les auteurs ont en tête des situations réelles, mais ils ne s'en servent pas explicitement pour réaliser leur abstraction. Celle-ci correspond à une abstraction que je qualifierais de second ordre faite d'abstractions déjà existantes et pas directement d'objets réels.

Ensuite ils déduisent de ce modèle toutes les conséquences logiques qui leur semblent importantes, d'abord en l'absence d'une prise en compte de la plasticité:

« The original model revealed how the phenotypic variance s^2 and heritability h^2 of the trait, the strength of stabilizing selection c , and the maximum intrinsic rate of population growth r_{max} determined the critical rate of environmental change in the absence of phenotypic plasticity » p3

Puis en rajoutant la plasticité, ils concluent :

« The critical rate of environmental change for long-term persistence increases with decreasing absolute difference between the environmental sensitivity of selection and phenotypic plasticity. Although plasticity causes weaker natural selection on the trait and smaller genetic response to selection, this is more than compensated by the plastic phenotypic change that brings the mean phenotype closer to the optimum » p3

La phase importante réside dans la phase analytique et déductive. La force de ce type de modèle est que sa simplicité permet une résolution mathématique dans tout l'espace des paramètres (i.e on parle de résolution analytique). Cela permet d'explorer tout l'espace logique donné par un modèle, indépendamment de toutes ses instanciations potentiellement réelles. En effet, fixer un jeu de paramètres revient à choisir une espèce ou un objet particulier. L'exploration de tout l'espace logique est parfaitement visible quand on examine la Figure 5 (Chevin et al., 2010). Le modèle permet de déterminer dans quel espace des paramètres, la survie ou l'extinction de l'espèce a lieu. *A priori* si la plasticité n'avait pas de coût, plus l'espèce est en moyenne plastique, plus sa probabilité de survie augmente. Mais dès qu'on prend en compte un coût à la plasticité, alors son effet peut s'inverser. Ce résultat n'est pas forcément évident intuitivement.

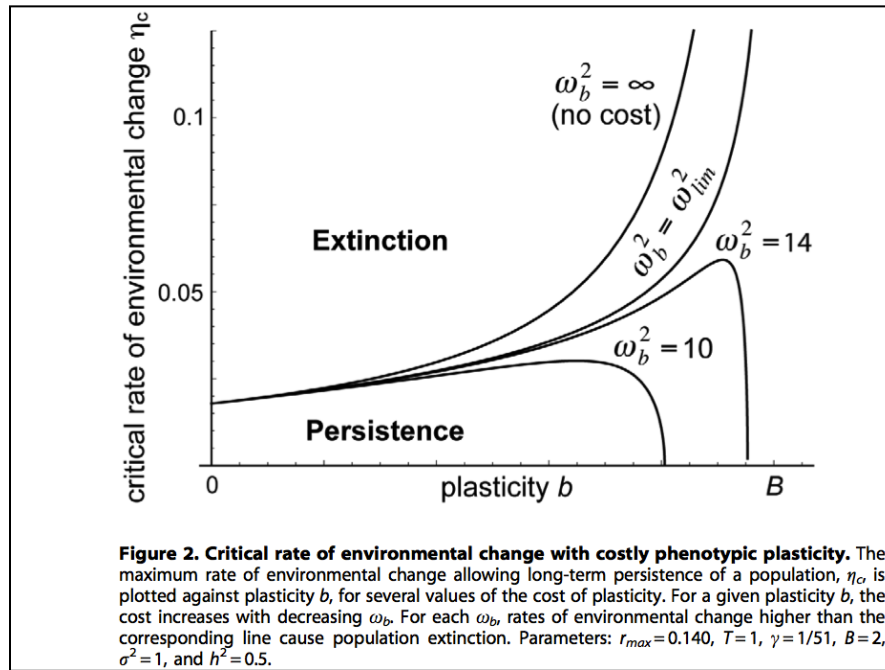


Figure 5: Taux critique de changement environnemental conduisant à la mort et plasticité (Chevin et al., 2010)

L'unification nomologique est l'objectif central de ce type de modèle, puisque le modèle théorique cherche à démontrer comment une pluralité de comportements réels des populations peut être la conséquence d'un mécanisme unique. La construction du modèle montre comment les différentes théories peuvent s'emboîter facilement puisque l'objet même de l'article est de connecter la théorie concernant l'adaptation génétique (relation fitness environnement) et celle concernant la plasticité phénotypique (norme de réactions). La figure 6 donne les paysages adaptatifs correspondant à différentes normes de réaction (plasticité) et à différentes courbes de tolérance (adaptation génétique). Elle illustre bien l'unification de deux lois précédemment étudiées séparément.

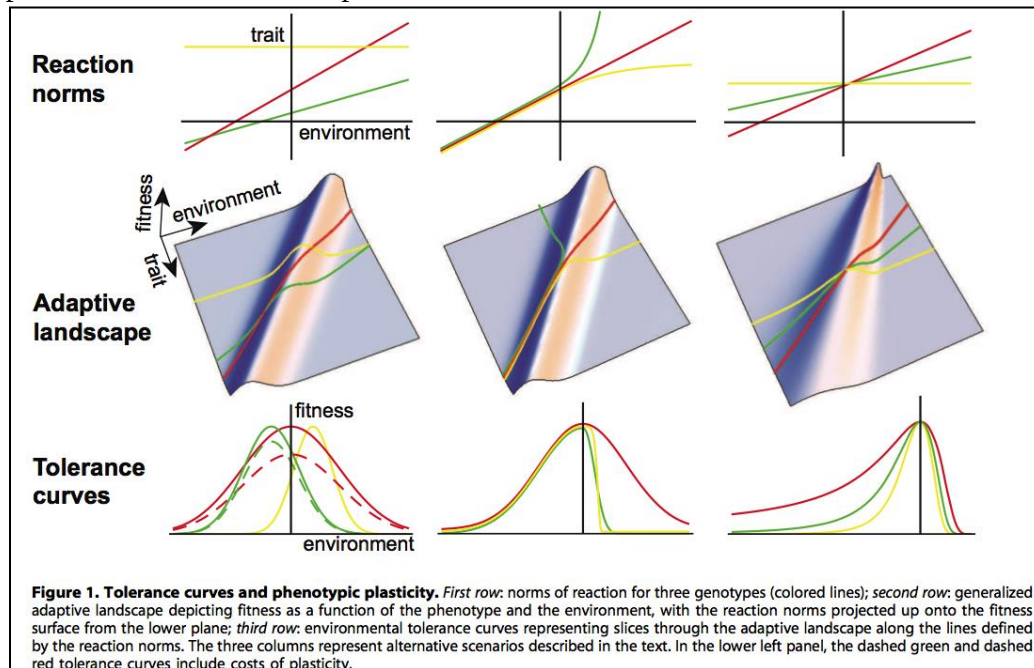


Figure 6: Courbe de tolérance des espèce et plasticité (Chevin et al., 2010)

L'unification des phénomènes est potentiellement maximale, mais à ce stade rien n'indique qu'aucune population réelle ne se comporte comme ça. Donc l'unification reste purement idéelle et rien ne prouve qu'elle est l'image d'une unité réelle dans le monde. Néanmoins, en général ce type de modèle est confronté à des relations générales obtenues à partir des observations. Le modèle sert alors à interpréter ces résultats empiriques. C'est le cas quand les auteurs revisitent un ancien problème écologique à la lumière de leurs résultats (Chevin et al., 2011):

« In the literature on tolerance curves, the cost of plasticity is generally expressed as a trade-off between tolerance breadth and fitness in the optimum environment, corresponding to the intuitive idea that the “Jack-of-all-trades is a master of none.” This has been modelled, but the empirical evidence is still controversial and based mainly on comparative data among taxa rather than on within-species variation. We propose that this trade-off may be a consequence of the cost of plasticity for an underlying phenotypic trait » p6

Mais notons que l'absence de lien entre le modèle et des faits observationnels d'une part, et leurs conclusions plurivoques d'autre part (selon le jeu de paramètres presque tous les cas sont possibles), les immunisent contre la falsification. Pour conclure, si les modèles empiriques étaient plutôt du côté observationnel et inductif, ces modèles théoriques favorisent plutôt l'aspect théorique et déductif.

3.3. Modèles de simulations

Les modèles de simulations sont d'usage plus récent. Contrairement aux modèles théoriques, il vise à expliquer une situation donnée bien particulière (e.g la dynamique d'un peuplement de chênes en fonction de différents régimes de coupe, la dynamique population de truites dans une rivière). En contrepartie, l'espace des paramètres est au départ fixé par la situation étudiée. L'estimation de ces mêmes paramètres a même conduit au développement de champs scientifiques spécifiques (e.g méthodes d'inversion des modèles). Mais contrairement aux modèles purement empiriques, ils intègrent souvent des composantes théoriques, notamment quand cela permet de mieux prédire l'évolution des systèmes quand l'environnement change.

Leur développement doit beaucoup à l'accroissement des moyens de calcul et à l'informatique. Ils jouent un rôle particulièrement important dans les domaines où la prédiction quantitative de l'évolution de certaines variables est importante. C'est pour cette raison qu'ils se sont développés en météorologie, en climatologie, en agronomie ou en foresterie. Ils dérivent des modèles utilisés généralement dans les sciences de l'ingénieur. Pour détailler leur rôle, je vais prendre l'exemple du modèle CASTANEA tiré des deux articles suivant auxquels j'ai participé :

« Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. » (Dufrêne et al., 2005)

« Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part II: Validation for each individual processes from organ to stand scale. » (Davi et al., 2005)

Examinons les objectifs de ce travail de modélisation. L'augmentation de la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère est à l'origine de changements

climatiques importants. Or la végétation stocke une partie du carbone émis par les activités anthropiques. Il est donc indispensable de mieux quantifier le cycle du carbone dans les biomes terrestres. Cependant, si cette quantification du cycle du carbone est nécessaire à une échelle globale, la réponse de la végétation à son environnement est d'abord connue à l'échelle de la feuille et de l'arbre. La communauté des écophysiologistes a développé des modèles de photosynthèse et de transpiration à l'échelle de la feuille puis de l'arbre. Ces modèles ont pu être améliorés et évalués par de nombreuses mesures d'échanges gazeux. Mais les mesures de flux d'eau et de carbone au-dessus des couverts, réalisées par les méthodes micrométéorologiques⁴⁸ permettent désormais de valider des modèles complexes de simulation de ces mêmes flux à l'échelle de la forêt. En parallèle, les mesures de flux de sève permettent de décomposer la part de transpiration et d'évaporation dans l'évapotranspiration des couverts et des mesures locales de respiration nous donne la possibilité de distinguer les différentes composantes du flux respiratoire. L'objectif de ce travail était de développer et valider un modèle générique capable de prédire les flux de carbone et d'eau dans les écosystèmes forestiers. La première étape était de développer ce modèle pour une hêtraie spécifique située dans le nord-est de la France pour laquelle nous disposions à la fois de mesures de flux d'eau et de carbone au-dessus du couvert et de mesures écophysiologiques à des échelles plus fines (e.g organe, plante) permettant la paramétrisation et l'évaluation des différents compartiments du modèle.

Le processus d'abstraction dans ce modèle devait répondre à une triple exigence :

- (i) Permettre de représenter assez précisément les processus qui ont lieu dans une forêt réelle afin de pouvoir comparer les simulations aux mesures.
- (ii) Avoir un rôle prédictif, donc donner une représentation suffisamment mécaniste pour que le modèle puisse être utilisé de façon prédictive.
- (iii) Le modèle devait être suffisamment générique pour être transposable sur d'autres sites avec la même espèce (du hêtre à Fontainebleau) ou pour d'autres espèces (ce qui fut fait par la suite).

Je ne peux pas décrire l'ensemble du modèle ici. Par contre, je vais en décrire certaines parties pour exemplifier comment la pluralité est abstraite dans ce cas précis.

Dans une forêt vue du point de vue verticale (cf la photo p 98), la première source de pluralité concerne les variations de tailles entre arbres. Dans le modèle CASTANEA ces variations sont éliminées, le modèle abstrait la forêt comme un arbre moyen avec cinq compartiments physiquement localisés : tiges, branches, feuilles, grosses racines et fines racines et un compartiment physiquement non localisé : les réserves glucidiques. Le couvert est schématisé par une série de strates horizontales d'indice foliaire (i.e la surface de feuilles par surface de sol). Seule la variabilité verticale des propriétés photosynthétiques et de la respiration des feuilles est prise en compte. Le modèle ne tient compte d'aucun type de variabilité horizontale (e.g les variations entre arbres ou les variations du sol). Par contre, les processus relatifs aux flux verticaux d'eau et de carbone sont très finement détaillés. Le modèle simule la Production Primaire Brute (PPB), la respiration autotrophe aérienne en distinguant feuilles et tronc et souterraine en séparant fines et grosses racines, la respiration

⁴⁸ <http://fluxnet.ornl.gov/>

hétérotrophe des bactéries du sol, l'évapotranspiration du couvert et le drainage de l'eau. A partir de ces flux, l'évolution des stocks de carbone du sol, la croissance aérienne et souterraine du bois et la dynamique d'eau dans le sol sont calculés.

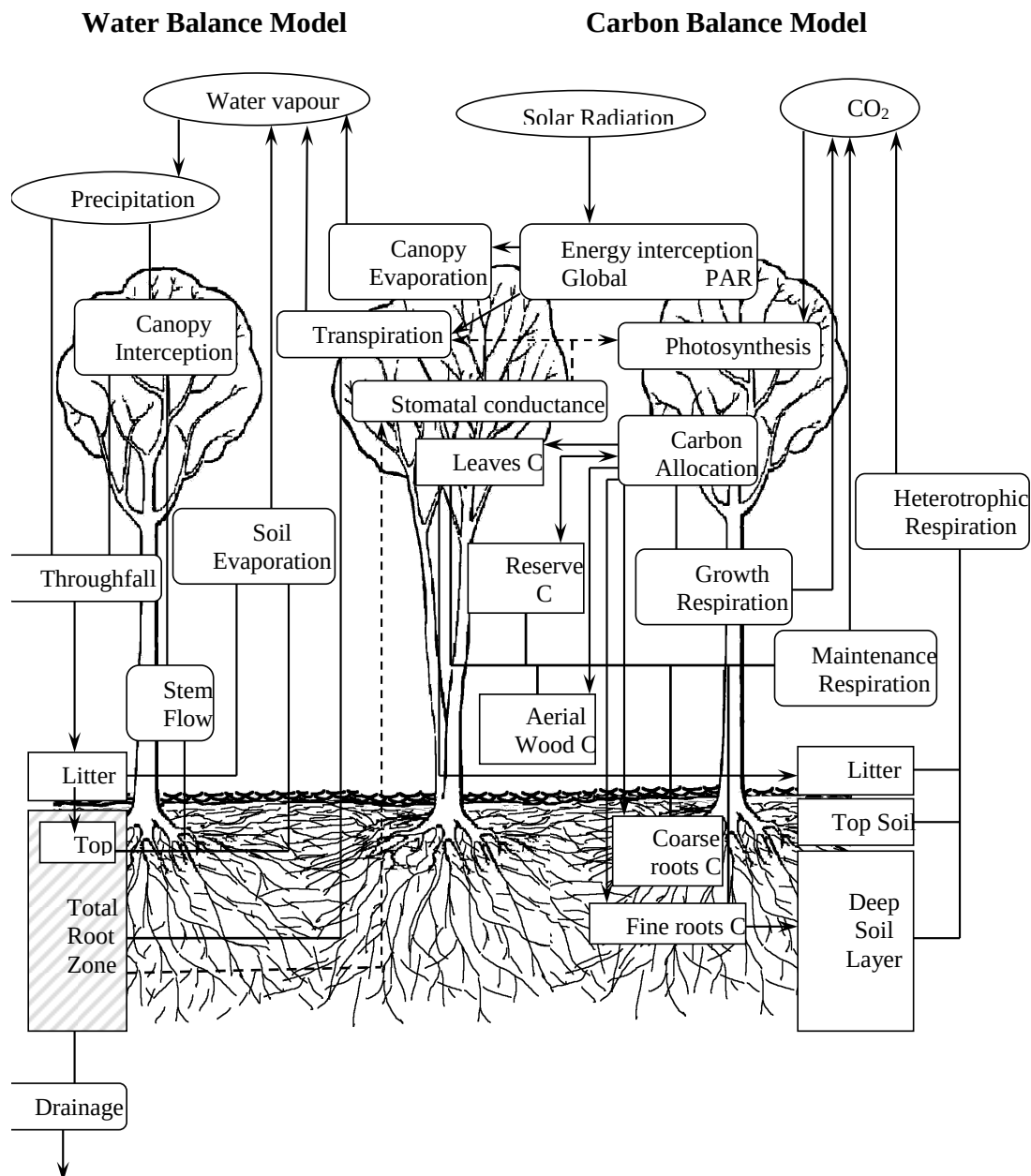


Figure 7: Représentation des processus modélisés dans CASTANEA (Dufrêne et al., 2005)

Les flux sont calculés à un pas de temps semi-horaire alors que l'évolution des stocks (eau et carbone) est implémentée quotidiennement. Le processus d'abstraction est donc complètement conditionné par la question posée, mais aussi par les mesures à disposition pour valider le modèle. En effet, par exemple les flux de carbone mesurés prennent en compte la respiration du sol, donc comparer modèle et mesures rend nécessaire la représentation du compartiment sol et de la respiration des pools bactériens (alors que les connaissances pour cette partie du modèle relève d'une autre discipline).

Entrons plus avant dans la description du modèle pour analyser comment les processus sont abstraits. Je vais prendre l'exemple de la photosynthèse foliaire. Le modèle CASTANEA inclue le modèle de photosynthèse de Farquhar dont nous avons déjà traité dans la première partie. La photosynthèse foliaire est calculée par strates de feuilles qui sont structurées verticalement suivant la quantité d'énergie lumineuse moyenne absorbée par les feuilles de chacune de ses strates. La photosynthèse est calculée dans ce modèle suivant une série d'équations que je vais décrire (Farquhar et al., 1980). La première concerne le trajet du CO₂ entre l'atmosphère et les sites où ont lieu la photosynthèse dans les chloroplastes. Cette diffusion du CO₂ est modélisée suivant l'analogie avec la loi d'ohm (loi de Fick en biologie).

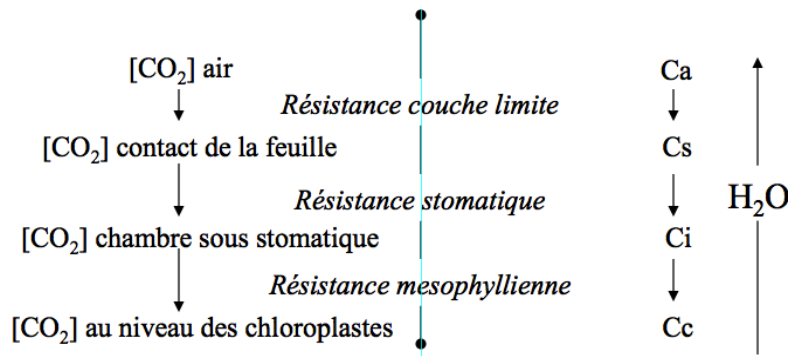


Figure 8: Modélisation du transfert de CO₂ et d'eau dans les feuilles

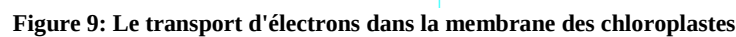
Dans la version originelle du modèle, la résistance mesophyllienne qui est en phase liquide n'est pas prise en compte. Nous obtenons les deux équations suivantes avec A = Assimilation = Photosynthèse et g les conductances.

$$A = g_{s_{CO_2}} \times (C_s - C_i)$$

$$A = g_{b_{CO_2}} \times (C_a - C_s) \Leftrightarrow C_s = C_a - A/g_{b_{CO_2}}$$

Ensuite la photosynthèse est soit limitée par la lumière et l'énergie disponible (e.g le matin ou pour des feuilles d'ombre), soit par la vitesse de l'activité enzymatique de la Rubisco (enzyme catalysant la carboxylation voir plus bas).

La lumière est absorbée au niveau de la membrane des chloroplastes et puis transformée en énergie sous forme d'ATP. La quantité d'énergie produite dépend d'une part de la lumière et d'autre part des capacités de collecte de la lumière au niveau du photosystème II (PSII) et de la vitesse de transport des électrons dans la membrane par les plastoquinones.


$$6 \text{ CO}_2 + 24 \text{ NADPH} + 18 \text{ ATP} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 24 \text{ NADP}^+ + 18 \text{ ADP} + 18 \text{ P}_i$$


121

des mesures de courbes de réponse de la photosynthèse à la lumière d'une part et au CO₂ d'autre part, qui sont saturantes.

La vitesse réelle de transports des électrons est à son tour soit limitée par la quantité de lumière, soit par la quantité de molécules membranaires responsables de la collecte de la lumière et du transport de l'énergie (ici appelé capacité maximale de transport des électrons). D'autre part, la vitesse potentielle de carboxylation dépend de la quantité d'enzymes (définissant une vitesse maximale de carboxylation) et de l'apport effectif en CO₂.

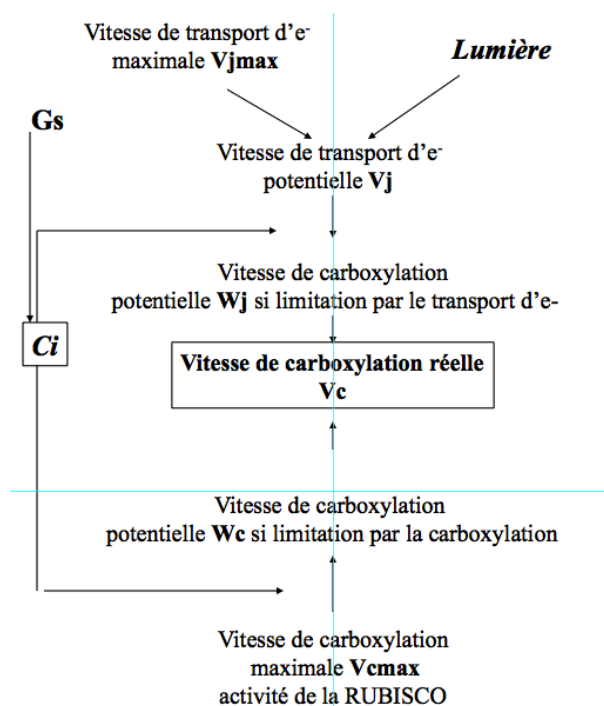


Figure 11: Schéma du modèle de Farquhar

Les équations correspondant à ces réactions sont les suivantes :

$$V_c = \min\{W_j; W_c\}$$

$$W_c = V_{cmax} \frac{C_i - G^*}{C_i + K_c' \frac{a' C_i - G^*}{e} + \frac{O_i}{K_o \theta}} \quad \text{équation de réaction enzymatique}$$

$$W_j = \frac{a' J \theta}{e 4 \theta} \frac{a' C_i - G^*}{e 2 G^* + C_i \theta}$$

$$J = \frac{a' PARa + V_{jmax} - \sqrt{(a' PARa + V_{jmax})^2 - 4q' a' PARa' V_{jmax}}}{2q}$$

Mais à ce stade le modèle ne permet pas de prendre en compte les variations d'ouverture stomatique. En effet, la plante est toujours face au dilemme cornélien de mourir de soif (trop de perte d'eau) ou de mourir de faim (pas assez de CO₂). Or le contrôle des échanges gazeux (eau et CO₂) s'effectue au niveau de pores situés sur la face inférieure des feuilles appelées les stomates. Quand le sol ou l'air est sec, les

plantes ferment leurs stomates et diminuent les pertes d'eau mais aussi la photosynthèse. Il n'existe pas de modèles mécaniste du fonctionnement stomatique qui fasse autant consensus que le modèle de carboxylation de Farquhar. Le modèle de conductance implémenté dans CASTANEA est un modèle totalement empirique qui corrèle la conductance stomatique (présente dans le modèle de diffusion) à la photosynthèse elle-même⁴⁹ (Ball et al., 1987).

$$GS_{H_2O} = G_0 + G_1 \cdot \frac{A' RH}{Cb}$$

Avec RH, l'humidité relative de l'air, et G1 un coefficient qui dépend de l'espèce et du niveau de stress hydrique dans le sol. C'est par ce biais le modèle de photosynthèse des feuilles est couplé au modèle de bilan hydrique du sol. Les effets températures sont ensuite pris en compte sur chacune des composantes (voir la discussion sur l'article de Bernacchi dans le chapitre précédent).

La description de ce modèle de photosynthèse fut longue, mais c'est un modèle central dans toute la biologie et la climatologie (il est utilisé dans les modèles globaux du climat qui couple végétation et atmosphère). Que nous apprennent le modèle CASTANEA dans son ensemble et la sous partie concernant la photosynthèse sur les modèles de simulations et le processus d'abstraction ?

La première leçon est que contrairement aux modèles empiriques et théoriques, le modèle de simulation comprend des abstractions à des échelles spatiales et temporelles très différentes. Au niveau du modèle CASTANEA, la respiration du bois est calculée pour le tronc dans son ensemble, alors que la photosynthèse des feuilles est calculée couche de feuilles par couche de feuille avec une description biochimique très précise, qui va jusqu'à la membrane des chloroplastes. De même, l'abstraction temporelle change selon les processus : demi-heure pour la photosynthèse, quotidien pour l'allocation du carbone, annuel pour la croissance en hauteur des arbres...

La seconde leçon est que l'appareil théorique pris en compte dans le modèle varie fortement selon les processus. Au niveau du sous-modèle de photosynthèse, le modèle de carboxylation relève d'une description très mécaniste, alors que le modèle de conductance stomatique est totalement empirique et il ne tient pas compte des mécanismes physiologiques pourtant connus qui conditionnent l'ouverture des stomates. L'aspect fortement mécaniste ou non de la modélisation dépend de trois choses : (i) la connaissance théorique des mécanismes, (ii) l'existence d'un modèle implémentable (soit le modèle mécaniste n'existe pas, soit il présente des entités qui ne peuvent être estimées ou reliées aux autres composantes du modèle), (iii) la nécessité de la réduction à des mécanistes à des échelles plus fines (e.g la simulation de la photosynthèse en environnement changeant, donc avec plus de CO₂ dans l'atmosphère).

⁴⁹ On remarquera qu'il existe une circularité philosophiquement problématique dans le système à 3 équations obtenu. En effet, la photosynthèse est calculée en fonction de la conductance de façon très mécaniste et la conductance en fonction de la photosynthèse de façon empirique...

Le modèle apparaît comme une machine complexe représentant la réalité mais avec un prisme déformant qui dépend d'une part des connaissances théoriques et d'autre part des questions scientifiques. L'unification nomologique y est très forte, mais elle demeure contingente à l'explication d'un phénomène particulier. Dans le modèle CASTANEA, des lois de la physique (optique, bilan radiatif), de la biochimie, de l'hydraulique (sol et plante) sont couplées entre elles. Mais ce type d'unification est clairement celle décrite par Dietrich & Mitchell (2006), c'est plus une intégration qu'une unification au sens où on l'entend habituellement. En effet, dans ce cas, il n'y a pas réduction d'une des composantes (biochimique par exemple) à une autre (physique). La faisabilité de telles intégrations nécessite l'existence de principes ponts entre les différentes parties théoriques. Par exemple, dans le modèle de photosynthèse, tout ce qui concerne le transfert de la lumière dans le couvert provient de la physique, alors que le cycle de la carboxylation dérive de la biochimie. Ce qui permet de relier ces deux univers théoriques est l'obtention d'énergie chimique (ATP), à partir de l'énergie lumineuse exprimée en photons. A l'échelle du couvert, cette intégration permet de convertir quantitativement l'énergie lumineuse (rayonnement global) en gramme de carbone absorbé par la plante.

Mais le modèle de simulation permet potentiellement d'aller plus loin. En effet, des études de sensibilité sur l'ensemble de l'espace des paramètres permettent d'utiliser le modèle comme outil théorique et de déduire des lois à l'échelle de l'écosystème (e.g ce qui déterminent les variations de flux de carbone et d'eau dans les écosystèmes forestiers). Ce type de travail n'est encore qu'à ses balbutiements, mais l'accroissement des moyens de calculs et les avancées des mathématiques appliquées aux études de sensibilité rendent possible ce nouvel usage des modèles de simulations. Dans ce cas là, nous aurions à faire à une unification par réduction : les lois à l'échelle des écosystèmes étant alors réduites aux lois physiques et biochimiques.

Le modèle présente aussi une capacité d'unification des phénomènes qui ont effectivement lieu dans la forêt étudiée. Mais pour bien comprendre cela il faut analyser la façon dont ces modèles sont paramétrés et validés. Ces modèles nécessitent la mesure d'un très grand nombre de paramètres (plus de 130 dans CASTANEA). Donc souvent si certains sont estimés à partir de la bibliographie, d'autres sont déterminées en inversant le modèle à partir de la comparaison entre simulations et mesures. D'autre part, la validation du modèle se fait souvent par confrontation à un seul type de mesures. De ce fait, rien ne prouve que l'usage d'un modèle complexe, impliquant de larges composantes théoriques améliore la représentation de la réalité.

Pour dépasser ces approches, dans les deux articles de description du modèle CASTANEA, nous avons tenté d'évaluer les 130 paramètres du modèle indépendamment de toute mesure d'évaluation du modèle. D'autre part, nous avons évalué le modèle en le confrontant à une très grande gamme de mesures indépendantes entre elles et à différentes échelles de temps et d'espace (Tableau 13).

Table 13: Evaluation multi critères du modèle CASTANEA

Processus	Echelle spatiale	Echelle temporelle	Disciplines
Flux net de carbone	Couvert	jour/ année/ décennie	Mesures physiques
Flux net d'eau	Couvert		(théorie fluctuations turbulentes : EC)
Flux de sève	Arbre		Physiologie de l'arbre
Bilan énergétique	Couvert	jour année/ décennie	Physique
Photosynthèse	Branche		Ecophysiologie
Bilan hydrique du sol	Sol		Physique du sol
Respiration du sol	Sol	Jour/année	Ecophysiologie
Croissance du bois	Arbre	Année/siècle	Dendrochronologie

Je présente aussi les évaluations graphiques du modèle pour l'eau (Figure 12). Nous avons néanmoins montré au cours de ce travail, qu'il existait des inconsistances, probablement due à des échelles d'intégrations différentes ou à des lacunes centrales dans le modèle (Davi et al., 2005).

« The model reproduced quite well all the measured individual processes, except the root respiration, which was underestimated during summer. However, discrepancies with EC measurements⁵⁰ were observed. Concerning evapotranspiration, error on EC measurements during rainy days could explain the difference between modeled and measured values. On the contrary, regarding CO₂, the reasons for discrepancies between the sum of local measurements and simulations, on one hand and EC measurements, on the other hand, remains to be clarified. » p404

Ces résultats prouvent que des propositions issues du modèle sont d'un certain point de vue falsifiables. Ce type de confrontation entre simulations et observations provenant d'une pluralité de sources relativement indépendantes est de nature à évaluer dans quelle mesure l'unification nomologique correspond bien à une unification réelle des phénomènes. Mais l'approche est ici différente du processus itératif présenté dans la partie précédente. On n'invalide pas vraiment le modèle en bloc. C'est la multiplication des points de rencontre entre modèle et mesures, qui permet d'affiner notre représentation de la réalité et par conséquent de connecter l'unification nomologique (i.e unification de l'arrière-plan théorique) à une unification des phénomènes (i.e mise en relation causale d'une série de phénomènes).

⁵⁰ Mesures physiques par la méthode des turbulences des flux de CO₂ et d'eau.

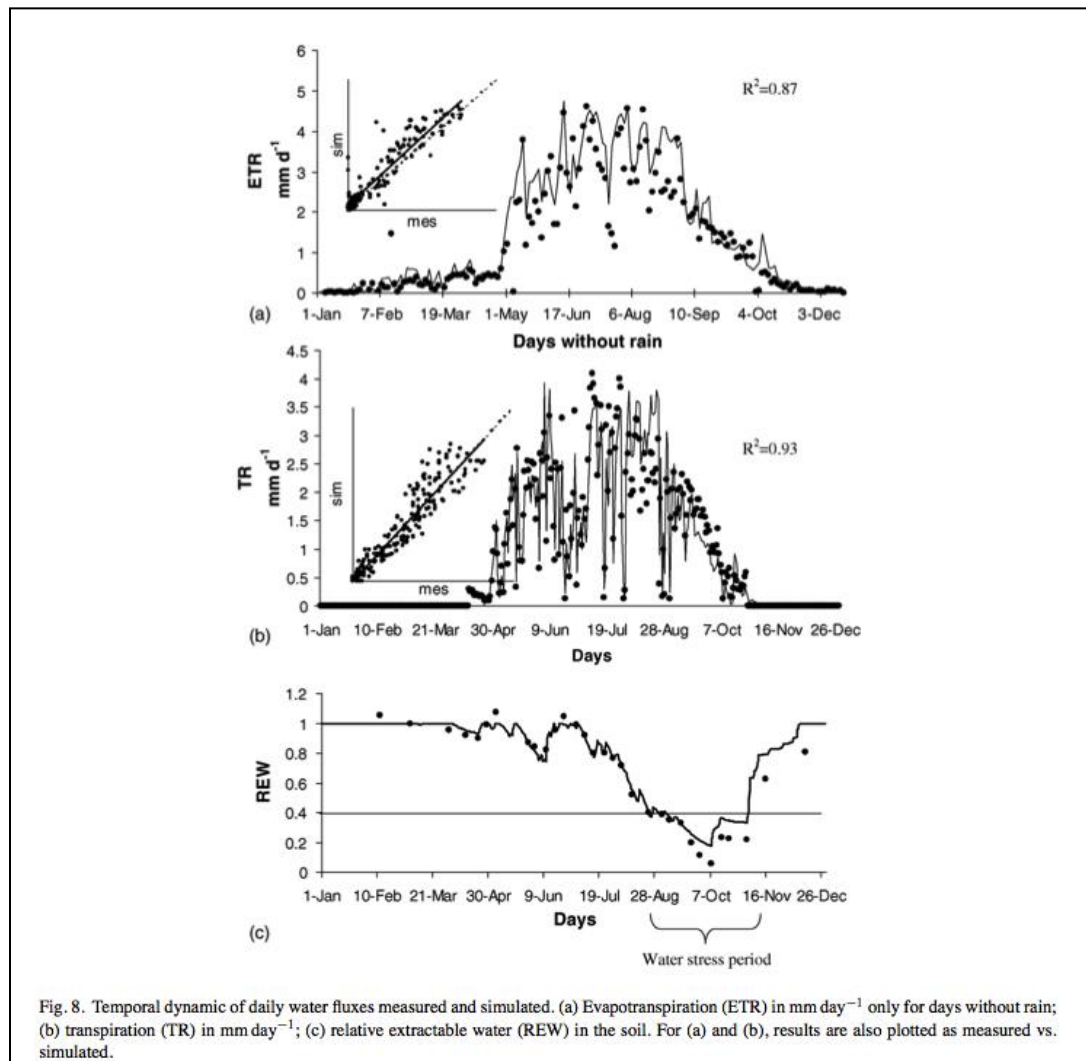


Figure 12: Mesures et simulations des flux d'eau dans le modèle CASTANEA (Davi et al., 2005)

3.4. Faut-il sacrifier un type d'unification?

Nous allons maintenant analyser comment la description de ces trois types de modèles nous renseigne sur (i) le type d'unification réalisée : intégration ou réduction, (ii) le lien entre unification des phénomènes réels d'une part et unification nomologique d'autre part, (iii) l'extension des phénomènes dont l'unification est recherchée. Les trois types de modèle que nous avons décrits sont complémentaires de ce triple point de vue.

Les modèles empiriques sont essentiellement inductifs. La phase d'abstraction la plus importante est donc le moment synthétique. Ils donnent un moyen efficace de connecter certains phénomènes entre eux. Ils collent à l'observation et par conséquent sont relativement précis. Ils unifient donc les phénomènes en reliant certains phénomènes à d'autres (e.g la date de débourrement sur un site est réduite à l'espèce, à l'altitude, au diamètre et à l'année). Mais cette réduction phénoménologique ne correspond pas à une réduction nomologique (i.e mise en relation des arrières plans théoriques) et elle est toujours incomplète car les résidus du modèle statistique sont toujours non nuls. Le lien entre phénomène et lois théoriques existe quand même, mais il est externe et relégué en introduction des articles de manière à justifier

l'abstraction ou en discussion de façon à interpréter les résultats. L'extension de la classe des phénomènes expliquée est en général finalement étroite. Ces modèles sont donc précis, mais peu réalistes et peu génériques.

Les modèles théoriques ont pour objectif une unification nomologique. Ils visent de façon déductive à rendre compte d'une classe très variée de phénomènes (e.g indépendamment de l'espèce et du site). Ces modèles sont relativement génériques, mais ils sont faiblement connectés aux phénomènes. Ils sont donc peu précis et peu réalistes. La comparaison entre prédictions du modèle et observations empiriques est externe, elle se fait généralement en discussion. La force de ces modèles tient à leur généricité et la complétude de l'analyse des comportements du modèle. La partie de modélisation qui est donc prépondérante concerne la partie analytique, qui relève d'un raisonnement purement déductif.

Entre les modèles théoriques et empiriques, les modèles de simulation apparaissent comme un véritable médiateur entre observations et théories. D'une part, ils s'appliquent à une situation donnée et peuvent donc être confrontés aux observations, et d'autre part ils intègrent des portions importantes de la théorie. Par conséquent, ils requièrent de manière équilibrée les parties synthétique et analytique du processus de modélisation. Mais du fait de leur contingence à une situation donnée, ils demeurent souvent peu génériques. Néanmoins, certains de ses modèles ont été appliqués ensuite avec succès à de nombreuses situations (différents sites et différentes espèces). Ils semblent pouvoir acquérir une certaine généricité qui est permise par une séparation entre les processus relationnels implémentés dans les équations et relevant de la biologie ou de la physique fondamentale, qui sont relativement génériques et la paramétrisation qui correspond à l'application du modèle sur un site et une espèce donnée. Ils sont aussi *a priori* moins précis que les modèles empiriques car la complexité qu'ils prennent en compte les rend souvent plus instables. Enfin, ils présentent l'intérêt de permettre une mise en relation entre l'unification des phénomènes et l'unification nomologique des arrières plan théoriques. Nous pouvons dresser le tableau synthétique suivant des caractéristiques des différents types de modèle (Table 14).

Table 14: Synthèse des différents modèles en écologie

	Empirique	Théorique	Simulation
Mode d'unification	Réduction incomplète	Réduction	Intégration Réduction incomplète
Mode d'inférence	Inductif	Hypothético Déductif	Inductif, Hypothético- déductif IME
Catégories de l'entendement	Synthèse	Analyse	Synthèse et analyse
Extension de la classe des types de phénomènes	Faible	Forte	Intermédiaire
Lien théorie-phénomène	Externe	Externe	Interne
Force	Précision	Généricité	Réalisme

Dans un article daté de 1966, Levins établit aussi une typologie des modèles en écologie. Il part du constat que le rapprochement entre écologie et génétique rend nécessaire le couplage de modèles de différents types. Mais selon lui, l'approche modélisatrice qu'il nomme « brute force approach » qui viserait à décrire toute la complexité des interactions entre individus et avec l'environnement conduit selon lui à une impasse : (a) car elle exige trop de paramètres à mesurer ; (b) qu'elle aboutit à des équations insolubles analytiquement ; (c) et que les résultats sont inexploitablement intuitivement. Il est donc nécessaire de simplifier les modèles selon le triangle suivant :

Triangle de R. Levins sur les approches modélisatrices

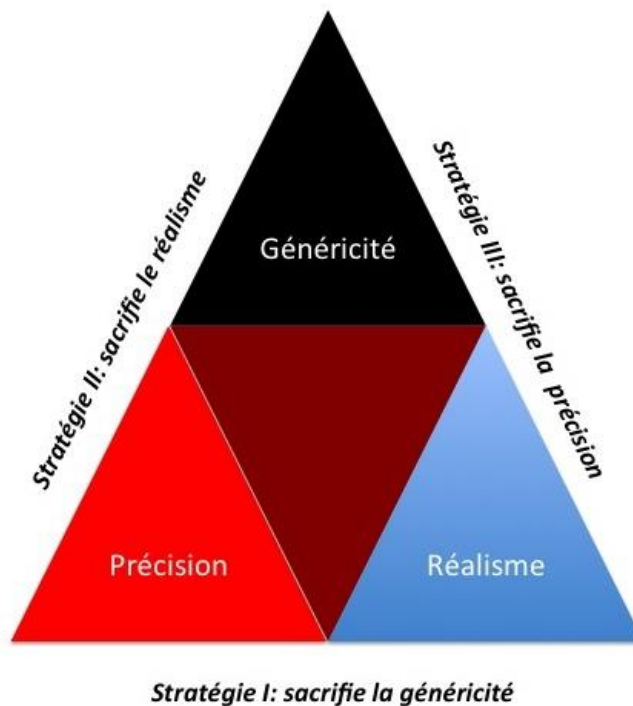


Figure 13: Triangle des approches de modélisations en écologie (Levins 1966)

Les trois stratégies qu'il en déduit ne visent pas un compromis global qu'il semble exclure, mais à faire le « sacrifice » d'une des caractéristiques de la simplification pour mieux sauver les deux autres. Par exemple, on peut sacrifier la généricité, tout en conservant précision et réalisme. Cette première stratégie correspond aux modèles de simulations très spécifiques d'un cas. On peut sacrifier le réalisme tout en sauvant généricité et précision. Enfin, il est possible de sacrifier la précision en conservant réalisme et généricité. Cette grille de lecture permet de nuancer notre typologie et d'introduire la notion de sacrifice. Est-il possible d'unifier à la fois les phénomènes et les lois ou faut-il toujours sacrifier l'un pour avoir l'autre ?

Le triangle de Levins nous permet d'abord de clarifier le type d'unification dont il est question. Ici ce que Levins entend par réalisme⁵¹ du modèle est l'adéquation du modèle à ce que nous connaissons de la théorie, cela relève donc de l'unification nomologique. La précision relève de l'adéquation du modèle aux faits locaux, donc

⁵¹ Rien à voir avec ce dont nous traiterons plus tard qui concerne le réalisme des inobservables

d'une unification de phénomènes relatifs à une situation. Cela revient à faire l'analyse (analyse phénoménologique) d'une situation du réel contiguë spatialement et temporellement et à déterminer comment réduire cette situation à une pluralité de causes intégrées entre elles (e.g décomposition des flux réels dans une forêt spécifique). La généricité est plus compliquée à définir. Elle relève de l'adéquation du modèle à des faits globaux (e.g expliquer la relation entre effectif d'une population et taille des individus à l'échelle de tout le vivant), donc d'une unification de phénomènes relatifs à une pluralité de situations réelles. Cela revient à faire la synthèse d'une pluralité de phénomènes *a priori* indépendant dans le temps et l'espace (synthèse phénoménologique) que l'on subsume sous un même mécanisme (e.g plasticité et adaptation dans la survie des espèces).

Si on suit le triangle de Levins, il est possible d'effectuer l'unification nomologique et la synthèse phénoménologique d'une part, et l'unification nomologique et l'analyse phénoménologique d'autre part. Par contre, on ne peut pas unifier les trois en même temps. Et si ce dilemme est vrai, la tentative d'utiliser des modèles de simulations devenus plus générique pour répondre à des questions habituellement traitées par des modèles théoriques est une impasse. C'est ce que semble bien suggérer d'ailleurs Levins. Pour étudier cela, il nous faut aller plus loin dans la relation entre entités théoriques et phénomènes réels, ce qui pose le débat de réalité des entités théoriques.

4. Le problème de la référence des termes impliqués dans les modèles

Le débat entre réalistes et antiréalistes sur la nature des termes qui sont impliqués dans nos théories est très complexe. Il est hors de propos ici de faire état des différents moments de ce débat. Dans cette partie, je me contenterai d'examiner en quoi une clarification la référence des termes impliqués dans nos modèles permet d'éclairer la question du lien entre unification phénoménologique et unification nomologique. Dans un premier temps, je donnerai quelques définitions permettant de poser la problématique, puis j'analyserai la référence des termes impliqués dans nos modèles avant d'esquisser une synthèse.

4.1. La référence chez Frege, Gödel et Putnam

« Les signes donnent présence à ce qui est absent invisible, et le cas échéant inaccessible au sens (...). Sans les signes nous ne nous élèverions pas à la pensée conceptuelle » Frege (1882), p63

La plupart des modèles peut être traduit en une succession de phrases mathématiques et logiques:

Si <énoncé A est vrai> alors $\langle Y_i = aX_i + b + \varepsilon \rangle$

Le problème de la référence est de savoir de quoi dénotent les différents éléments de cette phrase. La dénotation de $\langle Y_i \rangle$ équivaut à traiter le problème de la dénotation d'un mot (e.g la date de débourrement de l'arbre i). La dénotation de $\langle Y_i = aX_i + b + \varepsilon \rangle$ revient à traiter le problème de la dénotation d'un énoncé c'est à dire l'application d'un prédicat à un objet (e.g la date de débourrement est proportionnelle au diamètre).

La dénotation de $\langle f=(ax+b) \rangle$ correspond au problème de la dénotation du prédicat (e.g être proportionnel au diamètre).

Rappelons que pour chacun des objets du langage, Frege propose à partir des *lois fondamentales de l'arithmétique*, une sémantique à 3 niveaux :

Table 15 : Sémantique à trois niveau de Frege en 1893 (Source G. Crocco)

Langage	Nom propre & DD	Prédicat	Enoncé
Sinn	Mode de donation de l'objet	Sens du prédicat	Pensé : Gedanke
Bedeutung	Objet	Concept	Valeur de vérité

Il faut donc distinguer selon Frege, le sens (Sinn) d'un élément du langage de sa signification (Bedeutung). Le sens est la définition scientifique des termes, la signification ou dénotation est l'objet réel qui est pointé dans le discours. Quand les scientifiques d'aujourd'hui utilisent un concept, ils sont en général d'accord sur le sens du mot qui est donné par sa définition. Le problème réside non pas dans le sens du concept, mais dans ce sur quoi il dénote (Frege, 1892) :

« Le sens d'un nom propre est donné à quiconque connaît suffisamment la langue ou l'ensemble des désignations dont il fait partie ; mais la dénotation d'un signe à supposer qu'elle existe, n'est jamais donné en pleine lumière » p104.

Une partie des problèmes de dénotation des entités théoriques équivaut au problème largement débattu de la dénotation des entités du langage. Mais pour l'instant la dénotation de trois composantes ne semble pas directement correspondre aux trois cas présentés dans le tableau de Frege. Quelles sont les dénotations d'une instruction logique $\langle \text{Si alors} \rangle$, d'une variable aléatoire X (qui diffère de son instanciation pour un arbre donné Xi) et des paramètres a et b ? Je reviendrais là-dessus ultérieurement.

Commençons par le cas en apparence le plus simple : le nom propre, Yi ou Xi. Pour Frege, le nom propre a pour sens le mode de donation de l'objet et pour Bedeutung l'objet lui-même. Pour Frege, la dénotation du prédicat, pour nous de la fonction qui correspond au modèle linéaire, est le concept lui-même. Mais pour Frege la dénotation des concepts pose problème car les fonctions propositionnelles sont insaturées (Frege 1891):

« Mon propos est de montrer que l'argument n'appartient pas à la fonction, mais que fonction et argument pris ensemble constituent un tout complet. De la fonction prise séparément on dira qu'elle est incomplète, ayant besoin d'une autre chose, ou encore insaturée. C'est par là que les fonctions se distinguent radicalement des nombres ». p84

Par conséquent, il n'existe pas pour Frege d'objet réel dénoté par l'équation $\langle f(x) \rangle$. Mais comme toute fonction met en relation des entités diverses, je pense qu'on peut intuitivement dire que la dénotation de la fonction est l'existence de relations dans le monde entre entités. Et ces relations, je le montrerai, sont potentiellement réelles.

Enfin pour Frege, la dénotation de l'énoncé (pour nous $\langle Y_i = aX_i + b \rangle$) est la valeur de vérité de cet énoncé. Russell qui s'est lui toujours opposé à une sémantique à trois niveaux propose une solution alternative : la dénotation des énoncés vrais sont les faits. Dans ce cas-là, la dénotation des énoncés vrais correspond bien à une réalité dans le monde. Par contre les énoncés faux ne correspondent à rien. Pour Gödel, l'énoncé est l'application de la fonction propositionnelle $f \langle f(x) = ax + b \rangle$ à l'objet individuel (X_i). Il nomme la fonction d'application « ε ». Pour ce dernier, il semble que la dénotation de la fonction propositionnelle soit les faits possibles.

Dans les trois cas, nous avons cherché comme Frege ou Gödel à établir quand les entités théoriques pouvaient dénoter sur quelque chose de réel. Trois types de réalité ont été cités : les objets, les faits et les relations. Frege défend une position finalement réaliste. Chez lui, le langage a pris la place du sujet transcendantal kantien. Pour Frege, bien que les langues soient nombreuses, il y a un noyau commun invariant qui permet d'asseoir des moyens communs d'indiquer les objets du monde. L'idée est que quelque chose de la structure du monde s'est sédimenté dans le langage. Cette vision réaliste est aussi défendue par Gödel (1944), qui dans son article sur Russell accuse ce dernier d'avoir abandonné le réalisme au profit d'un nominalisme.

Mais cette posture réaliste aboutit à des paradoxes logiques. Un d'entre eux est explicité par Gödel qui montre que le système de Frege aboutit à une philosophie éléatique du vrai, dans laquelle tout énoncé vrai équivaut à tout autre énoncé vrai (cf encadré).

encadré: l'argument du lance pierre analysé par Gödel

Analyse du texte de Gödel sur la logique mathématique de Russell par G. Crocco (2012)

Il y a 5 propositions qui s'enchaînent :

P1 : « les Descriptions définies signifient ou dénotent les objets qu'elles décrivent »

P2 : « Thèse de compositionnalité pour la dénotation »

Par exemple, étoile du soir dénote vénus, l'étoile du matin dénote Vénus. Par conséquent les deux propositions suivantes ont le même sens :

« L'étoile du soir est un corps céleste éclairé par le soleil »

« L'étoile du matin est un corps céleste éclairé par le soleil »

P3 : « $\varphi(a)$ » et « a est l'objet qui a la propriété φ et est identique à a » sont équivalents

« Scott est l'auteur de Waverley » = « x est l'objet qui a la propriété d'être l'auteur de Waverley et est identique à Scott ».

P4 : « Toute proposition qui parle de quelque chose peut être mise sous la forme $\varphi(a)$. »

Par exemple si on prend la proposition « Paris aime Helena » on peut construire trois fonctions propositionnelles : aime, Paris aime x, y aime Hélène. Tout énoncé

relationnel peut être interprété comme un énoncé portant sur un seul des arguments, l'autre étant intégré dans le prédicat.

P5 : « Pour deux objets quelconques, je peux trouver une proposition vraie qui parle d'eux ».

En utilisant P1 à P5, on conclut que tout énoncé vrai quelconque aboutit à n'importe quel énoncé vrai.

Démonstration :

F(a) vrai par hypothèse

Par P3 $a = \eta x \exists (x=a \wedge F(x))$

$a = \eta x \exists (x=a \wedge x \neq b)$ par P2 et P5. Cette proposition et la précédente ont la même dénotation : {a}

Soit $\Phi(a) = a \neq b$ par P3 dans l'autre sens avec Φ « $x \neq b$ »

$b = \eta x \exists (x=b \wedge b \neq a)$ par P3 et P4

$b = \eta x \exists (x=b \wedge g(x))$ si g est un concept vrai de b par P5

$g(b)$ par P3

Plus tard on assimile cet argument au slingshot (lance pierre) chez Quine puis Davidson. Mais leurs arguments concernant la nature du collapse (l'effondrement) sont différents de ceux envisagés par Gödel. En fait, Gödel par souci de réalisme voudrait bien conserver P1 contrairement à Russell. Pour Gödel, le collapse provient du privilège accordé par Frege à l'extensionnalité.

Une analyse similaire mais concernant les énoncés est donnée par Putnam dans Raison vérité et Histoire p45

Russell puis d'une autre manière Quine et Putnam vont utiliser ce paradoxe pour montrer que le réalisme strict des inobservables est indéfendable. Selon Putnam (1981), il n'existe pas de « rayons noétique » qui relient parfaitement nos entités théoriques avec la réalité. Mais comme il a bien conscience d'une certaine stabilité de la référence malgré les évolutions des connaissances (il prend l'exemple de l'eau), il développe une théorie de la référence à plusieurs niveaux qui sauve la possibilité d'une continuité de la référence. Sa théorie de la référence est en effet stratifiée selon quatre niveaux. Prenons l'exemple du gène. Un objet est dénoté d'abord par le mot qui est un marqueur syntaxique (le gène dans une phrase d'un article), celui-ci réfère à un marqueur sémantique (le gène en tant que définition acceptée par l'ensemble des scientifiques qui lisent l'article), qui lui-même est relié à un stéréotype (le gène en tant que concept au cours de l'histoire de la génétique). Le stéréotype correspond à une description du type d'objet ou à une collection d'exemples standard. Un mot reçoit sa signification à partir de la place qu'elle occupe dans un réseau de propositions. Mais quand on change de description sémantique, on ne change pas forcément de stéréotype. De ce fait, pour Putnam la classe des gènes est restée potentiellement la même au cours de l'histoire de la génétique et malgré les évolutions concernant la notion de gène.

Mais Gödel n'est pas en accord avec le point de vue antiréaliste, il conclut son papier concernant Russell, sur le fait que les solutions de Russell, même si elles ont pu constituer des avancées, ne sont pas satisfaisantes (Gödel 1944):

§42 « *Cela semble indiquer qu'il vaut mieux prendre un autre partie plus conservateur, celui par exemple de clarifier le sens des termes classe et de concept et d'édifier une théorie consistante considérés comme des entités objectivement existante* »

Pour lui, les paradoxes logiques issus d'une théorie réaliste de la référence proviennent d'une mauvaise compréhension de la différence entre la définition d'une fonction propositionnelle en tant que classe (définition extensionnelle par les objets qui la caractérisent) et en tant que concept (définition intensionnel par la propriété qu'elle définit). Gödel écrit en effet (Wang 1997) :

8.6.14 : « *Il n'est pas évident que chaque ensemble est l'extension d'un concept. Mais une telle conclusion peut être prouvée une fois que nous aurons développé une théorie des concepts et une théorie des ensembles plus complète. Alors que c'est une hypothèse incorrecte de prendre comme propriété du concept de concept, le fait de dire que tout concept définit un ensemble. Il n'y a pas d'erreurs à dire que les ensembles ne peuvent seulement être définis par des concepts ou qu'un ensemble est une certaine façon de parler d'un concept* »

Notons que ce débat sur la référence a des conséquences sur notre conception de la vérité comme l'explique Putnam (1981). Dans le cas de son réalisme interne, il faut abandonner tout théorie de la vérité correspondance (i.e entre les faits et les théories) au profit d'une théorie de la vérité cohérence.

4.2. La question de la référence dans différents types de modèle en écologie

Rappelons qu'il existe deux questions : la première est de savoir si les entités théoriques sont susceptibles de dénoter sur des entités réels (les fameux rayons noétiques inexistant selon Putnam), la seconde est de déterminer quels types d'entités réelles sont visées dans chacun des cas : des objets, des faits ou des relations ?

Reprenons d'abord, le cas du modèle empirique :

$$SNP = a \times altitude + b \times espece + c \times année + d \times diamètre$$

$$SNPi = a \times altitude_i + b \times espece_i + c \times année_i + d \times diamètre_i + \epsilon_i$$

Dans la phase de calibration du modèle, nous avons affaire à des instanciations pour chacun des arbres mesurés (SNP_i , $altitude_i$, $espece_i$, $année_i$, $diamètre_i$). Toutes ces instanciations présentent des valeurs numériques. La référence la plus simple concerne le diamètre qui correspond à une mesure sur l'arbre. La référence de $diamètre_i$ est alors une qualité physique d'un objet. Evidemment sa mesure (le choix de l'unité, la hauteur de mesures) est éminemment contingentée par l'intention de l'observateur. Néanmoins, la taille de l'arbre est une qualité de celui-ci qui semble être indépendante de nous. J'en veux pour preuve qu'elle détermine le comportement des parasites de l'arbre. L'espèce est aussi une qualité de l'arbre mais d'ordre

phylogénique. Le fait que cette qualité soit réelle ou non indépendamment de nous ne peut pas être discuté non plus, car l'appartenance à cette espèce a des conséquences sur le flux de gènes : les patrimoines génétiques d'un hêtre et d'un sapin qui lui est voisin ne peuvent plus être mélangés. L'altitude de l'arbre i est aussi une donnée réelle assez facile à percevoir. L'année de la mesure pose plus de problème, mais celle-ci peut être remplacée efficacement par la température moyenne de l'année qui semble aussi bien réel. Concernant SNP_i , cela représente la précocité du débourrement, même si cette notion est temporelle, elle me semble bien dénoté d'une réalité.

Evidemment une personne doutant que tout élément du langage dénote sur quelque chose de réel, ne sera pas d'accord. Mais transformons tout cela en probabilité, disons que le fait que tel arbre soit plus ou moins gros a une bonne chance d'être une réalité indépendante de nous. Mais nous voyons bien que toutes ces instanciations de variables pour un arbre donné, ne dénotent pas des objets réels. SNP_i dénotent plutôt une succession de faits et les autres des qualités soit de l'environnement, soit de l'arbre. Qualités qui néanmoins peuvent être probablement réduites à des faits ou des objets réels : espèce à une collection de gènes et d'allèles et le rôle de l'altitude à des processus et entités de la physique. Ce type de réduction à des observables est celle envisagées par Carnap (1928) dans *La construction logique du monde*.

Par contre, la dénotation des variables aléatoires (e.g SNP , diamètre) pose à ce stade plus de problèmes. Si l'on choisit une définition extensionnelle, la classe des « diamètres » correspond à toutes les mesures de diamètres d'arbre réalisé par des forestiers. Ici on a une sous classe qui correspond à l'intersection de la classe des arbres échantillonnés et de la classe des diamètres. Euclide donne la définition intensionnelle suivante du diamètre (Def 17) : « *Diamètre du cercle est une ligne droite menée par le centre du cercle et finissant de part et d'autre sur le cercle* ». Sachant, qu'aucun tronc n'est parfaitement circulaire, la définition du diamètre des arbres est plutôt approximative. Ces variables aléatoires sont donc des concepts au sens habituel où on l'entend. On a quand même envie de dire qu'elles correspondent à un découpage du monde qui semble naturelle (i.e classer tous les troncs des arbres selon leur diamètre). Elles semblent dénoter sur quelque chose de réel dans le monde mais spatialement et temporellement non localisé. De plus ces variables semblent prendre sens dans la nature relationnelle qui est exprimée par l'équation.

L'équation elle présente deux formes. La forme sur les variables instanciées SNP_i , diamètre $_i$ dénote une relation vraie (sens du signe égal). Mais sous cette forme est alors présent les résidus (ϵ_i) qui correspond à l'écart entre SNP_i et ce qu'il y a à gauche de l'équation. Ces résidus représentent potentiellement les absents, c'est à dire toutes les autres entités et faits qui manquent pour expliquer le fait SNP_i (I.e « précocité de la date de débourrement »). La forme de l'équation quand on l'applique aux variables aléatoires, établit une relation entre des concepts et plus entre des entités ; elle n'est ni vraie, ni fausse. Elle correspond il me semble à des faits possibles.

Restent pour ce premier exemple le cas des constantes a , b , c , d . Dans la régression linéaire ces constantes ne sont pas calculées pour chacun des arbres puis moyennées, elles sont déterminées avec l'ensemble du nuage de points. Elles correspondent à un

rapport moyen entre la classe des diamètres observés et la classe des dates de débourrement. Elles correspondent à une relation entre classe d'entités réelles.

Pour résumer, les paramètres et variables des modèles empiriques réfèrent potentiellement à :

- des objets réels
- des qualités d'objets réels
- des faits
- des classes d'extension finie d'objets
- des concepts et/ou classes d'extension indéfinie d'objets
- des relations entre entités de première catégorie (faits, qualité, objet)
- des relations entre entités de seconde catégorie (classe finie)
- des relations entre entités de troisième catégorie (concept)

J'ai à dessein classé les entités en trois catégories dont la réalité physique semble décroissante. Faisons la même analyse avec le modèle théorique proie-prédateur. Rappelons d'abord les équations.

$$\frac{dX}{dt} = r \times X - g \times X \times Y \quad (i)$$

$$\frac{dY}{dt} = e' - g' \times X' \times Y' - m' \times Y' \quad (ii)$$

L'analyse est plus rapide, X et Y sont des entités directement abstraites. Elles correspondent à des concepts. Les deux équations correspondent à une relation entre entités conceptuelles. Les paramètres r,g,m,e sont finalement des concepts dont le sens peut être obtenus à partir des autres entités et de la relation. Contrairement au modèle empirique, le modèle théorique ne dénote à aucun moment sur des faits ou des entités réelles. De plus, ici paramètres et variables aléatoires ont la même nature ontologique.

Par contre, quand ce modèle est appliqué à une situation concrète avec des données de validation (e.g l'expérience de Gause sur les paramécies), on retombe dans la typologie précédente du modèle empirique. Cette situation n'est pas très éloignée de celle des modèles de simulation. Prenons l'exemple de la photosynthèse et spécifiquement l'équation simulant la vitesse potentielle du transport des électrons :

$$V_j = \frac{a' \text{ PARa} + V_{j \max} - \sqrt{(a' \text{ PARa} + V_{j \max})^2 - 4q' a' \text{ PARa} V_{j \max}}}{2q}$$

Rappelons que V_j est une vitesse potentielle pas réelle, elle n'a de sens que dans une logique de co-limitation. V_j dénote donc très clairement la qualité (i.e une vitesse) d'un fait (i.e le transport des électrons dans la membrane du chloroplaste) potentiel (i.e on représente ici un chloroplaste moyen qui n'existe pas). PARa correspond à la lumière absorbée, c'est une quantité de lumière bien réelle mais l'absorption est moyenne. Si la lumière est conçue du point de vue particulière, cela correspond à la moyenne d'objets réels (i.e les photons), si on prend le point de vue ondulatoire, cela

correspond à la moyenne de faits (i.e vibrations). α est le rendement quantique, c'est à dire la quantité d'énergie chimique (i.e électrons qui seront transformés en ATP) produite par unité d'énergie lumineuse. A priori cela dénote un fait réel. θ est un paramètre dit de co-limitation, sa nature n'est pas claire. Il dénote probablement une série de faits dont les mécanismes ne sont pas explicités. Enfin, VJ_{max} correspond à un fait potentiel qui n'existe pas, c'est la vitesse maximale du transport des électrons dans la membrane des chloroplastes. Elle est déterminée dans nos modèles à la quantité de protéines membranes elle-même corrélée à la teneur en azote foliaire. Mais ce modèle est paramétré en général sur des mesures foliaires d'échanges gazeux (indépendamment de son usage à l'échelle du couvert). Lors de la paramétrisation, tous les faits potentiels sont réduits à des faits réels. Mais comme la description de la réalité par le modèle demeure moyenne et déformée, on peut juste conclure que le fait potentiel (i.e VJ_{max}) est l'image d'un fait réel (i.e le transport des électrons quand CO_2 et lumière sont saturants) obtenu expérimentalement. Le modèle est informatif si l'image reproduit les rapports de causalités présents dans la réalité. Enfin, l'équation dans son ensemble, dénote sur une relation entre faits potentiels. Mais la nature de cette relation semble différer de celle obtenue dans le cas du modèle empirique. La relation établit ici des connexions de nature causale, alors que la première établissait des relations de nature statistique. Il semble nécessaire d'affiner notre typologie des relations qui dépend donc de la nature des entités mise en relations (cf les trois niveaux de réalité des objets) mais aussi de la nature même de la relation (i.e à vocation causale ou statistiques).

De cette analyse, nous pouvons tirer une série de conclusions. Nous retrouvons des modèles empiriques, dont les termes dénotent plus souvent des entités réelles, des modèles théoriques dénotant presque que des entités conceptuelles et des modèles de simulations apparaissant comme des médiateurs entre entités conceptuelles et réelles. Mais il ne semble pas y avoir d'incapacité à lier les différents niveaux (e.g les modèles théoriques peuvent être appliqués à une situation concrète et les modèles empiriques réfèrent aussi à des entités conceptuelles). Nous avons élaboré une typologie des différents types d'entités dénotées par les entités théoriques. Il semble que les modèles combinent sans se poser de questions des entités de nature très différentes. Quelles conséquences cela peut avoir ? Enfin il semble qu'un moyen de relier unification nomologique et unification des phénomènes passe par l'utilisation de la notion d'image ou fonction de transfert entre entités conceptuelles et entités réelles.

4.3. Implications sur l'unification nomologique et phénoménologique

Nous avons soulevé deux points centraux : (i) la nature des entités purement conceptuelles semblent poser plus de problèmes que les autres entités, (ii) la seule façon de connecter entités réelles et conceptuelles semble l'usage d'une image ou fonction de transferts entre les deux qui conserveraient des propriétés relationnelles. La nature de cette image est l'objet d'une controverse entre Morrison et Friedman dans l'article intitulé *Reduction and realism* (Morrison 1988). Dans cet article, Morrison explique et critique le modèle de réduction de Friedman. Pour unifier les processus et donner une interprétation réaliste du monde, il est nécessaire de mettre à jour les structures théoriques. Pour Friedman, cela passe par une réduction du monde des phénomènes à un monde théorique du comportement des éléments de l'ensemble des phénomènes. Le monde théorique (relations et entités théoriques) est l'image d'un monde phénoménal (relations et entités réelles).

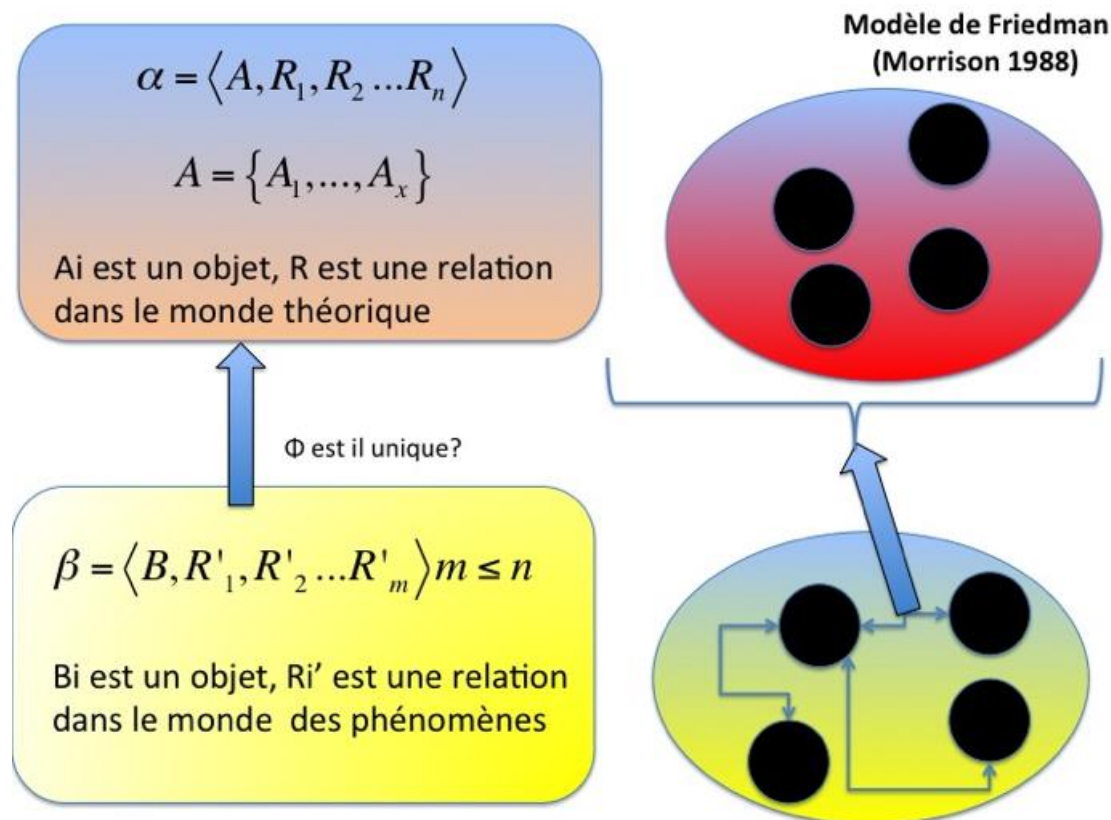


Figure 14: Schématisation du modèle de réduction de Friedman (Morrison 1988)

Mais Friedman va plus loin. Il propose une approche doublement réductionniste. Il ne se contente pas d'une réduction des faits aux théories. Il s'oppose à une approche représentationnelle dans laquelle les lois élaborées sont directement établies à l'échelle des phénomènes et seulement à partir d'eux. Il propose une structuration en modèle - sous modèle. Selon lui cette approche est plus puissante qu'une modélisation à l'échelle des phénomènes. Le fait d'en appeler à des théories valables à une échelle inférieure et d'embarquer les phénomènes dans cette approche réductionnisme renforce la cohérence globale de la théorie. L'autre point important est qu'il suppose une fonction de transition unique (identity map) entre le monde des phénomènes et le monde des relations théoriques de l'échelle inférieure.

Or Morrison critique de façon radicale ce réductionnisme en prenant l'exemple du comportement des gaz. Elle montre que certains comportements d'un système à une échelle donnée (gaz) ne peuvent pas se comprendre par la dynamique de ses seuls éléments. Ainsi certaines propriétés importantes du système théorique ne correspondent à rien de « réel » alors qu'elles sont indispensables à la théorie. Morrison défend qu'il n'est pas nécessaire que chaque élément de la théorie ait une « image » (counterpart) dans la réalité (monde des phénomènes). Il existe des structures théoriques purement mathématiques provenant de notre monde représentationnel et des structures théoriques existantes dans le monde. En fonction du domaine d'application il existe donc potentiellement une multiplicité de modèles.

Revenons à notre problème d'unification phénoménologiques et nomologiques, que pouvons-nous conclure ? Cette unification semble possible dans certains cas quand les entités théoriques dénotent directement des entités réelles. Par contre, quand elles

dénotent des entités purement conceptuelles auxquelles ne correspond pas une classe finie de faits, le lien devient plus problématique. Dans ce dernier cas, la seule solution correspond à imaginer une fonction de transition entre les faits, relations et les entités conceptuelles qui leurs sont associées. Néanmoins, mes exemples semblent donner raison à Morison, il n'y a pas de raison que cette fonction soit d'une part unique et qu'elle implique d'autre part automatiquement un réductionnisme vertical.

L'intentionnalité propre à la démarche de modélisation semble ressurgir clairement dans l'essence même des entités purement conceptuelles. D'autre part, nous avons fait émerger une typologie des entités théoriques qui soulèvent des questions, notamment avec la distinction entre faits réels et faits potentiels ou relations statistiques et relations causales. A ce stade, je ne peux conclure quant à la possibilité ou non de d'expliquer la logique du sacrifice de Levins et par conséquent de voir si elle peut être dépassé. Dans une dernière partie, je vais tenter par un retour à des hypothèses métaphysiques si certaines de ces questions peuvent trouver des réponses.

5. L'espace logique comme lieu d'unification

« En ce sens les concepts ne sont rien. Ils sont ceux qu'il reste même si le monde entier disparaît et on ne peut absolument pas les éliminer » Gödel Max Phil, p20

Je vais tenter de décrire la texture probable des mondes tels que les sciences écologiques me permettent de l'intuiter. Ensuite, comme Kant ou Frege, je vais essayer d'inférer quelle structure doit avoir le monde logique pour expliquer le fait qu'il rende effectivement compte du monde réel. Une fois cartographiée la structure logique de nos représentations théoriques, j'essayerais de voir en quoi cela permet et limite l'unification des phénomènes et l'unification nomologique.

5.1 Texture probable du monde

La texture du monde n'est pour moi pas donné a priori. L'image que je vais en donner est donc issue des connaissances scientifiques actuelles. Cette image peut servir de méta-paradigme, mais suivant la logique de Friedman (2002, voir aussi Préambule p9) elle en permanence révisable quand les connaissances scientifiques évoluent. Pour décrire une texture probable du monde, je rejoins le point de départ de Wittgenstein qui commence le tractatus logico-philosophicus (1922) ainsi:

« 1. Le monde est tout ce qui a lieu

1.1 Le monde est la totalité des faits, non des choses » p33

Il me semble indubitable qu'il est plus difficile de partir des entités ou choses que des faits. En effet, ce que nous dit l'écologie, mais aussi la physique et la biologie est que tout objet est d'une part réductible à des composantes plus fondamentales, d'autre part tout objet est en interaction avec le reste du monde. Chaque portion du monde est un système ouvert qui est relié à tout instant à la totalité du monde. Toutes les délimitations dites naturelles peuvent être dissoutes. L'être humain peut être réduit à n'être que l'avatar de ces propres gènes, conçu par eux pour se multiplier (Dawkins 1989). Même la délimitation entre le soi et le non soi est ténue. Le corps humain comprend plus de bactéries allogènes, que de cellules. Le chêne ne peut vivre sans les mycorhizes qui lui sont associés et son fonctionnement dépend de la lumière et du

CO₂. Partons donc de quelque chose qui me semble *a priori* plus facile à déterminer : le fait.

Le fait est un état d'une portion du monde. La seule allégorie que je puisse donner est celle d'une photographie, reproduisant l'instantané d'un espace. Mais le fait est pris dans l'écoulement du temps, ce faisant il devient processus. La science étudie les successions de faits dans le temps et dans l'espace. Mais la succession des faits ne procède pas que du hasard, certains succèdent mécaniquement à d'autres, dessinant des causes.

Pour l'instant nous avons dessiné un monde « liquide » de faits contiguës dans le temps et l'espace. Mais le monde réel n'est pas liquide, il est visqueux comme la lave. La preuve que l'écologie nous en donne est que malgré son unité, le monde présente une diversité infinie de formes. Il présente des amas de faits dans le temps et dans l'espace, qui établissent des relations préférentielles entre eux et structurent ainsi le monde. Ces amas, on pourrait les appeler nomades, elles correspondent à ce qu'intuitivement on nomme des objets réels. Ces objets présentent une certaine continuité, ils établissent des liens avec tout l'univers, mais certains de ces liens sont plus importants que d'autres et surtout, ces liens présentent une certaine pérennité⁵². Malgré cette pérennité, l'unité de ces monades n'existe que pour un temps infiniment petit, dès qu'on les plonge dans l'écoulement du temps, le réseau d'interactions a changé, et la monade n'est déjà plus identique à elle-même. Les propriétés essentielles de la monade sont celles qui correspondent aux relations les plus pérennes, alors que les propriétés accidentelles sont celles qui changent vite.

La texture dessinée est donc celle de la lave. Toute particule est connectée aux autres mais en même temps la lave de par sa viscosité dessine des structures pérennes que nous appelons objets réels et que j'ai nommé suivant Leibnitz des monades. Mais le terme est à prendre de façon allégorique car pour Leibnitz la monade est une substance simple sans partie :

« La monade dont nous parlerons ici n'est autre chose, qu'une substance simple qui entre dans les composés ; simple c'est à dire sans parti » p141

Mais on retrouve dans ma description, l'idée fondamentale de Leibnitz de penser l'individuation des substances et en même temps leurs profondes connectivités :

« Or cette liaison ou cet accommodement de toutes les choses créées à chacun et de chacune à toutes les autres, fait que chaque substance simple a des rapports qui expriment toutes les autres, et qu'elle est par conséquent un miroir vivant perpétuel de l'univers » p173

De plus, Il me semble que Leibnitz déduit la structure du monde à partir de la notion de monade, alors que j'aboutis à celle-ci à partir d'une vision scientifique du monde. Mais malgré ces différences, je continuerais à utiliser le concept de monade car dans l'histoire de la philosophie c'est ce qui se rapproche le plus de ce que je veux décrire.

⁵² Une analogie efficace serait celle du réseau de neurones

Le monde est donc fait de trois constituants : les monades réels (les choses), les faits et les relations, un fait étant la mise en relation entre deux monades. Cela rejoint l'ontologie proposée par Gödel dans les Max Phil :

« La vérité (ou les vérités), sont une partie de la réalité, la réalité étant constitué de deux parties, à savoir les choses et les faits (ces derniers étant les liaisons entre les choses) » p20

La relation entre les monades dans un fait, est ce qu'il donne leur être. Les monades n'ont pas d'existence en tant qu'entités indépendamment de leur actualisation dans des faits. Le lien entre le fait et ses constituants n'est pas assimilable à un lien entre un tout et ses constituants comme le dit justement Gödel dans les Max phil :

« Un fait ne contient pas alors ses constituants comme parties, mais il est le lien qui tient ensemble ces constituants » P40

Une question philosophique et scientifique soulevée par cette allégorie est de se demander ce qui donne au monde d'un côté sa contiguïté spatiale et temporelle et de l'autre sa viscosité qui permet l'émergence d'entités individuelles. En tant qu'écologiste, cette allégorie me semble rendre compte des concepts fondamentaux de ma discipline que sont l'individu et la population (deux monades à des échelles différentes) d'une part et l'écosystème et la biosphère d'autre part qui rendent compte de la contiguïté du monde.

La texture du monde dessinée ici diffère de celle proposée par Cartwright, celle d'un monde en mosaïque dans lequel, seules des portions du monde peuvent faire l'objet de relations nomologiques. Néanmoins, le passage de l'un à l'autre est facile. Dans les zones très visqueuses où les relations entre monades sont structurées par des interactions à effets majeurs, des lois nomologiques en sont facilement déduites. Dans les zones plus liquides où les relations entre les monades sont le fait de multiples interactions à effets mineurs, il est difficile de trouver ce que nous appelons des lois. Mais l'avantage de la description sous forme de lave par rapport au « dappled world » est qu'il permet d'assurer la contiguïté nomologique du monde.

5.2 Nature de l'espace logique idéale

Maintenant que j'ai fait une description, certes critiquable, de la texture du monde, je vais tenter de décrire la structure logique de nos représentations idéelles pour voir en quoi elles permettent de mettre à jour les structures réelles, mais aussi pourquoi elles sont foncièrement limitées.

D'abord, il me semble qu'il faille mettre de côté l'idée que l'espace idéal est une simple image homothétique du monde réelle. Je rejoins en cela l'idée de Morrison, mais l'échec du programme réductionniste de Carnap me semble en donner une autre preuve. Rappelons que pour Carnap, les conditions de vérités d'une proposition théorique sont en réalité formulables dans le langage observationnel. L'engagement ontologique est donc inutile, il suffit de traduire toutes les assertions théoriques (^tassertions) en assertions observationnels (^oassertions), c'est le cœur du projet carnapien dans « *la structure logique du monde* » (1928). Il tente d'élaborer une

méthode pour définir tout terme théorique à partir de termes observationnels. La définition explicite du projet prend cette forme

$\forall x (Qx \Rightarrow (Sx \Rightarrow Ox))$ avec Q terme théorique, O terme observationnel, S test.

Par exemple, la température, x a une température donnée, il existe un test S qui ici est l'utilisation du thermomètre qui fait correspondre le terme théorique température à un terme observationnel. Le conditionnel $S \rightarrow O$ est appelé un indicateur scientifique. Pour Carnap, en 1928, il existe en principe un indicateur de ce type pour toute proposition scientifique théorique. Mais le projet de Carnap échoue du fait de l'existence des termes dispositionnels comme « être soluble= est dit d'un corps qui se dissout quand il est mis dans l'eau ». C'est la critique qu'en fera Nelson Goodman dans son article de 1947 « *the problem of counterfactual conditionnal* ».

Cet échec nous indique une caractéristique essentielle de l'espace logique, c'est sa dimension intentionnelle. En effet, un terme dispositionnel présuppose l'existence d'un agent intentionnel qui par exemple met le corps dans l'eau pour en évaluer sa solubilité. D'autres facettes du caractère intentionnel de la recherche en général (cf préambule) ou de l'activité de modélisation ont été décrites au cours de ce travail.

Le second point qui caractérise selon moi l'espace logique idéal est l'existence de faits possibles et nécessaires, la raison comme l'a montré Kant présentant cette disposition de produire du nécessaire.

Pour expliquer comment j'imagine le fonctionnement de cet espace logique, je vais partir d'un tableau que Gödel donne dans les Max Phil (Crocco, com pers) et de l'interprétation que l'on peut en donner.

Table 16: Le découpage du monde selon Gödel (source Crocco)

Espace logique	Réel	Champs	philosophe
Description (concept/symbole)	Choses	Langue	Russell
Phénomènes (ercheinung)	Chose en soi/ Dinge an sich	Théorie de la connaissance	Kant
Sinn	Bedeutung	Sémantique	Frege
Possibilité	Réalité	Métaphysique	Leibnitz
Multiple	Un		Platon ou Leibnitz ?
Lumière	Ce qui est éclairé	Physique ?	Platon ?
Ce que dans l'acte de connaissance est en nous	Ce que dans l'acte de connaissance est devant nous	Epistémologie	Husserl

Les deux colonnes de gauche du tableau correspondent au texte de Gödel et les deux colonnes de droite sont des interprétations. Si l'on attribue à la première colonne de ce tableau l'espace logique et à la seconde les objets réels (que je qualifierais de monades réels), l'espace logique comprend la description des symboles (par opposition aux choses), les phénomènes (par opposition à la chose en soi), le Sinn

(par opposition au Bedeutung), le possible (par opposition au réel), le multiple (par opposition à l'un), la lumière (par rapport à ce qui est éclairé), ce qui dans l'acte de connaissance est en nous. L'espace logique est composé de symboles reliés entre eux pour signifier l'ensemble des faits possibles. L'espace logique n'est pas une image du monde, c'est un instrument permettant de se déplacer dans l'espace des possibles logiques pour comprendre la structure du monde.

Le point de contact entre le monde et cet espace logique réside dans la confrontation aux faits réels, ce que Gödel traduit de la manière suivante :

« ...nous ne voyons rien de nouveau (dans le ciel des concepts) lorsqu'on regarde une chose à la lumière d'un concept, mais seulement lorsqu'on regarde une chose et un concept à la lumière de ε (ou de la vérité) » Max Phil X, p11

Pour le dire autrement on applique un prédicat à un sujet et on regarde dans les faits si l'énoncé produit est vrai. En modélisation on applique une relation théorique à un cas concret et on confronte le résultat aux observations. La science est le développement itératif, décrit précédemment, dans lequel on supprime certains faits possibles que l'on a invalidé par l'observation. Les faits réels sont ainsi déduits des faits possibles. L'autre point important est le caractère intentionnel des choix dans l'espace logique des faits possibles. Selon un point de vue on détaille par l'analyse l'ensemble des faits possibles. Parfois pour mieux confronter cet espace logique au monde, on déforme le monde en créant une expérience qui permet d'éliminer certaines interactions pour mieux tester des interactions majeures attendues dans l'analyse du monde logique des faits possibles. J'ai déjà donné des exemples en écologie de ce type d'aller-retour entre théories et expérimentations. Mais ce qui est important c'est que l'espace logique n'est à aucun moment une image du monde réel, car tout événement dans le monde réel produit des questions qui seront traduites en faits possibles dans l'espace logique. Il me semble que c'est pour cette raison que l'espace logique est du côté du multiple dans le tableau de Gödel.

Une des conséquences du caractère potentiel et intentionnel des entités de l'espace logique est qu'elles sont potentiellement finalement vides tant qu'elles ne sont pas appliqués à un phénomène ; ce qu'a aussi pointé Sartre dans l'Etre et le néant :

« Les intentions véritablement objectivantes, ce sont les intentions vides, celles qui visent par-delà l'apparition présente et subjective la totalité infinie de la série d'apparitions » p28

Pour conclure, cet espace logique s'apparente à un espace de n-dimensions constituées de points, équivalents des monades dans le monde réel (e.g effectif de proies et de prédateurs), de relations entre ces points, qui modifient les propriétés intrinsèques de ces points (e.g la prédation) et de faits potentiels qui correspondent à la mise en relation dans le temps et dans l'espace de différents points (e.g dynamique de croissance des populations de proies et de prédateurs).

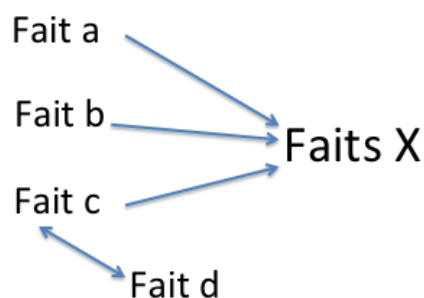
Mais ces points ou relations peuvent être à leur tour reliés entre eux pour définir des types de points ou des types de relations de classe potentiellement infinie, au contour flou (et sans cesse amélioré) et qui ne dénotent pas sur des entités réelles directement : ce sont les concepts.

Nous nous déplaçons dans l'espace logique et comparons les faits réels et les faits potentiels, ce qui permet de dessiner des cartes de points et de relations signifiantes (i.e ayant un sens par rapport à la structure du monde) et créons ainsi une infinité de concepts qui par conséquent disent aussi quelque chose du monde.

5.3 Conclusions sur les possibilités d'unification en science

J'ai donc dessiné un modèle de ce que j'imagine être la texture du monde et la structure de l'espace logique. Quelles conséquences cela peut avoir sur notre sujet ? La première leçon est que ce modèle montre quels sont les points de contact entre l'unification des phénomènes et l'unification nomologique. L'espace logique n'est pas une simple image homothétique de l'espace réel, la connexion est plus complexe elle fait intervenir le caractère intentionnel des déplacements dans l'espace logique. Mais les points de contact existent : c'est la correspondance entre des faits potentiels et des faits réels. Ces piliers ancrés dans le réel, contingentent la structure de l'espace logique, mais la forme qu'il peut prendre est mouvante, un peu comme dans une cathédrale où l'architecture contingente la forme des peintures, mais ne détermine exactement le motif de chacune d'entre elles.

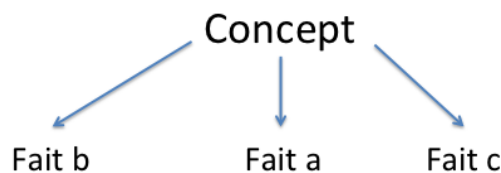
Pour examiner les limites que ce modèle impose à l'unification des phénomènes par une unification nomologique, il faut mieux analyser la notion d'unification des phénomènes à partir des exemples que nous avons utilisés. Dans le cas de la modélisation des flux de carbone et d'eau dans une forêt, l'objectif est de rendre compte d'un fait particulier que je nommerais « l'état fonctionnel de la forêt » délimité dans le temps et l'espace, à partir d'une pluralité de causes (environnementales physiologiques, pédologiques). Cette unification revient à faire l'analyse du phénomène en le décomposant en des parties causalement efficientes ; cette décomposition étant dépendante de la question embarquée dans le fait analysé.



L'analyse est plus mécaniste si on privilégie les relations causales entre les faits expliquant et le fait à expliquer (X). L'analyse est plus statistique quand on prend en compte tous les faits qui sont à notre disposition, mêmes ceux dont la relation avec le fait à expliquer est indirecte (e.g fait d). L'analyse mécaniste favorise le réalisme et potentiellement la généralité et l'analyse statistique la précision. En effet, les faits statistiquement reliés au fait X, peuvent rendre compte de causalités non mises à jours par nos connaissances actuelles des mécanismes. Le processus d'abstraction et d'analyse est conditionné par cet objectif. Le fait de vouloir rendre compte d'un phénomène spécifique conduit à des entités théoriques dénotant d'abord sur des faits ou des objets réels. Ensuite, si on veut une représentation mécaniste, qui est un pont

pour aller vers une certaine forme de généralité, alors on relie ces entités théoriques à d'autres entités qui dénotent sur des faits potentiels voir plus rarement des concepts. Mais le processus de modélisation demeure conditionné par la phase inductive et synthétique. Faire l'analyse d'un phénomène, c'est à dire rendre compte des raisons suffisant à l'expliquer, revient à favoriser la part synthétique de la modélisation.

Dans le cas du modèle théorique proie-prédateur, l'idée est très différente. Il s'agit de trouver une cause unique à une pluralité de faits disjoints dans le temps et l'espace (e.g le rapport de prédation similaire quels que soient les sites et les espèces impliqués).



L'objectif est donc de faire la synthèse d'une pluralité. La démarche est donc inverse, on part d'une situation idéale et on fait l'analyse de la relation entre entités théoriques dénotant sur des concepts pour déduire la pluralité de faits possibles auquel ce mécanisme théorique peut conduire. Le processus de modélisation demeure conditionné par le concept sous lequel on veut subsumer la diversité des phénomènes. Le modèle est par essence générique, mais il peut devenir réaliste s'il est connecté aux restes des connaissances. D'un point de vue ontologique, il recherche les processus réels similaires, mais disjoints dans le temps et l'espace, qui ont pu aboutir à la pluralité étudiée (e.g l'ensemble des dynamique de populations de proies et de prédateurs).

Ces deux approches ne peuvent pas être unifiées car elles ne visent à unifier la même chose et elles ne prennent pas le même chemin. Il existe donc des différences, ontologique (entité réelle visée) et épistémique (chemin dans l'espace logique) irréductibles.

Pour revenir au triangle de Levins. Il présentait trois pôles : précision (modèles empiriques), réalisme (modèles de simulation) et généralité (modèles théoriques). Il me semble qu'on a en fait plutôt deux pôles que sont la précision et la généralité qui sont opposés et donc non conciliables. Le degré de réalisme dépend lui de la connexion du modèle utilisé avec le reste des connaissances acquises. Une plus forte composante réaliste permet en partie de diminuer l'imprécision des modèles théoriques et l'absence de généralité des modèles empiriques. Mais fondamentalement la contradiction semble insoluble, il n'est peut-être pas possible d'unifier un fait réel en analysant toutes ces causes et en même temps de trouver une unité théorique à une pluralité de faits. Remarquons que si l'espace théorique n'était qu'une image homothétique du monde réel, nous ne devrions pas aboutir à une telle conclusion.

Conclusion générale

Résumé des objectifs et des résultats

L'objectif de ce travail était de voir dans quelles mesures la modélisation permettait de dépasser le pluralisme en écologie. J'ai d'abord expliqué pourquoi l'écologie en tant que discipline scientifique était tiraillée entre une philosophie moniste et une philosophie pluraliste. Les deux concepts centraux de l'écologie que sont la biodiversité et la biosphère résument bien cette contradiction primordiale. En effet, l'écologie ne cesse de mettre en lumière l'irréductibilité de la diversité interindividuelle et dans le même mouvement la connectivité entre toutes les entités. Cette connectivité implique que la compréhension de la moindre parcelle du monde ne peut pas faire abstraction du monde dans sa totalité. Par conséquent, l'écologue ne peut pas se satisfaire d'une connaissance morcelée. En tant que science, l'écologie est même née du dépassement de la simple histoire naturelle, dont l'objectif n'était que de collectionner des faits et des objets. L'unité ontologique du monde de par la connectivité élevée des différentes parties du monde, conduit à rechercher une unité nomologique des théories et représentations du monde.

Pour essayer de répondre à ce dilemme, nous avons montré comment ce débat entre pluralisme et monisme s'était posé en écologie et en philosophie. Il en est ressorti qu'une clarification des enjeux et des concepts était nécessaire. Nous avons analysé pas à pas les différentes composantes de la pluralité en écologie : différences linguistiques (e.g concepts équivoques) ou méthodologiques, variétés des disciplines, et pluralité des théories. La conclusion de la première partie est que l'écologie présente une tendance à l'unification malgré des pluralités qui peuvent sembler irréductibles. Cette tendance correspond il me semble à ce que j'ai appelé un pari moniste qui semble avoir été heuristiquement fécond notamment dans le cas de la synthèse néodarwinienne.

Dans la seconde partie, j'ai essayé de montrer pourquoi la modélisation était un candidat naturel pour l'unification, mais qu'en même temps elle était source de pluralités du fait de sa dimension intentionnelle. La modélisation apparaît néanmoins comme une source d'unité linguistique, méthodologique ou nomologique et même un vecteur d'unité sociologique. Mais de cette analyse, il est apparue deux problèmes philosophiques : comment concilier le caractère intentionnel de la modélisation et l'unification nomologique et ontologique? Comment relier l'unification nomologique à l'unification ontologique des phénomènes ? J'ai ensuite essayé d'éclairer ces deux problèmes.

Comment concilier le caractère intentionnel de la modélisation et l'unification ontologique?

La première question nous amène au problème épineux de l'établissement de la vérité. J'ai pris comme hypothèse que la vérité est atteignable et que la vérité est alors correspondance aux faits empiriques indépendamment de nous. La résorption du caractère intentionnel de la modélisation réside dans un processus de récurrence de la séquence : synthèse de la pluralité, analyse des faits possibles, comparaison aux faits

réels. J'ai tenté de faire la généalogie de ce processus de récurrence. Ce processus implique d'abord un dialogue critique, qui prend sa source dans la dialectique platonicienne. L'affinement des rôles respectifs de la raison (synthèse et analyse) et des faits réels (expérimentations et observations) a notamment pour origine la philosophie kantienne. Enfin, le processus social qui fait tourner ce processus de récurrence présente des caractéristiques spécifiques en science du fait des règles de fonctionnement de ce champ. J'ai essayé de rendre compte de ces spécificités. Il est en ressorti que deux limites devaient être prises en compte afin que l'intentionnalité propre aux modèles soit dépassée lors du processus de récurrence par la confrontation aux faits et aux autres théories. La première limite est que le travail critique a besoin pour être efficace d'une clôture du champ disciplinaire, ce qui contredit le besoin d'une unification des phénomènes de type holiste (i.e la réalité ne connaît pas le contour de nos disciplines). La seconde limite bien mise en lumière par Duhem et Quine est que le processus de falsification d'une théorie par les faits n'est pas possible à strictement parler.

Comment relier l'unification nomologique à l'unification ontologique des phénomènes ?

La seconde question soulève d'abord le problème de la référence des entités impliquées dans nos modèles. En effet, l'unité nomologique peut nous dire quelque chose quant à l'unité ontologique si les entités présentes dans nos modèles réfèrent à quelque chose d'existant dans la nature. Or ce problème est loin d'être simple. Il est au cœur du débat entre réalistes et antiréalistes. Il n'existe pas avec assurance de rayons noétiques, l'expression est de Putnam (1981), reliant chacune de nos entités théoriques à des entités réelles. Après avoir rapidement esquissé quelques-unes des thèses et des problèmes soulevés par cette question, j'ai proposé une typologie des références supposées au moins par le chercheur, des différentes entités impliquées dans les modèles. Cette typologie comprend deux axes, l'un réfère à la nature des entités (objet, relation, fait), l'autre à la proximité aux faits réels observés (objets réels, classe finie d'objets réels, classe infinie d'objet idéels ou concept). Enfin j'ai dressé le tableau de ce que je pense être le fonctionnement de l'espace logique. De mon point de vue, c'est un espace rassemblant faits, relations et entités possibles, dans lequel se déplace la communauté des chercheurs de façon éminemment intentionnelle. La liaison entre le monde des phénomènes réels et le monde théorique des phénomènes potentiels est quand même assurée. D'une part, les entités théoriques les plus conceptuelles sont reliées par strates successives à des entités théoriques plus directement reliées aux faits. D'autre part, tout fait potentiel peut être confronté à un fait réel notamment par l'expérimentation et la prédiction. L'espace logique de la modélisation est donc une espèce de bâtiment à multiple étage qui est connecté à sa base (i.e le monde réel) par des pivots (i.e l'application d'un concept à une entité, fait potentiel comparé à un fait réel).

De façon plus concrète, les modèles en écologie exemplifient ce mécanisme. Les modèles empiriques statistiques sont composés d'entités théoriques proches des faits, ils correspondent plutôt à la phase de synthèse de la pluralité et d'induction. Les modèles théoriques ne comportent que des entités conceptuelles faiblement reliées aux faits réels, ils sont le pendant analytique du processus de modélisation qui permet de se déplacer dans le monde logique par déduction. Les modèles de simulations sont

une sorte de médiateur entre ces deux extrêmes, ils permettent un va et vient entre les différents niveaux de cet espace logique.

Néanmoins, suivant l'intuition de Levins, j'ai montré qu'il existait un dilemme. Nous ne pouvons pas mener à bien avec les mêmes outils les deux types de recherche d'unité ontologique, pointée par Morrison (2007) : la synthèse d'une pluralité de faits sous une unité nomologique d'une part et l'analyse d'un fait par sa réduction à d'autres phénomènes d'autre part. La nature plus ou moins fondamentale de ce dilemme demeure pour moi une question. D'un côté, on sent bien que la synthèse d'une pluralité de phénomènes (e.g les rapports de prédation) extrêmement large du point de son extensionnalité, requiert l'usage de concepts très génériques et donc éloignés du réel⁵³. Alors que l'analyse d'un fait particulier, permet de plus « coller » aux faits. Néanmoins, il me semble que les différents étages de l'espace logique sont connectés entre eux. Donc le dialogue entre ces deux approches est forcément possible, il a d'ores et déjà lieu en écologie entre la modélisation de cas spécifique par simulation et la modélisation théorique. Il me semble que le dilemme est plus pratique. En écologie, la théorie du trade-off montre qu'il existe des trade-off entre différentes fonctions ou différentes stratégies. Si un organisme favorise une fonction, elle en défavorise mécaniquement une autre. En agronomie, l'accroissement des rendements s'est fait au détriment de la résistance des plantes à la sécheresse. A la source de ces trade-off, il y a la finitude de la matière et de l'énergie disponible pour un organisme. Il me semble que ce dilemme épistémique est l'expression d'un mécanisme similaire. Dans un monde où la complexité est infinie, l'effort de recherche est d'un collectif n'est lui pas infini.

Éléments de discussion

Quelques points méritent maintenant discussion. Tout d'abord, il me semble nécessaire de clarifier les relations entre monde réel, monde des idées, troisième monde et espace logique. Popper dans sa critique de la philosophie pluraliste des trois mondes écrit (Popper 1979):

« Le monde est constitué d'au moins trois sous mondes ontologiquement distincts (...) : le premier est le monde physique ou le monde des états physiques ; le second est le monde mental ; ou le monde des états mentaux ; et le troisième monde est le monde des intelligibles, ou des idées au sens objectif ; c'est le monde des objets de pensée possibles ; le monde des théories en elles-mêmes et de leurs relations logiques ; des argumentations en elles-mêmes ; des situations de problèmes en elles-mêmes » p247

Je partage son point de vue concernant la connexion des trois mondes, la place spécifique du monde des idées comme interface entre les deux autres⁵⁴ et le fait que le langage participe aux trois mondes. L'espace logique que j'ai décrit semble à première vue recouper le troisième monde de Popper. En fait ce n'est pas totalement vrai. J'aurais tendance à séparer le monde du savoir objectif, qui comprend les théories et paradigmes acceptés et l'espace logique comme lieu de recherche

⁵³ ce qu'indiquait aussi Morrison.

⁵⁴ « Grâce à ce double lien, l'esprit établit un lien indirect entre le premier et le troisième monde » P248.

intentionnel dans le monde des faits possibles. Le premier correspond à une image de la structure du monde réel. Pour le dire autrement, c'est le lieu de sédimentation des vérissimilitudes sur la structure du monde réel. Certes cette image est un tableau en perpétuelle amélioration, mais comme le note Popper cette image est productrice de réelle par le biais des techniques appliquées qui transforment notre monde. Par conséquent, ce troisième monde est bien réel ou en tout cas réfère à quelque chose de réel dans le monde. Par contre, l'espace logique est le lieu d'un dialogue dialectique entre les faits possibles et les faits réels. J'ai montré qu'il était structurellement conditionné par l'intentionnalité de la recherche. C'est donc un outil pour mieux revenir au réel, mais toutes les entités des modèles ne correspondent pas à des faits réels. C'est très explicite dans les cas des exemples de modèles théoriques que j'ai pris. Si la relation de prédation peut dénoter sur quelque chose de réels dans le monde notamment sur la structure écologique du monde, les trajectoires de la dynamique des populations de proies et de prédateurs dessinent des faits potentiels dont les faits réels ne sont qu'un sous ensemble. Ne pas distinguer le monde du savoir objectif, qui est le lieu de sédimentation des connaissances sur le monde réel et l'espace logique comme outil de recherche sur les faits potentiels ne permet pas de dégager les spécificités de l'un (e.g objectivité) et de l'autre (e.g intentionnalité).

L'autre point que je voudrais discuter concerne les conséquences d'une position réaliste ou antiréaliste sur le débat monisme et pluralisme. Au cours de ce travail, j'ai plutôt adopté un parti pris réaliste avec une vision correspondantiste de la vérité, dans quelle mesure ce parti pris conduit au pari moniste que je défends ? Comme je l'ai expliqué dans la première partie, le pluralisme défendue par Kellert et al., (2006) semble de façon sous-jacente supposer et reposer sur un antiréalisme. Il est donc évident que ces deux débats se recoupent. Ce travail, m'a permis de clarifier un peu ces recouvrements. D'abord, il faut expliciter de quelle unité on parle ? Il n'existe aucun lien en fait entre la volonté d'unité linguistique prônée par un Carnap et le réalisme. De même, Mach défend l'économie de la pensée et l'unité nomologique. Ces différentes formes d'unité ne présupposent pas l'unité ontologique et encore moins le réalisme (Mach est antiréaliste). Même Putnam qui défend une unité de la science avec un programme réductionniste très fort, aboutit à un réalisme interne qui nie la vérité comme correspondance aux faits réels. Les deux débats sont donc en partie disjoints sauf quand il s'agit de connecter et d'unifier l'unité des phénomènes et l'unité nomologique. Evidemment, à ce moment-là, se pose la question de la référence des entités impliquées dans les modèles. Mais j'ai aussi indiqué que ce débat mérite des clarifications, car nous devons cesser de mélanger les différents types d'entités. Elles présentent une plus ou moins grande proximité aux faits et donc l'interprétation réaliste de leur dénotation pose plus ou moins de problèmes. La dénotation du diamètre de l'arbre x que je visualise dans la forêt étudiée et que j'incorpore dans un modèle empirique n'a rien à voir avec la dénotation du concept de plasticité. Si j'avais adopté un point de vue antiréaliste strict, il me semble que j'aurais évidemment conclu qu'il n'est jamais possible d'expliquer l'unification des phénomènes par une unification nomologique. Le parti pris inverse m'a conduit plutôt à dire que c'est possible dans certains cas. Mais les deux types d'unification des phénomènes, synthèse d'une pluralité de phénomènes ou analyse d'un phénomène, ne peuvent être réalisée avec le même type d'unification nomologique (voir plus haut).

Perspectives

Les perspectives philosophiques de ce travail sont nombreuses, car chemin faisant j'ai ouvert plusieurs portes correspondant à des problèmes philosophiques majeurs, que je n'ai fait qu'effleurer. Le premier problème concerne la dénotation des concepts. Il n'existe pas de rayons noétiques entre le concept et un objet réel ou même entre un concept et une classe d'objets réels. C'est aussi la conclusion de Gödel. Mais il me semble que la structure de l'espace logique en plusieurs couches hiérarchisées fait qu'il existe un lien indirect entre le monde réel et le monde conceptuel couche la plus idéale de l'espace logique. Mais ce lien demeure mystérieux et il faudrait prendre des cas concrets (e.g le gène, l'adaptation, la plasticité) pour mieux le décortiquer.

Le second problème concerne aussi le lien entre faits réels et espace logique, c'est la question de la vérité correspondantiste. Je n'ai pas de réponses aux critiques de la non falsifiabilité des théories ou des limites concernant le concept de vérisimilitude. On apprend toujours quelque chose en appliquant un prédicat à une entité et en comparant le fait potentiel produit à un fait réel explique Gödel. Mais si nous ne pouvons pas établir la valeur de vérité issue de cette comparaison, l'ensemble de l'édifice s'effondre. Il me semble qu'une piste de recherche gît dans la compréhension philosophique des théories probabilistes, du test d'hypothèse ou du maximum de vraisemblance. Il faut alors sortir d'un concept de vérité booléen, pour aller vers une vérité probabiliste (seule vérité que connaissent les écologues). Des logiques alternatives à la logique classique existent et il serait intéressant de réinterpréter ce travail et la description de l'espace logique à partir d'une logique bayésienne.

Le troisième problème concerne la spécificité sociologique du travail scientifique. J'ai montré en quoi l'analyse du champ scientifique selon Bourdieu, incorporé dans la boucle récursive de la découverte scientifique permet d'affiner la compréhension concernant l'établissement du 3^e monde des vérités objectives. Néanmoins, je ne suis pas aller plus avant dans la description fine du fonctionnement du champ scientifique. J'ai pointé l'existence d'une contradiction entre la nécessaire fermeture du champ disciplinaire et sa nécessaire transgression pour unifier les connaissances. Nous retrouvons à une autre échelle le même dilemme entre précision (i.e en termes d'adéquations au faits) et généralité des connaissances (i.e en termes la grande pluralité des phénomènes à mettre ensemble). Pour le dire autrement, il est rare d'être très bon spécialiste d'un domaine et en même temps avoir une vue d'ensemble interdisciplinaire. Mais cette contradiction peut collectivement être dépassée, cela ouvre la question des recherches interdisciplinaires (unification par intégration) ou transdisciplinaires (unification par réduction). L'écologie de par sa nature déjà transdisciplinaire est probablement un bon champ d'études concernant les moyens pratiques de dépasser ce problème.

Enfin le monde scientifique est en pleine métamorphose, ce qui pose la question de la pérennité de sa spécificité. Notamment, la pratique scientifique depuis 100 ans présente un équilibre subtil entre une critique intersubjective régie par des normes épistémiques (rigueur logique, principe de réalité) et une circulation de l'information dépendant de normes spécifiques de communication (clarté, honnêteté, autorité épistémique). Il me semble que la course à la publication, la logique purement communicationnelle qui conduit à réduire l'autocritique et les aspérités dans la présentation des résultats, et la subordination à des intérêts privés à court terme,

menace le bon fonctionnement de la science (Fischer et al., 2012). Si le portrait du biologiste en capitaliste sauvage dressée par Latour ne menace pas directement et tout de suite l'établissement de vérités, car certaines normes épistémiques sont conservées, il menace à mon avis à terme le bon fonctionnement de la science.

Ce travail aura sûrement aussi des conséquences en ce qui concerne mes propres perspectives de recherche scientifique. Je travaille actuellement au couplage des approches de génétique, de dynamique de population et de physiologie végétale pour étudier les potentialités d'adaptation des forêts aux changements globaux. Nous travaillons sur des modèles de simulations relativement complexes appliqués à des cas d'études très spécifiques. Le fait de rechercher à expliquer un phénomène à partir de sa réduction à une pluralité de causes, ne me semble pas invalidé par ce travail philosophique. Par contre, la tentation d'utiliser ces modèles de simulation comme outils théoriques me paraît maintenant être une impasse du fait du dilemme dont j'ai parlé. Par contre, ce que les modèles théoriques nous disent de l'adaptation potentielle des forêts, mérite d'être confronté aux connaissances acquises sur des cas d'étude grâce aux modèles de simulation. Mais nous ne sommes plus dans l'unification des deux types de modèles et d'approches (ni intégration, ni déduction de l'un à l'autre), juste dans un dialogue dialectique entre différents niveaux de l'espace logique.

Bibliographie

- Aristote. Histoire des animaux. Edition Gallimard 1994. Collection Folio. 587p.
- Barberousse, A., Kistler, M., Ludwig, P. (2000), La philosophie des sciences au XXe siècle. Edition Flammarion, Collection Champs, 353p.
- Bailey, J.K., Hendry, A.P., Kinnison, M.T., Post, D.M., Palkovacs, E.P., Pelletier, P., Harmon, L.J., Schweitzer, J.A. (2009). From genes to ecosystems: an emerging synthesis of eco-evolutionary dynamics. *New Phytologist*. 184 (4) : 746-749,
- Bernacchi, C.J., Singaas, E. L., Pimentel, C., Portis, A.R., Long, S.P. (2001). Improved Temperature Response Functions for Models of Rubisco-limited Photosynthesis. *Plant, Cell & Environment* 24 (2): 253–259.
- Blitz, D. (1992). *Emergent Evolution : Qualitative novelty and the levels of reality*. Boston : Eds Kluwer.
- Bouleau, N., (1999). *Philosophie des mathématiques et de la modélisation*. Editions l'Harmattan. 363p.
- Bourdieu, P. (2001). *Science de la science et réflexivité. Raisons d'agir*, 200p.
- Bouveresse, J.J (2010). Bertrand Russell, la science, la démocratie et la « poursuite de la vérité » in *Revue Agone* N°44 Rationalité, vérité & démocratie, 240p
- Bouvier, A., Conein, B. (2007). *L'épistémologie sociale*. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. 316p.
- Boyd, R. (1983). On the Current Status of Scientific Realism. In « *The Philosophy of Science* ». MIT Press 1999. Boyd eds. 816p.
- Buffon (1749). *De la manière d'étudier et de traiter l'histoire naturelle*, Paris, Imprimerie Royale, Réédition imprimerie nationale 1986.
- Cazelles, B., Chavez, M., Berteaux, D., Ménard, F., Vik, J.O., Jenouvrier, S., Stenseth, N., (2008). Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia*, 156: 287-304.
- Carnap, R., (1928). *La construction logique du monde*. Editions Vrin 2002. 370p.
- Carson, R.L. (1962). *Le printemps silencieux*. Editions Plon 1968. 319p.
- Cartwright, N. (1980). Les lois de la physique énoncent-elles les faits ? In *Philosophie des sciences. Naturalisme et réalismes*. Editions Vrin. 2004. p209-228
- Cartwright, N. (1999). *The dappled world*. Cambridge University Press. 247p
- Charmantier, A. et al (2008). Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science* 320 : 800-803.
- Clements, F.E. (1916). *Plant Succession : An analysis of the Development of vegetation*. Washington, D.C. Carnegie Institution of Washington, Publication No, 242, pp1-7 reproduit dans Keller & Golley (2000).
- Comte, A. (1936). *Cours de philosophie positive. 1re et 2e leçon (1830-1842)*. Librairie Larousse, Collection Classiques Larousse. 107p.
- Darwin, C (1859). *L'origine des espèces*. Editions GF-Flammarion, 1992. 604p
- Davi, H., Dufrêne, E., Granier, A., Le Dantec, V., Barbaroux, B., François, C., Bréda, N., Montpied, P. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part II: Validation for each individual processes from organ to stand scale. *Ecological modelling*, 185(2-4) : 387-405. (8)
- Davi, H, Gillmann M, Ibanez T, Cailleret, M., Fady B, Lefèvre F. (2011). Diversity of budburst dynamics among tree species: New insights from a study along an altitudinal gradient. *Agricultural and Forest meteorology*. 151 (12): 1504-1513.
- Dawkins, R. (1989). *Le Gène égoïste*. Edition Odile Jacob 2003. 200p
- Deleage, J.P. (1986). *Une histoire de l'écologie*. Editions Flammarion. 330p.

- Deleuze, G. (2004). La philosophie critique de Kant. Presses Universitaires de France – PUF, 108p.
- Diderot, D. (1982). Les Bijoux indiscrets. Edition Gallimard Poche. 320 p
- Dixaut, M., (2001). Métamorphoses de la dialectique dans les dialogues de Platon Editions Vrin, 384p.
- Dufrêne, E., Davi, H., François, C., le Maire, G., Le Dantec, V., Granier. (2005). Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, 185(2-4): 407-436.
- Duhem, P. (1906). La théorie physique, son objet et sa structure. Editions Vrin. 2007. 477p
- Engel., P. (2007). Une épistémologie sociale peut elle être aléthiste ? In L'espistémologie sociale sous la direction de Alban Bouvier et Bernard Conein. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2007, 316p.
- Enquist, B.J., Brown, J.H., West, G.B. (1998). Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature* 395:163-165.
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry J.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149: 78-90.
- Ferré, F. (1996). Being and value: Toward a constructive postmodern metaphysics. Albany: State University of New York Press.
- Fine, A. (1984). L'attitude ontologique naturelle, in Philosophie des sciences. Naturalisme et réalismes. Editions Vrin. 2004. p331-372
- Fisher, J., Ritchie, E.G., Hanspach, J. (2012). Academia's obsession with quantity. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(9) : 473.
- Fodor, J. (1974). Special Sciences: Or the Disunity of Science as a Working Hypothesis. *Synthese*, 28: 97-115
- van Fraassen, B. (1977). Sauver les phénomènes. in Philosophie des sciences. Naturalisme et réalismes. Editions Vrin. 2004. p139-146.
- Friedman, M. (2002). Kant, Kuhn, and the Rationality of Science. *Philosophy of Science*, 69 : 171-190.
- Frege, G. (1994). Ecrits logiques et philosophiques. Editions du Seuil. 233p.
- Gause, G.F. (1935). Experimental demonstrations of Volterra's periodic oscillations in the numbers of animals. *Brit. J. Exp. Biol.* 12: 44-48.
- Gillies, D. (1993). The Duhem Thesis and the Quine Thesis, in Martin Curd and J.A. Cover ed. *Philosophy of Science: The Central Issues*, (New York: Norton, 1998), 302-319
- Gillmann, M., Cailleret, M., Boivin, T., Nageleisen LM, Davi H. (2012). Individual vulnerability of Silver fir (*Abies alba* Mill.) to parasitism by two contrasting biotic agents: mistletoe (*Viscum album* L. ssp. *abietis*) and bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) during a decline process. *Annals of Forest science*. In press.
- Giribet, G., Edgecombe, G.D., Wheeler, W.C. (2001). Arthropod phylogeny based on eight molecular loci and morphology. *Nature* 413: 157-161.
- Gleason, H. (1939). The Individuistic Concept of the Plant association. *American Midland Naturalist*, 2 : 92-107 Reproduit dans Keller & Golley (2000).
- Gödel, E., (1944). Russell's Mathematical Logic. in Bertrand Russell: critical assessments, 1998 – Routledge.
- Gödel, E. Max Phil papers. Unpublished.
- Gould, S.J., Lewontin, C.R. (1979). The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme. *Proc. Roy. Soc. Lond. B* 205 : 581–598.

- Gould, S.J. (1988). *Sourires du Flamant rose. Réflexions sur l'histoire naturelle*. Editions du Seuil. 435p.
- Hacking, I. (1981). Est-ce qu'on voit à travers un microscope ? In *Philosophie des sciences. Naturalisme et réalismes*. Editions Vrin. 2004. p238-274.
- Hacking, I. (2003). *Philosophie et histoire des concepts scientifiques*. Cours du Collège de France de 2002-2003.
- Haeckel, E. (1899). *Les énigmes de l'univers*. Traduit par Camille Bos. Librairie Reinwald, Paris, 1902. 462p.
- Holt, R.D. (2009). Bringing the Hutchinsonian niche into the 21st century: ecological and evolutionary perspectives. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106: 19659-19665.
- Hubbell, S. P. (2001). *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Monographs in Population Biology 32. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Husserl, H. (1907). *L'idée de la phénoménologie*. Presses Universitaires de France (PUF), 1982, 136p
- Jacob, F. (1981). *Le Jeu des possibles, essai sur la diversité du vivant*, aux éditions Fayard.
- Johnson, M.T.J., Stinchcombe, J.R. (2007). An emerging synthesis between community ecology and evolutionary biology. *Trends in Ecology & Evolution* 22 (5) : 250-257.
- Kant, E. (1787). *Critique de la raison pure* (2nd Edition). Flammarion. 2008. 584p
- Keller, D., Golley (2000). *The philosophy of Ecology. From Science to Synthesis*. The university of Georgia Press. 366p.
- Kellert, S.H., Longino, H., Waters, C.K., (2006). *Scientific pluralism*. Editions Minnesota studies in the philosophy of science. 248p.
- Knorr W.R. (1976). Archimedes and the Measurment of the Circle: A new interpretation. *Archive for History of Exact Sciences*, 15 (2): 115-140.
- Knorr W.R. (1978). Archimedes and the Elements: Proposal for a revised Chronological Ordering of the Archimedean Corpus. *Archive for History of Exact Sciences*, 19 (3): 211-290,
- Koyré, A. (1973). *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*. Gallimard, 412p
- Kuhn, T. (1962). *La structure des révolutions scientifiques*.
- Kupiec, J.J (2012). *L'ontophylogénèse. Evolution des espèces et développement des individus*. QUAE éditions. 77p.
- Kraft, N.J.B., Cornwell, W.K, Webb, C.O, Ackerly, D.D., (2007). Trait Evolution, Community Assembly, and the Phylogenetic Structure of Ecological Communities. *The American Naturalist* 170 (2) : 271-283.
- Latour, B., (1993). *Petites leçons de sociologie des sciences*. Editions la Découverte, 2007. 252p.
- Laudan, L., (1981). A Confutation of Convergent Realism. In « *The Philosophy of Science* ». MIT Press 1999. Boyd eds. 816p.
- Levi B. (2004). *En lisant Euclide. La géométrie et la pensée socratique*. Edition Agone, collection Banc d'essai. 224p.
- Levins, R. (1996). The strategy of model building in population biology. *American Scientist*, 54 (4) : 421-431.
- Locke, J. (1690). *Essai sur l'entendement humain*, Editions Vrin, Collection Bibliothèque des Textes Philosophiques – Poche , 2001. 640 p
- Lovelock, J.E., Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus* 26: 2-10.
- Manion P.D. (1981) *Tree Disease Concepts*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Mayr, E., (1982) *Histoire de la biologie, Diversité, évolution, hérédité. De Darwin à nos jours.* Fayard, 1989, 1202p.
- Mayr, E. (2004). Happy birthday: 80 years of watching the evolutionary scenery. *Science* 305: 46-47.
- Merleau-Ponty, M (1964). *L'œil et l'Esprit.* Editions Gallimards. Collection Folio essais. 93p.
- McCann, K.S. (2000). The Diversity–stability Debate. *Nature* 405 (6783): 228-233.
- McGill B., J. Enquist, Weiher E, Westoby. M., (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution* 21 (4): 178-185.
- McIntosh, R.P. (1987). Pluralism in ecology. *Annual Reviews of Ecology and Systematics* 18: 321–341.
- Mencuccini M. (2002). Hydraulic constraints in the functional scaling of trees. *Tree Physiology* 22: 553–565.
- Mitchell S, Dietrich M (2006). Integration without unification: An argument for pluralism in the biological sciences. *American Naturalist*, 168: S73–S79
- Morin, E. (1977). *La Nature de la nature* (t. 1), Le Seuil.
- Morrison, M. (1990). Unification, Realism and Inference. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 41 (3): 305-332.
- Morrison, M. (2007). *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures.* Cambridge University Press. 284p.
- Morrison, M. (2011). One phenomenon, many models: Inconsistency and complementarity. *Studies In History and Philosophy of Science Part A* 42 (2): 342-351.
- Nagel, E., (1979). *The structure of Science. Problems in the logic of scientific explanation.* Columbia University. 618p.
- Neff, M. Corley, E. (2009). 35 years and 160 000 articles: a bibliometric exploration of the evolution of ecology. *Scientometrics*, 80(3) : 657-682.
- Neurath, O., (1955). Unified science as encyclopedic integration (originally published in 1938). in Neurath O et al., eds. *International encyclopedia of unified science.* Vol I. Nos 1-10. p1-27. Chicago IL : The University of Chicago Press.
- Oppenheim, P., Putnam, H. (1958). The unity of science as a working hypothesis', in H. Feigl et al., eds., *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. 2, Minneapolis: Minnesota University Press.
- Platon. *La République.* Editions Flammarion 2004, Collection GF. 801p.
- Platon. *Parménide.* Editions Flammarion 2011, Collection GF, 347p.
- Platon. *Phèdre.* Editions Flammarion 1964, Collection GF, 218p.
- Platon. *Timée.* Editions Flammarion 1969, Collection GF, 511p.
- Pichot, A. (1999). *Histoire de la notion de gène.* Editions Flammarion. 384p.
- Poincaré, H. (1902). *La science et l'hypothèse.* Editions Flammarion, 2009, 250p.
- Popper, K. (1979). *Objective knowledge.* Editions Flammarion 2009. La connaissance objective. 578p.
- Putnam, H. (1981). *Raison, vérité et histoire.* Les éditions de Minuit, 1984, 242p.
- Quine, W.V. (1969). *L'épistémologie naturalisée.* In *Philosophie des sciences. naturalisme et réalismes.* Editions Vrin. 2004. p36-60.
- Quine, W.V. (1953). *Du point de vue de logique, Neuf essais logico-philosophiques.* Editions Vrin, « Bibliothèque des Textes Philosophiques », 2003. 256 p.
- Sartre, J.P (1943) *L'être et le néant.* Editions Gallimard 1960. 722p
- Steel, D., (2004). Can a reductionist be a pluralist? *Biology and Philosophy* 19 (1): 55-73.

- Tilman, D., (1996). Biodiversity: Population Versus Ecosystem Stability. *Ecology*, 77 (2) : 350-363.
- Wang, H (1997). *A logical Journey: from Gödel to philosophy*. Bradford Book. 432p
- Wittgenstein, L. (1922). *Tractatus logico-philosophicus*. Editions Gallimard 1993, 122p

Index des tables

Table 1: Les catégories de l'entendement de Kant.....	9
Table 2: Engagements des positions pluraliste et moniste.....	23
Table 3: Noms des laboratoires du département EFPA à l'INRA.....	53
Table 4: Noms des équipes de trois laboratoires d'écologie	54
Table 5: Listes des principales revues publiant des recherches en écologie.....	55
Table 6: Tableau des types d'interactions biotiques.....	61
Table 7: Tableau des objets d'études en écologie	63
Table 8: Liste des concepts clés de l'écologie.....	66
Table 9: liste des formations françaises en écologie.....	67
Table 10: Pluralisme méthodologique en écologie	76
Table 11: Différents engagements du débat réductionnisme holisme (Blitz 1992).....	81
Table 12: Tableau des résultats de l'ANCOVA pour expliquer les variations de dates de débourrement au Ventoux	112
Table 13: Evaluation multi critères du modèle CASTANEA.....	125
Table 14: Synthèse des différents modèles en écologie.....	127
Table 15 : Sémantique à trois niveau de Frege en 1893 (Source G. Crocco)	130
Table 16: Le découpage du monde selon Gödel (source Crocco)	141

Index des figures

Figure 1: Le cycle des relation trophiques en milieu lacustre (Lindeman 1942).....	58
Figure 2: Fluctuations de densité de populations de Paramécie (Gause, 1944).....	61
Figure 3: Illustration de la multi réalisabilité (Fodor 1974)	79
Figure 4: Modèle conceptuel des boucles de rétroaction entre niveaux d'organisations (Bailay et al., 2009).....	83
Figure 5: Taux critique de changement environnemental conduisant à la mort et plasticité (Chevin et a., 2010)	116
Figure 6: Courbe de tolérance des espèce et plasticité (Chevin et al., 2010)	116
Figure 7: Représentation des processus modélisés dans CASTANEA (Dufrêne et al., 2005)	119
Figure 8: Modélisation du transfert de CO ₂ et d'eau dans les feuilles.....	120
Figure 9: Le transport d'électrons dans la membrane des chloroplastes	121
Figure 10: Cycle de Calvin	121
Figure 11: Schéma du modèle de Farquhar	122
Figure 12: Mesures et simulations des flux d'eau dans le modèle CASTANEA (Davi et al., 2005)	126
Figure 13: Triangle des approches de modélisations en écologie (Levins 1966).....	128
Figure 14: Schématisation du modèle de réduction de Friedman (Morrison 1988) ..	137

