

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBES - SETIF 1

FACULTE SNV

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE VEGETALES

N°/BEV/SNV/2024

Polycopié de Cours

A l'usage des étudiants de la deuxième année Master (Palier M2)

DOMAINE

SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE

Ecologie et Environnement

UNITE D'ENSEIGNEMENT FONDAMENTALE

PROJET DE PHYTOECOLOGIE

Préparé par **Dr. Beldjazia Amina**

Année universitaire 2023-2024

Intitulé du Master : ECOLOGIE

Intitulé de la matière : Projet de phytoécologie

Responsable : Dr. Beldjazia Amina

Contenu de la matière

I. Introduction -Définitions

II. Spécificité du milieu urbain (climat, sol, air et pression de pollution)

III. Caractéristiques des écosystèmes Urbains

IV. Contraintes biotiques

V. Méthodes et outils de la géomatique au service de l'analyse et la gestion des espaces végétalisés urbain.

VI.Synthèse des disciplines utilisées pour résoudre des problématiques écologiques (pédologie, bioclimatologie, écologie végétale, botanique, statistiques, SIG et GPS)

VII. Traitement des données

Table des matières

Avant – propos	7
Chapitre I : Définitions.....	10
1. La phytoécologie	10
2. Autoécologie et synécologie	10
3. Flore et végétation	12
4. Végétation naturelle, Végétation artificielle et artificialisation du milieu	12
5. L'association végétale.....	14
6. Les unités phytosociologiques	15
6.1. Forêt :	15
6.2. Matorral :	17
6.3. Buisson :	18
6.4. Broussaille :	18
6.5. Erme :	18
6.6. Steppe :	18
6.7. Prairies :	18
6.8. Pelouses :	18
7. Relevé floristique.....	19
8. Milieu exogène et milieu endogène.....	24
9. Facteur écologique	24
Chapitre II. Spécificité du milieu urbain	25
1. Modèles des villes	25
2. Spécificité des milieux urbains	26
3. Climatologie urbaine	27
3.1. Ilot de chaleur urbain (ICU)	30
3.2. Atmosphère urbaine.....	31
4. Le sol urbain	33
5. Pollution atmosphérique urbaine	35
6. Le confort thermique et la végétation	38
7. Les richesses spécifiques des villes.....	39
1. Les écosystèmes en ville.....	42
2. Caractéristique de l'écosystème urbain	46
3. Typologie des services écosystémiques	48

1.	La pyramide de perception écologique des relations végétation-milieu.....	51
a)	Premier niveau : zone écologique	54
b)	Deuxième niveau : région écologique	54
c)	Troisième niveau : secteur écologique.....	54
d)	Quatrième niveau : station écologique	55
e)	Cinquième niveau : élément de station écologique.....	55
2.	Les différentes formations herbacées terrestres naturelles, semi-naturelles et leurs caractéristiques	56
3.	La phénologie des arbres.....	58
4.	Débourrement et exposition aux pressions biotiques et abiotiques	59
5.	Comment faire face aux pressions	61
Chapitre V. Méthodes et outils de la géomatique au service de l'analyse et la gestion des espaces végétalisés urbain.		63
1.	Introduction à la géomatique.....	63
2.	L'information géographique.....	63
3.	Les fondements de la localisation	66
4.	La collecte : topométrie, télédétection et photogrammétrie.....	67
4.1.	La topométrie	67
4.2.	La télédétection.....	69
4.3.	Les systèmes d'information géographique	71
5.	Identification des groupements végétaux.....	73
6.	Suivi de l'environnement par la télédétection	74
6.2.	Distinction des changements	77
Chapitre VI. Synthèse des disciplines utilisées pour résoudre des problématiques écologiques (pédologie, bioclimatologie, écologie végétale, botanique, statistiques, SIG et GPS)		82
1.	Sol	82
2.	La climatologie.....	84
3.	Ecologie végétale et botanique	86
4.	Statistiques pour résoudre des problématiques écologiques.....	90
5.	SIG et GPS pour résoudre des problématiques écologiques.....	92
Chapitre VII. Traitement des données		96
1.	Pourquoi utilise-t-on l'AFC en phytoécologie ?.....	96
2.	Définition et principes : approche phytoécologique.....	97
3.	Distinction entre Analyse en Composante Principale (ACP) et AFC en phytoécologie	101
4.	Correspondance entre espèces et relevés	101

4.1. Optimum écologique et ordination des espèces.....	101
4.2. Espèces indicatrices et ordination des relevés.....	102
4.3. De l'ordination réciproque des espèces et des relevés à l'Analyse des Correspondances ..	103
5. Choix d'une stratégie pour une étude espèces milieu.....	106
Conclusion	108
Références bibliographiques	109

Liste des Figures

Figure 1 - Relation plante et milieu	10
Figure 2 - La synécologie	11
Figure 3 - Milieu naturel, milieu artificialisé, artificialisation (Long, 1974).....	13
Figure 4 - Association végétale.....	15
Figure 5 - Schémats de modèle des rapports entre la ville et sa périphérie.....	25
Figure 6 - Ilot de chaleur urbain : différence de température entre le centre-ville et le milieu rural..	30
Figure 7 - Structure de la CLA (Stull, 1988 in Vendel, 2011 :40)	32
Figure 8 - Schéma de la partie souterraine des villes (selon Xavier Marié)	35
Figure 9 - Circulation de la pollution dans l'atmosphère urbain.....	36
Figure 10 - Panache de pollution de la ville.....	37
Figure 11 - Dôme de pollution.....	38
Figure 12 - Le gradient urbain-rural, ses changements physiques et la réponse de la biodiversité (Modification de : Arnould et al. (2011) et McKinney (2002)	40
Figure 13 - Les très petits espaces.....	42
Figure 14 - Les espaces délaissés.....	43
Figure 15 - Les surfaces verticales	44
Figure 16 - Les petits espaces verts	45
Figure 17 - Les espaces verts urbains	46
Figure 18 - Les trois modes de représentation de l'information géographique (Denègre et Salgé, 2004).....	65
Figure 19 - L'information géographique en mode numérique et les formes d'objets.....	65
Figure 20 - Les instruments utilisés pour exécuter un nivellement	68
Figure 21 - Système de positionnement global (GPS) Garmin	69
Figure 22 - Instrument de mesure en télédétection (Satellite).....	70
Figure 23 - Les éléments de la télédétection	71
Figure 24 - Etablissement des seuils pour déterminer les changements.....	80
Figure 25 - Analyse de vecteur de changement (d'après Schowengerdt, 1983)	81
Figure 26 - Un exemple de SIG et des procédures d'analyse	93
Figure 27 - Algorithmes correspondant à l'analyse de gradient directe avec averaging simple (a), à l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) éventuellement suivie d'une régression (b), et à Analyse Factorielle des Correspondances sur Variables Instrumentale	105

Table des tableaux

Tableau 1 - Comparaison des paramètres climatiques entre la ville et sa périphérie (Izard in Bourgogne, 2010)	28
Tableau 2 - Principales caractéristiques écologiques des milieux urbains (Borgstrbm, 2006)	48
Tableau 3 - Comparaison entre la classification de Costanza et al (1997) et de de Groot et al.	49
Tableau 4 - Niveaux de perception écologique	53
Tableau 5 - Les diverses formation herbacées	57
Tableau 6 - Table de contingence Humus/Peuplement	97
Tableau 7 - Tableau floristique codé en présence/absence.....	98
Tableau 8 - Table de contingence Espèce1/Espèce2.....	99
Tableau 9 - Tableau disjonctif complet sur 5 relevés.....	100

Avant – propos

Depuis peu d'années le grand public est sensibilisé par les problèmes de l'environnement, des pollutions et des nuisances, de la conservation et de la protection de la nature.

Porteur d'une ambition pédagogique, ce livre s'adresse néanmoins prioritairement aux étudiants de master Ecologie, mais également de naturalistes, phytosociologues ou botanistes amateurs souhaitant se familiariser ou approfondir leurs connaissances sur l'écologie végétale. Il permet de faire connaître une discipline scientifique, la phyto-écologie générale, dont les travaux fondamentaux ou appliqués se situent le plus souvent en amont des préoccupations actuelles sur l'environnement.

On pense parfois, et même au sein de la communauté scientifique autre que celle de l'écologie, que l'étude de la végétation est une discipline dont la rigueur n'est pas tout à fait celle des sciences dites dures. L'étude des processus évolutifs, des adaptations morphologiques, physiologiques et moléculaires de la végétation, du fonctionnement des écosystèmes et de la dynamique des populations ainsi que de l'écologie du paysage sont bien des disciplines scientifiques à part entière, indispensables pour comprendre la phytoécologie.

Introduction

Selon Haeckel (1866) l'écologie est l'étude « des rapports du milieu avec les êtres vivants ». En fait, pour être plus précis, nous dirons que l'écologie analyse, décrit, explique, évalue et prévoit les rapports dont il est question.

Puisqu'il s'agit surtout de phyto-écologie ou écologie végétale ; il est évident que l'écologie animale sera relativement peu représentée.

D'une façon générale, les applications de l'écologie végétale ont tout d'abord été celles de la biogéographie.

L'« école phyto-écologique Louis Emberger » est représentée par une équipe de jeunes chercheurs du centre d'études phytosociologiques et écologiques de Montpellier, laboratoire du CNRS. L. Emberger qui occupa la chaire de botanique de la faculté des sciences de Montpellier de 1937 à 1968 et qui créa dans cette ville le nouvel institut de botanique, d'avoir compris la nécessité d'un renouvellement dans les méthodes d'études de la végétation et de l'avoir encouragé en premier lieu à travers des recherches entreprises, sous sa direction, en Afrique du Nord, puis ultérieurement en France et dans d'autres pays. Les objectifs de l'expérience nord-africaine étaient parfaitement définis. Il s'agissait, en effet :

- De mettre en œuvre une nouvelle manière de décrire et de classer la végétation, de chercher une explication globale, à base écologique, de la diversité des communautés végétales,

- De proposer de nouvelles formes d'expression des relations entre la végétation et le milieu, entre autres par l'emploi des techniques mathématiques et statistiques et par le recours à la cartographie polythématiques,

- De favoriser une approche plus réaliste du dialogue entre les écologues, les autres chercheurs et les aménageurs, en insérant les programmes de recherche dans les projets concrets de développement régionale et de mise en valeur des terres (Long, 1974).

Cependant, « *La végétation est le miroir du milieu* » ; son étude constitue par conséquent une étape capitale pour tout diagnostic écologique d'un milieu ou de sa biocénose.

La description de groupements végétaux n'est pas une fin en soi, mais un des moyens de comprendre cette végétation, et d'essayer d'en saisir l'origine et les variations (Quézel, 1985), et dans le contexte actuel priorisant la préservation de la biodiversité, des habitats et des services écosystémiques, les recherches s'orientent également vers l'identification

d'espèces et de sites à haute valeur patrimoniale. Il s'agit également de renforcer les précisions taxonomiques et les connaissances de l'écologie et de la biologie des espèces végétales clés et d'appuyer, par des expérimentations, la compréhension des mécanismes de développement et de réponse des espèces et des systèmes écologiques face aux changements globaux en cours (Dahmani Megrerouche, 2018).

Compte tenu de l'impact important des activités humaines sur l'environnement, tout abandon, toute modification ou tout changement de celles-ci se traduira, notamment, par des changements dans les groupements ou formations végétales (Lepart et Escarre, 1983). Si l'on admet que les végétaux sont des bons intégrateurs d'états et de changements. Chaque région du globe porte un type d'écosystème déterminé à la fois par sa situation géographique et par son altitude et marqué par des variations de son milieu animal, végétal (et humain), en même temps que de ces conditions abiotiques : climat, roche, sol, etc.

Quelles que soient ses dimensions, chaque région se caractérise donc par la présence d'un certain nombre d'espèces végétales, dont l'existence et l'extension sont déterminées par une zonation horizontale et un étagement vertical. La flore des continents et des divers pays présente donc des caractères particuliers ; la présence de certaines espèces, de certains genres, voire de certaines familles permet de définir à la surface du globe des régions florales naturelles.

Chapitre I : Définitions

1. La phytoécologie

C'est une forme d'écologie; il s'agit ici de l'écologie appliquée aux plantes, aux végétaux, notamment en géobotanique avec une science de la phytologie et la phytobiologie. Elle étudie les biocénoses végétales.

C'est une discipline permettant d'appréhender les caractères de l'environnement à travers les relations entre le milieu et les espèces végétales (Mangin et *al.*, 2000).

C'est l'étude des rapports entre le climat, la faune, le milieu et la végétation. L'étude phytoécologique traduit la combinaison, ou les relations entre la végétation et les facteurs écologiques qui jouent un rôle actif dans sa distribution et son développement. Il y a donc trois phases l'une qui consiste à déterminer les types de végétation l'autre qui recense les facteurs actifs du milieu, et la dernière à identifier les liaisons espèces facteurs (Mediouni et Boussouf, 1980 in Kerroum, 2014). Les associations végétales ne sont pas indépendantes des conditions édaphiques, microclimatiques et biotique. L'étude phytoécologique représente un maillon indispensable pour la connaissance de milieu et de la végétation. Donc la composition floristique est en corrélation étroite avec le type d'environnement.

2. Autoécologie et synécologie

L'autoécologie est la partie de l'écologie qui se préoccupe des relations entre les espèces ou les individus pris isolément et le milieu (fig. 1) ;

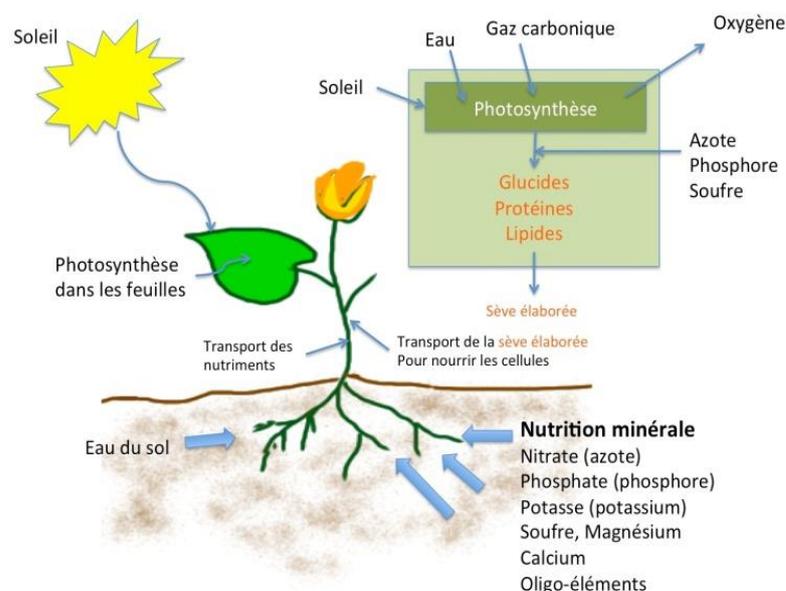


Figure 1 - Relation plante et milieu

La synécologie ne considère que les espèces en groupes ou en communautés et fournit une analyse et une explication des relations entre ces groupes d'espèces ou ces communautés et le milieu dans lequel ils ou elles se développent (fig. 2).

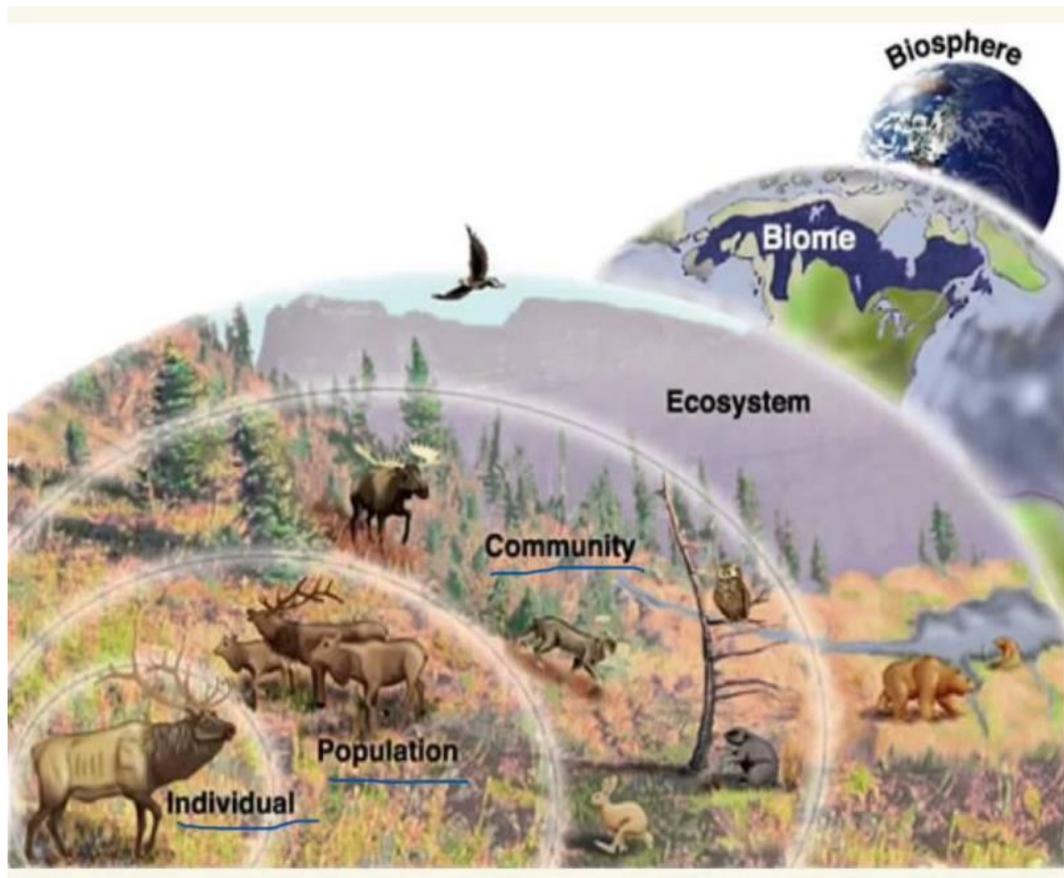


Figure 2 - La synécologie

Les méthodes autoécologiques s'apparentent souvent aux méthodes de la physiologie qui consistent à réduire la complexité des systèmes biologiques soumis à l'étude afin de mieux appréhender la signification des réactions élémentaires ou individuelles des espèces ou des individus étudiés ; elles en diffèrent cependant par le fait qu'elles étudient ces réactions par rapport au milieu et qu'elles ne prétendent pas à démontrer les mécanismes internes, d'ordre bio-physico-chimique, qui caractérise la vie. Les méthodes synécologiques diffèrent des méthodes autoécologiques en ce sens qu'elles sont adaptées à l'étude de systèmes aussi complexes que le sont les communautés végétales ou animales dans leurs relations avec le milieu (Long, 1974).

3. Flore et végétation

La flore est la liste de tous les végétaux, de rang taxinomique divers (espèce, sous-espèce, variété, etc.), d'une localité ou d'un territoire géographique déterminé. La flore est plus simplement représentée par l'énumération des espèces présentes. Elle traduit globalement par la composition floristique, ou le cortège floristique. L'analyse des aires d'origine et des aires de distribution des taxons est une tâche essentielle des botanistes et des phytogéographes qui prend toute sa valeur (Frankel et Bennett, 1970).

La végétation est l'ensemble architectural qui résulte de l'agencement dans l'espace des types de végétaux présents sur une portion quelconque de territoire géographique. La description de la végétation peut être envisagée d'une manière relativement banale si l'on apprend à observer et à délimiter les ensembles structuraux qui la caractérisent. Lesquels peuvent être distribués horizontalement : ce sont alors les éléments de végétation, expression proposée par Soukatschev (1956) et reprise par Gounot (1956, 1969) ; ou bien verticalement : ce sont alors les strates de végétation.

La végétation étant généralement représentée par un ensemble de système organisé, où certaines constantes peuvent être dégagées.

4. Végétation naturelle, Végétation artificielle et artificialisation du milieu

La végétation naturelle comprend tous les agrégats fonctionnels d'individus végétaux, tels qu'on les trouve dans la nature (milieu naturel) et dont les constituants, représentant les diverses espèces, apparaissent spontanément, c'est-à-dire sans le secours du semis ou de la plantation provoqués volontairement par l'homme.

Par végétation artificielle, on entend ici tous les ensembles végétaux volontairement créés par l'homme par les voies du semis ou de plantation (Long, 1974).

Le critère de différenciation est essentiellement celui de l'agent responsable de la dissémination des semences ou de la reproduction végétative.

Le terme artificialisation n'est pas suffisamment explicite. En fait, il s'agit d'une qualification du milieu qui ne peut être comprise qu'en valeur relative par rapport à deux extrêmes. D'une part, le milieu le moins artificialisée, nous dirons le plus naturel, est celui pour lequel l'action historique et actuelle de l'homme est la plus faible (ou nulle) ; un tel milieu est alors caractérisé par une certaine stabilité en ce qui concerne la nature et l'organisation de ses constituants abiotiques ou biotiques. Si le milieu n'est pas abiotique, on y rencontre une végétation naturelle qui est dite climacique ; cette végétation, le climax, n'est

pas toujours la forêt. D'autre part, le milieu le plus artificialisé, ou le moins naturel, est dans l'état actuel de nos possibilités technologiques, celui pour lequel la plupart des variables écologiques sont contrôlées par des moyens artificiels ; un tel milieu est représenté par une enceinte conditionnée dans laquelle tous les paramètres de l'environnement sont produits par des voies artificielles. En l'absence d'artificialisation, ou en présence d'une faible artificialisation, la végétation naturelle tend à s'organiser (fig. 3).

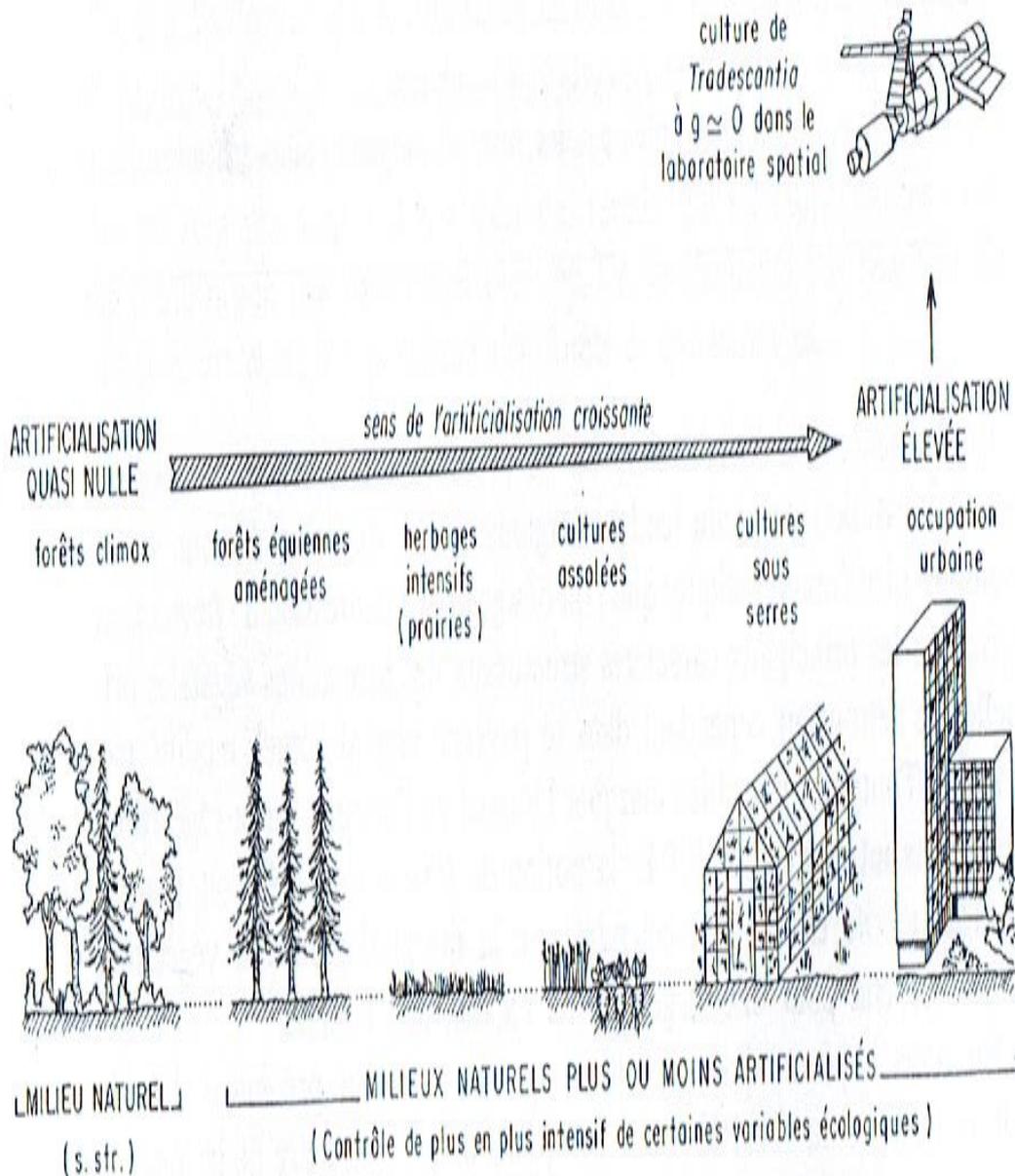


Figure 3 - Milieu naturel, milieu artificialisé, artificialisation (Long, 1974).

5. L'association végétale

Le concept d'association végétale est en fait la véritable clé de voûte de la phytosociologie sigmatiste. Nous en retiendrons deux définitions :

La première fait intervenir essentiellement le critère floristico-statistique : l'association végétale est définie par « une combinaison répétitive originale d'espèces, dont certaines dites *caractéristiques* lui sont particulièrement liées, les autres étant qualifiées de *compagnes* », i.e. un ensemble spécifique normal (Guinochet, 1973) ou une combinaison spécifique originale (Foucault, 1981). Cette combinaison floristique des espèces végétales est le fondement même du système phytosociologique (Géhu, 1992).

La seconde préconise en plus des données floristiques la prise en compte de certaines propriétés de l'association végétale, celle-ci étant un « concept abstrait qui se dégage d'un ensemble d'individus d'association (seul objet concret) possédant en commun à peu près les mêmes *caractères floristiques* (i.e. aux fluctuations aléatoires près), *structuraux, statistiques, écologiques, dynamiques, chorologiques et historiques* » (Géhu, 1980, 1991, 1992 ; Géhu & Rivas-Martinez, 1981).

L'association végétale est l'unité de base de ce système (selon des règles nomenclaturales, sa dénomination se termine par le suffixe «etum» qui est associé au nom d'une ou de deux espèces végétales qui la caractérisent). L'alliance (suffixe «ion») est le niveau hiérarchique supérieur à l'association végétale. Une alliance phytosociologique englobe donc plusieurs associations végétales voisines entre-elles. C'est à dire présentant des espèces végétales et des caractéristiques écologiques en commun. Les alliances phytosociologiques sont à leur tour groupées en ordre. Les ordres similaires se rangent en classe. L'association et surtout l'alliance phytosociologique sont les niveaux de précision habituellement les plus utilisés pour l'élaboration d'une typologie descriptive suffisamment précise des habitats ou unités de végétation d'un site.

Une association végétale décrit les espèces caractéristiques associées à un paysage donné. La phytosociologie est la science qui étudie ces associations. L'exemple traité correspond à un groupement de landes, en Europe de l'Ouest, sur sol podzolique hydromorphe, ce que l'on appelle une lande secondaire mésophile à humide. La callune et l'ajonc déterminent la classe de l'association (*Calluno – Ulicetea*) ; L'ajonc nain détermine l'ordre (*Ulcitalia minoris*) : la bruyère ciliée détermine l'alliance (*Ulici – Ericion ciliaris*). L'alliance caractéristique de la bruyère cendrée (*Ulici – Ericion cinerea*) qui décrit les

landes sèches sur podzols appartient au même ordre et donc à la même classe phytosociologique (fig. 4).

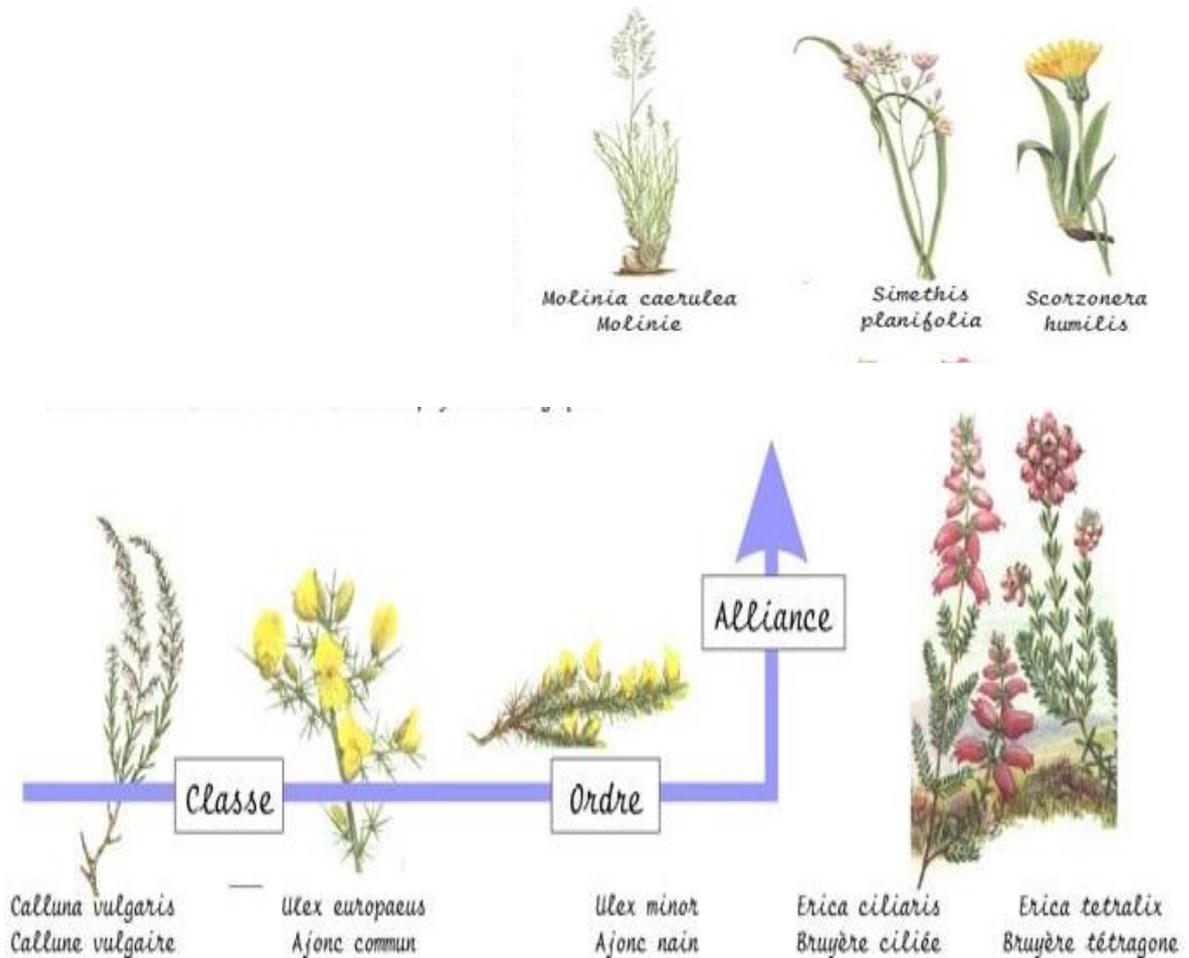


Figure 4 - Association végétale

6. Les unités physiologiques

6.1. Forêt :

Les définitions du terme de forêt sont complexes et sujette à controverses elles se diffèrent selon les pays et les auteurs. Elle tient compte de la surface, de la densité, de la hauteur des arbres et du taux de recouvrement du sol. Un boisement est considéré comme forêt à partir d'un taux de recouvrement de 10 % alors qu'en Europe (DEFINITION CEE-ONU/FAO), on ne parle de forêt qu'à partir d'un taux de recouvrement de 20 %. L'absence de travaux précis par zone biogéographique fait que toutes sont acceptables à divers degrés.

Généralement on peut aussi définir la forêt comme suit :

Sont considérés comme formations boisées de production des formations végétales comprenant des arbustes appartenant à des essences forestières qui satisfont aux conditions suivantes :

- Soit être constituées de tiges recensables (diamètre à 1,30 m du sol égal ou supérieur à 7,5 cm) dont le couvert apparent (projection de leur couronne au sol) est d'au moins 10% de la surface du sol.

- Soit présenter une densité à l'hectare d'au moins 500 jeunes tiges non recensables (plants-rejets semis), vigoureuses, bien conformées, bien réparties.

- Avoir une surface d'au moins 5 ares avec une largeur

- Ne pas avoir une fonction de protection ou d'agrément. (IFN)

- Une formation arborescente dense, il faut s'entendre sur les qualificatifs d'arborescent et dense. Ce type de végétation est défini sur la base de deux critères: la taille et la densité (Benabdeli, 1996).

Toute formation végétale ligneuse dont les espèces dominantes qui la composent se distinguent par un fut et un houppier individualisés avec une hauteur minimale de 4 m dont la concurrence se fait par les racines ou les frondaisons " (Benabdeli, 1996).

- Toutes les formations d'arbre de plus de 2 m de hauteur où se distingue selon le degré de recouvrement des forêts denses des forêts claires et des forêts trouées, (Tomaselli, 1976 *in* Benabdeli, 1996).

(MOLINIER, 1971 *in* BENABDELI, 1996) précise à ce sujet: " La définition de la forêt répond à un quintuple critère: la taille élevée, forme définie, densité suffisante des éléments qui la constituent, étendue assez grande couverte par l'ensemble et pérennité; c'est un espace à cinq dimensions au moins: hauteur, forme, surface, volume et temps ". Ainsi les paramètres déterminants pour définir une forêt sont:

a. la taille: le botaniste (GATIN dictionnaire de Botanique *in* Molinier, 1971) précise: " l'arbre est un végétal ligneux à tige simple et unie dont la taille atteint au moins 7mètres " alors le domaine de la forêt méditerranéenne s'amenuiserait car peu de peuplements forestiers atteignent cette taille.

b. la forme: définie généralement par un tronc simple et dégagé à la base, généralement nos principales espèces présentent une tige souvent rameuse. On rencontre dans le vocabulaire français les termes d'arbrisseaux et d'arbustes.

c. la densité: ce paramètre souffre également du manque de précision, c'est la notion de concurrence qui est utilisée soit par les houppiers soit par les racines, donc le sous-bois est déterminant et cette notion devient très subjective et aléatoire.

d. l'étendue: à l'idée de forêt s'attache celle d'une grande étendue sans aucune autre précision, le plus souvent c'est au-delà de 100 hectares qu'on considère qu'on est en présence d'une forêt car ses effets peuvent être ressentis (amplitude thermique, microclimat, écosystème etc.)

e. la pérennité: la forêt par définition est une formation qui se caractérise par une pérennité car sa durée de vie est normalement illimitée grâce à sa faculté de régénération. (BENABDELI, 1996).

6.2. Matorral :

Formation buissonnante à petits arbres de 1,50 m, rabougris et espacés (caroubier, lentisque), localisée surtout en Castille et qui est une forme dégradée de la forêt à chêne vert.

Formation basse dont la hauteur moyenne est inférieure à 1,50 m où dominent les espèces de la strate sous-arbustive, caractérisée par des espèces forestières et pré-forestières ligneuses indicatrices de conditions particulières de dégradation. (Benabdeli, 1996).

Le terme matorral regroupe les deux notions de maquis et garrigues. La garrigue et le maquis sont des formations végétales qui proviennent toutes deux de la dégradation de la forêt méditerranéenne, le plus souvent par incendie ou surpâturage ce qui les différencie, outre leur aspect et leur cortège floristique propre (bien que plusieurs espèces soient communes aux deux milieux).

a. Maquis :

Le maquis est une formation végétale arbustive généralement fermée (souvent à base d'Ericacées et de Cistacées), résultant de la régression, le plus souvent par incendie ou surpâturage, de la forêt sur sol généralement acide. (Définition d'après le vocabulaire de typologie des stations forestières édité par l'Institut pour le Développement Forestier, 1985).

Le maquis est une formation d'arbustes et d'arbrisseaux ligneux dont la hauteur est supérieure à 1,50 m et n'excède pas 4m, ramifiés dès la base, relativement dense dont la structure et la composition sont en équilibre avec les conditions édapho-climato-anthropozoogènes (Benabdeli, 1996)

b. Garrigue :

La garrigue est une formation végétale plus ou moins ouverte, composée en grande partie d'arbustes, d'arbrisseaux et de sous-arbrisseaux, résultant de la régression de la forêt méditerranéenne, le plus souvent par incendie ou surpâturage, sur sol généralement non acide (Définition d'après le vocabulaire de typologie des stations forestières édité par l'Institut pour le Développement Forestier 1985, France *in* Reguig, 2010).

Formation basse dont la hauteur moyenne est inférieure à 1,50 m où dominent les espèces de la strate sous-arbustive, caractérisée par des espèces forestières et pré forestières ligneuses indicatrices de conditions particulières de dégradation (Benabdeli, 1996).

6.3. Buisson :

Vocabulaire dont la signification est assez particulière, très représentatif de stades de dégradation du maquis essentiellement, il est constitué d'espèces du maquis n'ayant pu atteindre une hauteur leur permettant de se classer dans cette formation (Benabdeli, 1996).

6.4. Broussaille :

Végétation touffue des terrains incultes composée d'arbustes et de plantes rabougries, rameuses et épineuses (Boudy, 1948 *In* Benabdeli, 1996). L'Algérie répartissait les broussailles en deux catégories :

Les broussailles proprement dites (terrains où les tâches d'essences secondaires occupent plus de la moitié de la surface) et les terrains de parcours broussailleux (le sol nu est couvert d'espèces herbacées est dominant). Il souligne que: "La broussaille, même la plus basse, n'est généralement qu'une forme particulière et transitoire de la forêt " (Benabdeli, 1996).

6.5. Erme :

Le terme de pelouses peut être réservé à la végétation herbacée non fauchée. En pays sec, elle prend l'allure steppique et les Provençaux emploient le terme d' « Erme ». (H. GAUSSEN *in* REGUIG, 2010). C'est une formation herbacée avec un cycle saisonnier très marqué, on ne parle d'erme que si elle est issue de la dégradation de la forêt, On distingue : erme herbacée, erme arborée (Belhattab, 1989).

6.6. Steppe :

Formation naturelle herbacée où les graminées jouent un rôle primordial et où domine *Stipa tenacissima* (Benabdeli, 1996).

6.7. Prairies :

C'est un groupement en plaine de plantes herbacées (95% de graminées vivaces), le plus souvent d'origine secondaire, c'est-à-dire dérivant de forêts dégradées ou de cultures abandonnées (Abed, 1984 *in* Reguig, 2010).

6.8. Pelouses :

Sont des formations herbacées à rythme saisonnier très marqué se développant sur des sols secs (très souvent des rendzines).

7. Relevé floristique

Un relevé floristique correspond au résultat d'observation d'un ou plusieurs taxons identifiés au même endroit, à la même date et par le(s) même(s) observateur(s). Le relevé floristique peut être réduit à une seule donnée (dans le cas du simple signalement d'une espèce remarquable par exemple).

Réalisation d'un relevé floristique

Quelques notions préliminaires :

- Une donnée botanique correspond a strict minima à 4 informations de base : un nom de taxon, une localisation (la plus précise possible), une date, un observateur
- Un relevé floristique correspond au résultat d'observation d'un ou plusieurs taxons identifiés au même endroit, à la même date et par le(s) même (s) observateur (s). Le relevé floristique peut être réduit à une seule donnée (dans le cas du simple signalement d'une espèce remarquable par exemple).

La méthode phytoécologique consiste à étudier la relation qui existe entre les groupements végétaux et leur milieu. Elle s'appuie sur des relevés.

Un relevé est un inventaire des facteurs écologiques du milieu (ou inventaire écologique tout simplement) ou l'inventaire des espèces (inventaire floristique). Ces relevés, qu'ils soient écologiques ou floristiques, se font dans une unité de milieu qu'on appelle : la station.

Choix de l'aire du relevé

Lors de la réalisation du relevé sur terrain, 3 principes de base doivent être respectés :

- La surface du relevé doit être la plus réduite possible, limitée à environ 1 ou 2 hectares pour un relevé surfacique, ou 200 mètres pour un relevé linéaire (au-delà, faire un nouveau relevé) ;
- Le nom chevauchement des limites de communes : un relevé ne doit pas être à cheval sur 2 communes par exemple ;
- L'homogénéité stationnelle : il est vivement souhaitable qu'un relevé ne chevauche pas plusieurs formations végétales très différentes.

Les relevés dont la surface est nettement supérieure à 1 hectare restent exploitables dans certaines limites. Mais plus cette surface est importante, plus les possibilités d'exploitation cartographique et l'intérêt même de cette exploitation diminuent (perte de précision de

l'information et augmentation du risque que le relevé se trouve à cheval entre plusieurs mailles en cas d'exploitation cartographique).

Si un inventaire doit être fait sur un site de surface importante, plutôt que de faire un seul relevé sur une grande zone, il est vivement recommandé de multiplier le nombre de relevés précisément géolocalisés, quitte à agréger dans un second temps les informations qu'ils contiennent pour produire la liste totale.

Le choix de la station, de l'unité de milieu où on va travailler, où on va faire des relevés floristiques est une étape analytique de la végétation.

La station doit être floristiquement homogène, elle doit comporter ce qui presque les mêmes végétaux. La physionomie de la végétation doit être la même, et pour cela les conditions du milieu doivent être aussi les mêmes.

Si on prend en général une station à cheval entre une forêt et une prairie, ou une station à cheval entre deux types de sol un calcaire et un schisteux ou siliceux, ou une station à cheval entre deux types de sols un il y aura un écart, qui est meuble et un consolidé, car les conditions écologiques ne sont pas les mêmes.

Pour qu'elle soit homogène floristiquement, la station doit être choisie avec le même type de sol, la même topographie, le même climat, etc.

Donc le choix de la station est important.

Dans cette station choisie, comment on va travailler ?

On va chercher une surface où on va faire nos relevés floristiques. Cette surface qu'on cherche est déterminée de telle façon que si on l'augmente le nombre d'espèces n'augmente plus, on parle alors de **l'aire minimale** de la courbe aire-espèces, c'est la surface la plus petite qu'on va prendre en considération pour faire les relevés floristiques.

Autrement dit : après une montée plus ou moins rapide, la courbe aire-espèces devient presque parallèle à l'axe des abscisses. L'abscisse qui correspond au point de courbure maximale de la courbe c'est l'aire minimale nécessaire pour contenir la quasi-totalité des espèces présentes dans la station qui est floristiquement homogène.

Cette courbe aire-espèces est importante, c'est elle qui permet d'homogénéiser les espèces de la station, car après l'aire minimale on va trouver les mêmes espèces, ça sera donc

homogène, mais comment on va procéder pour trouver sur le terrain cette surface : **l'aire minimale ?**

On prend une petite surface de 1 m carré par exemple, on compte le nombre d'espèces qui existent dans cette petite surface. On double la surface, on note le nombre d'espèces qui s'ajoute, et ainsi de suite. A partir d'une certaine surface le nombre d'espèces reste constant, il n'y a plus d'espèces nouvelles qui apparaissent, cela veut dire que l'aire minimale homogène est atteinte. Mais Il arrive parfois que la courbe aire-espèces remonte de nouveau, cela indique qu'on est sorti des limites du groupement considéré d'une station et on pénètre dans un autre groupement d'une autre station. Donc la courbe aire-espèces, pas seulement elle permet d'homogénéiser la végétation de la station, mais elle constitue un moyen de vérifier les limites des groupements homogènes des différentes stations.

Localisation du relevé

La précision de la localisation est essentielle.

Deux types de géoréférencement sont possibles : pointage au GPS et pointage sur carte.

Le pointage GPS est idéal du fait de son haut niveau de précision, notamment dans les secteurs où le repérage sur carte est difficile. Il est également plus facile, plus rapide et plus sûr à intégrer informatiquement. Le système de projection adopté est le système classique UTM WGS 84. Il est recommandé de noter les coordonnées au format latitude/longitude.

Le pointage sur carte peut se faire sur des extraits photocopiés ou scannés de carte IGN au 1 :25000, ou sur des photographies aériennes. Ce type de localisation est très utile en ce qu'elle permet de circonscrire précisément la zone qui a effectivement fait l'objet du relevé floristique.

La localisation de chaque pointage doit comprendre le numéro du relevé, le contour de l'aire du relevé, très précisément délimité ou la localisation précise d'un pointage ainsi que si possible le chemin d'accès (et/ou le chemin parcouru) en pointillé.

Contenu de relevé floristique

Le relevé doit comporter 3 choses :

- D'abord et avant tout une liste floristique complète, aucune espèce ne doit être négligée, il faut noter le nom de toutes les espèces.

- Des indications sur la structure de la végétation, c'est à dire la manière dont les végétaux sont disposés sur le plan vertical (ligneux hauts, ligneux bas, herbacées).

- Des indications sur les caractères du milieu, c'est à dire l'altitude, de la station, l'exposition, la pente, type du sol, climat, etc...., car quand on change de station les conditions du milieu changent.

En face chaque espèce E de la liste floristique du relevé R il faut noter certains indices, vous avez :

- L'indice d'abondance, c'est à dire le nombre d'individus de chaque espèce (le nombre de pieds, juste une estimation).

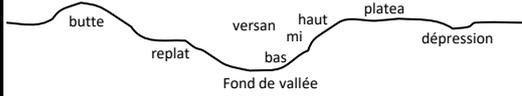
- La dominance, la couverture, c'est à dire le recouvrement des individus de chaque espèce sur le plan horizontal.

- L'indice de sociabilité qui traduit la manière ou la façon dont les individus de chaque espèce sont distribués sur le plan horizontal, est ce qu'ils sont isolés ou groupés, et comment ils sont groupés.

Il existe une échelle internationale proposée par Braun-Blanquet qui apprécie l'abondance et la dominance, c'est à dire le nombre et le recouvrement (reliés ensemble, car c'est difficile de compter le nombre de tous les pieds) : Une échelle qui va de 1 à 5, mais qui commence par r et +.

Fiche de RELEVÉ de VEGETATION

UEA n°		Relevé n°		HABITATS (intitulé + code, à compléter ultérieurement)	
Groupe n° composé de					
date		Lieu		Surface prospectée	∇1m ² ; ∇2m ² ; ∇4m ² ; ∇autres :

Aspect physiologique	Dominance de : ∇graminées ; ∇dicotylédones herbacées ; ∇ligneux ; ∇végétaux inférieurs (mousse, lichens...).	Exposition	Indiquer sur la rose la direction face à laquelle se trouve le versant	H
Hauteur moyenne en cm		Pente	∇faible à nulle ; ∇moyenne ; ∇forte	
Position topographique		Aspect physiologique	∇Eau libre ; ∇végétation flottante ; ∇herbier ; ∇sol nu ∇Pelouse ; ∇prairie basse ; ∇prairie haute ; ∇roselière ∇Lande basse ; ∇lande haute(>1m) ; ∇fourré ; ∇bois et bosquet ∇Haie ; ∇forêt ; ∇cultures ; ∇plantation	

ESPECES(nomenclature binomiale)		Ab-Do	Soc	strate	type
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					

ABONDANCE-DOMINANCE		
Tx de recouvrement*	individus	
i	0 à 5%	Un seul
+		Très peu abondants
1		Peu abondants à abondants
2	5-25%	Abondants à très abondants
3	25-50%	En nombre variable
4		
5		
5	75-100%	

La somme des coefficients dans une même strate peut aller de 5 (une espèce recouvre 100%) à 20 (20 espèces peu abondantes). La somme des taux de recouvrement de chaque strate dépasse généralement les 100%.

* un niveau intermédiaire entre i et + peut être utilisé : r pour individus rares.

SOCIABILITE	
1	Individus isolés
2	Individus en groupes restreints
3	Individus en groupes étendus
4	Petite colonies, peuplement étendu lâche
5	Peuplement étendu dense

STRATIFICATION		
M	Muscinale	...%
H	Herbacée	...%
a	Arbustive	...%
A	Arborescente	...%
	Sol nu	...%

Indiquer le taux de recouvrement de la strate en %.

FORME BIOLOGIQUE	
Ph	Phanérophyste. Espèces dont les bourgeons sont situés à plus de 50cm du sol (arbres, arbustes, lianes)
C	Chaméphyte. Espèces dont les bourgeons sont situés jusqu'à 50cm du sol. (arbrisseaux et sous-frutescents).
H	Hémicryptophyte. Espèces dont les bourgeons sont situés au ras du sol (plantes à rosettes ou crdpiteuses).
G	Géophyte. Espèces dont les bourgeons sont situés dans le sol (plantes à bulbes, à rhizome ou à tubercule).
T	Thérophyte. Plantes annuelles (graines).

8. Milieu exogène et milieu endogène

Le milieu global de l'association peut être subdivisé, pour les commodités de l'analyse, en un milieu exogène et un milieu endogène. Le milieu exogène comprend l'ensemble des facteurs du milieu préexistants à l'installation de la végétation, c'est-à-dire : le climat général, la roche mère, la topographie (dans la mesure où elle ne résulte pas de l'action de la végétation, comme dans le cas des buttes formées dans les tourbières, les groupements halophiles, les groupements steppiques où sévit l'érosion éolienne, etc.), le climat local (dans la mesure où il est conditionné par la topographie préexistante à la végétation).

Le milieu endogène comprend l'ensemble des facteurs résultant de l'action de la végétation sur le milieu exogène, c'est-à-dire le sol évolué, le microclimat lié à l'influence des strates supérieures, etc.. (Gounot, 1956).

9. Facteur écologique

On appelle «facteur écologique» tout élément du milieu pouvant agir directement sur les êtres vivants. Les facteurs écologiques sont de deux types:

1. facteurs abiotiques: ensemble des caractéristiques physico-chimiques (climat) du milieu tels que température, pluviosité, lumière, vent, édaphiques (texture et structure du sol, composition chimique,...).
2. facteurs biotiques: ensemble des interactions qui existent entre des individus de la même espèce ou d'espèces différentes: prédation, parasitisme, compétition, symbiose, commensalisme, ...

Chapitre II. Spécificité du milieu urbain

1. Modèles des villes

L'urbaniste Pierre Merlin schématise les rapports entre la ville et sa périphérie en décrivant trois types de situations (fig. 5):



Figure 5 - Schémas de modèle des rapports entre la ville et sa périphérie

- le modèle méditerranéen, caractérisé par des centres urbains denses qui demeurent forts, vivants et attractifs, avec toutefois l'extension croissante des zones périurbaines ;

- le modèle nord-européen, des îles britanniques à la Scandinavie, se distingue d'abord par une densité plus faible, trois fois moindre à Londres qu'à Paris, des immeubles moins hauts, plus de maisons de ville, des espaces verts plus nombreux. Confrontés à l'expansion des maisons individuelles en périphérie urbaine, les pouvoirs publics ont toutefois orienté leur politique vers la densité des centres-villes en construisant des logements sur les friches portuaires et industrielles ;

- le modèle américain, durablement marqué par une longue tradition anti-urbaine qui donne la priorité aux banlieues résidentielles ; la vie sociale s'organise autour de centres d'activité installés à proximité d'un échangeur autoroutier. Les anciens centres désertés par les commerces et les services sont constitués de quartiers d'affaires, de tours abritant des sièges sociaux d'entreprises qui sont pratiquement désertés pendant la nuit (Merlin, 2007).

Dans les dernières décennies, plusieurs études écologiques *dans* les villes ont visé les interactions entre les organismes vivants et l'environnement physique des villes et l'influence des activités humaines sur cette relation. Ceci a permis d'accumuler certaines connaissances des caractéristiques écologiques des écosystèmes urbains issus des impacts des processus

d'urbanisation sur certains paramètres écologiques, tels que le climat, l'hydrologie, le sol et la biodiversité (Yli-Pelkonen et Niemela, 2005).

2. Spécificité des milieux urbains

Plus largement se pose la question de la ville comme écosystème. C'est la question de Nicole Mathieu : « La nature en ville peut-elle constituer un système naturel qui contribuerait à la préservation de l'environnement ? ». Emmanuel Lierdeman, chargé d'enseignement HES en Gestion de la Nature, explique que l'écosystème urbain est bien un système vivant organisé, au même titre qu'une forêt ou un marais, avec ses composantes minérales, végétales, animales, fongiques, bactériennes, etc.

Mais il a aussi ses propres stocks et flux, et ses boucles de régulation. Pour Caroline Rondel, au-delà de l'idée de « Nature en Ville », le concept d'écosystème urbain permet d'affirmer que la ville est bien un écosystème, mais un écosystème très ouvert, entièrement tributaire de l'extérieur pour toutes ses consommations d'énergie et de matière. Il est donc à la fois très fragile et fragilisateur de la biosphère dans son ensemble. La nature urbaine contribue à la préservation de l'environnement en limitant, bien que modestement, l'effet fragilisateur des villes sur la biosphère. La ville dans son ensemble est un écosystème beaucoup trop ouvert pour être considéré comme tel. Elle offre toutefois des conditions particulières de milieu pour les végétaux et animaux :

- C'est un milieu avant tout rupestre car minéral et vertical.
- Les conditions climatiques diffèrent légèrement mais significativement de la campagne voisine avec des températures plus élevées en moyenne.
- Elle offre une alimentation disponible et abondante, les abris et refuges arbustifs sont disséminés par taches dans les squares, jardins, espaces verts et parcs. Ces caractéristiques de milieu opèrent une sélection parmi les espèces, certaines s'adaptent, d'autres ne peuvent y vivre.

La conception de l'urbain en qualité d'écosystème remonte aux années 1970. Il se distingue des autres écosystèmes par la forte activité anthropique qui affecte de manière considérable l'ensemble des interactions et des échanges entre ses différents composants (Duvigneaud, 1974 ; Pickett et Grove, 2009). Il suit non seulement les lois systémiques mais aussi des lois économiques, sociales et politiques établies par la société.

Depuis l'émergence de la notion d'« écosystème urbain», les scientifiques connaissent des difficultés à le définir. Selon Pickett et Cadenasso (2006), la définition la plus récurrente est celle qui prend en considération la densité de la population urbaine, les limites administratives, l'étendue de la zone bâtie et le temps de déplacement (Pickett et Cadenasso, 2006). Toutefois, cette définition affiche certaines failles. Sa généralisation est contrainte par la variation des formes et des densités urbaines d'un contexte à un autre (Pickett et Cadenasso, 2006 ; Wania, 2007). En outre, elle marginalise les processus écologiques au sein de l'écosystème urbain qui agissent sur son fonctionnement. Pour remédier aux controverses sémantiques, il convient d'appréhender l'écosystème urbain en fonction des questionnements scientifiques (McIntyre et al, 2008). A l'issue d'une revue bibliographique, nous définissons l'écosystème urbain *comme un système ouvert, fonctionnel et dynamique à dominance humaine. Il est structuré comme une mosaïque hétérogène de systèmes artificiels et semi-naturels ayant des propriétés physiques différentes et sont soumis à divers facteurs non seulement socioéconomiques, culturels, politiques, mais aussi écologiques* (Collins et al., 2000 ; Duvigneaud, 1974 ; Pickett et Grove, 2009 ; Wania, 2007 ; McIntyre et al, 2008, Clergeau, 2007 ; Pickett et Cadenasso, 2008 ; IAU, 2011 ; Grimm et al, 2008 ; Pickett et al, 2008, Niemela et al, 2010; Bolund et Hummahar, 1999 ; etc. in Selmi, 2014).

3. Climatologie urbaine

La ville se distingue des autres écosystèmes par la présence des éléments techniques (bâtiments, infrastructures, etc.). Cependant, la densification des bâtiments dans les milieux urbanisés et, dans leur périphérie, les nouveaux développements résidentiels, commerciaux et industriels sont à l'origine de changements locaux du climat. Cela permet de modifier intensément les aspects météorologiques et climatologiques (températures, vitesse de vent, intensité de lumière, etc.). En effet, la géométrie et la densité du bâti induisent une rugosité aérodynamique qui, accompagnée par le manque de végétation et la forte imperméabilisation des sols, influencent les caractéristiques du climat urbain (tab. 1).

*Tableau 1 - Comparaison des paramètres climatiques entre la ville et sa périphérie
(Izard in Bourgogne, 2010)*

Paramètres climatiques	Caractéristiques en ville	Comparaison avec périphérie
Pollution air Pollution gaz	Condensation 5 à 25 fois plus	10 fois plus
Rayonnement solaire Ultraviolet hiver Ultraviolet été Durée ensoleillement	Rayonnement global 30% inférieur 5% inférieur 5 à 15% inférieure	15 à 20% en moins
Température d'air Moyenne jours ensoleillés	Moyenne annuelle 2 à 6°C supérieure	0.5 à 1.5°C supérieure
Vitesse de vent Jours de calme	Moyenne annuelle 5 à 20% en plus	10 à 20% inférieure
Humidité relative Eté	Hiver 8 à 10% inférieure	2% inférieure
Nébulosité « Fog » hiver « Fog » été	Couverture nuageuse 100% en plus	5 à 10% supérieure

	30% en plus	
Précipitations	Total annuel	5 à 10% en plus
Jours à moins de 5mm	10% de plus	
Chutes de neige	5% en moins	

En procédant par comparaison entre le climat rural et le climat urbain, ce dernier se distingue par (Ringebach, 2004 in Selmi, 2014):

- une vitesse du vent très réduite due à la rugosité des surfaces construites qui augmente le frottement et freine l'écoulement de l'air. Ainsi, la vitesse du vent en ville est moins importante de 30% que la vitesse enregistrée à la campagne (Lee, 1984). Par conséquent, le mélange turbulent entre la canopée (selon Dupont (2001), c'est la couche où s'effectue la majorité des activités anthropiques, elle est composée du sol, des bâtiments et le l'air entouré par les constructions) et le reste de l'atmosphère est réduit (Mehdi et al., 2013a) ;

- une évapotranspiration assez réduite et une perturbation des cycles biochimiques à cause des carences en termes de surface végétalisée;

- une production d'énergie importante transmise dans l'atmosphère sous forme de chaleur. Elle est issue des activités anthropiques (chauffage, trafic routier, etc.). A cela s'ajoute un stockage considérable de chaleur à cause de l'abondance des surfaces d'échanges (à titre d'exemple, les surfaces asphaltées réfléchissent uniquement entre 0.2 à 0.5% de l'énergie absorbée (Guay et Baudoin, 2005).

L'ensemble de ces caractéristiques conduit à la singularité du climat urbain et engendre deux phénomènes bien particuliers à savoir l'îlot de chaleur urbain et la pollution atmosphérique. Enfin, le changement du système hydrique des villes issu des processus d'urbanisation du bassin versant, des canalisations, de la minéralisation et de l'imperméabilisation du territoire, etc. entraîne un appauvrissement de la richesse des communautés biotiques (Sukopp, 2004).

3.1. Ilot de chaleur urbain (ICU)

Ce phénomène, généralement observé pendant la nuit, se manifeste par une différence de température, entre la ville et le milieu rural environnant. Des études à Londres montrent que la température au sein de la ville excède celle enregistrée dans la campagne de 3.70°C (Ringebach, 2004). Le même constat est confirmé par une étude menée à la ville de Strasbourg où la différence de température entre la ville et la campagne est de l'ordre de 8°C.

Les ilots de chaleur se définissent comme des zones urbanisées, caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat avec des différences qui varient selon les auteurs de 5 à 10°C (Cavayas et Baudoin, 2008).

La figure 6 montre aussi une diminution de la température au niveau des parcs étant donné que la végétation stocke moins d'énergie. Ce phénomène, appelé îlot de fraîcheur, est dû à l'évaporation et l'évapotranspiration (fig. 6).

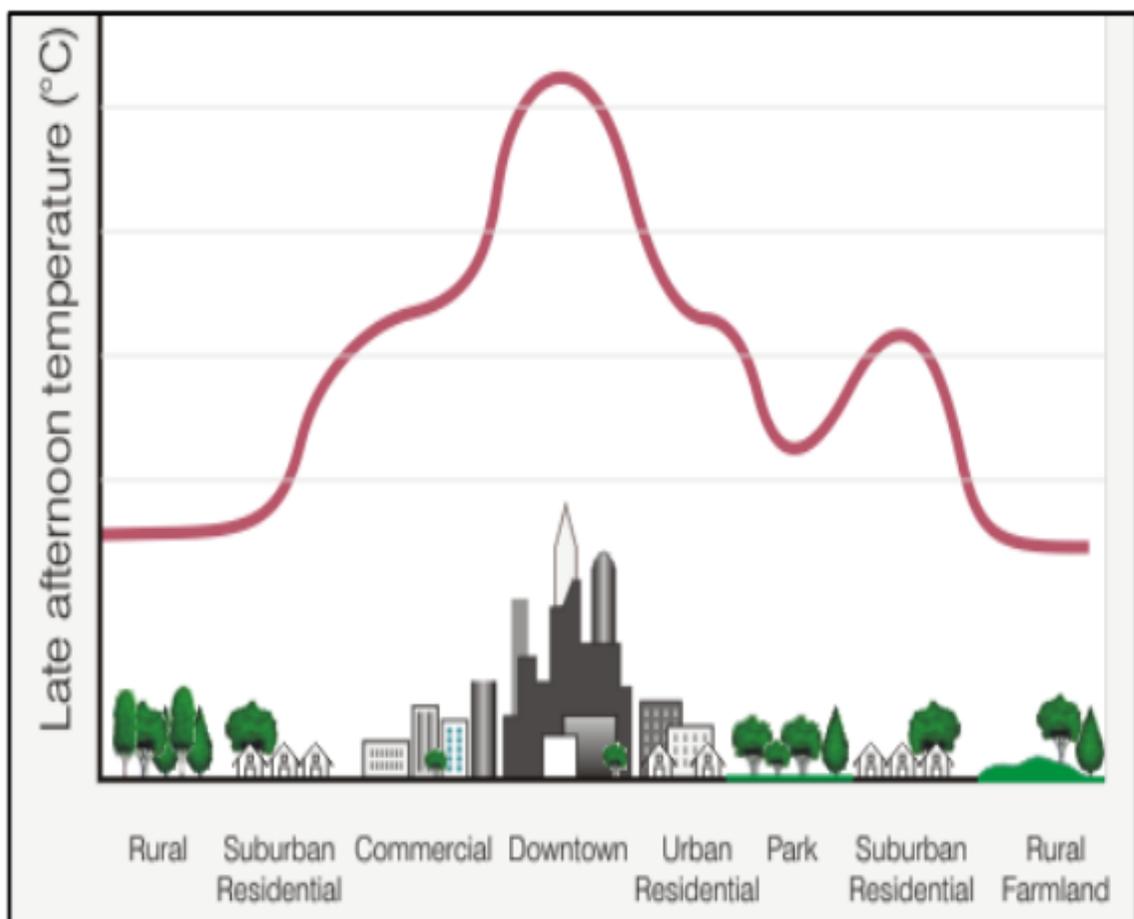


Figure 6 - Ilot de chaleur urbain : différence de température entre le centre-ville et le milieu rural.

L'îlot de chaleur urbain est fondamentalement issu de la chaleur emmagasinée puis dégagée par les bâtiments. Ce flux de chaleur dépend des caractéristiques physiques des bâtiments (couleur, texture, porosité et inertie thermique, etc.) (IAU, 2010).

3.2. Atmosphère urbaine

L'hétérogénéité du sol urbain, la dominance des obstacles, la forte rugosité, le manque de végétation et les propriétés thermiques et radiatives des bâtiments induisent des modifications perceptibles au niveau de l'atmosphère urbaine (Dupont, 2001). En effet, sous l'influence des vents forts et d'un ciel couvert, l'écart thermique entre les différentes surfaces urbaines s'affaiblit. La thermodynamique et la température de l'air prennent, ainsi, un aspect homogène (Dupont, 2001). En revanche, dans des conditions calmes (vent faible et ciel clair), l'écoulement d'air, qui est moins important, entraîne une variation de flux de chaleur entre les différentes surfaces urbaines. Par conséquent, la thermodynamique et la température de l'air deviennent hétérogènes. C'est sous ces conditions que le taux de la pollution atmosphérique augmente.

L'influence du milieu urbain sur l'atmosphère est prononcée dans la couche troposphérique, plus précisément dans la couche limite atmosphérique (CLA). Elle désigne la couche la plus basse de la troposphère dans laquelle le mouvement d'air est influencé par la surface terrestre. C'est la couche atmosphérique où s'effectuent les échanges thermiques, dynamiques et des polluants à l'aide du vent et du phénomène de turbulence (Glockner, 2000 ; Leroyer, 2006). Elle s'étend jusqu'à 2 km d'altitude en effleurant l'atmosphère libre dont les caractéristiques météorologiques dépendent de la thermodynamique de grandes échelles (Dupont, 2001). La CLA, dont l'épaisseur varie en fonction de la saison, l'heure et le type de surface, se décline en deux couches (fig. 7) (Leroyer, 2006 ; Dupont, 2006 ; Bozonnet, 2005 ; Vendel, 2011) :

- la couche d'Eckman : c'est la couche supérieure où l'écoulement n'est influencé que par les forces de Coriolis. L'effet du frottement du sol est négligeable ;

- la couche de surface : elle est directement en contact avec la surface terrestre. Par conséquent, l'effet du frottement du sol est assez considérable.

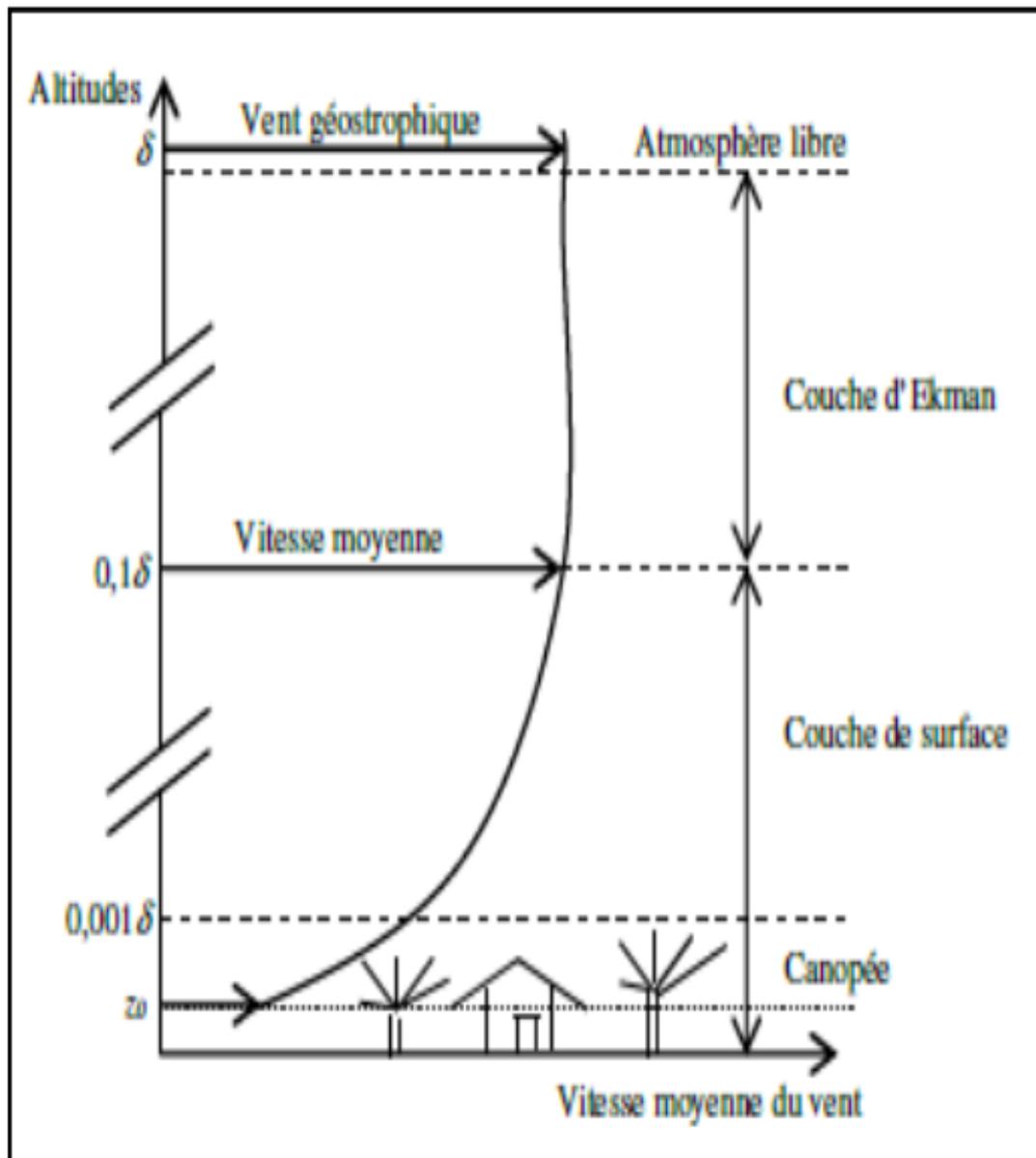


Figure 7 - Structure de la CLA (Stull, 1988 in Vendel, 2011 :40)

Au niveau des villes, l'atmosphère est sous l'influence de l'îlot de chaleur urbain, l'hétérogénéité de la surface, la hauteur des bâtiments et la longueur de la rugosité (Leroyer, 2006). Dans ce cas bien particulier, la Couche Limite Atmosphérique urbaine (CLU) est scindée en deux couches :

- (1) la couche de surface ;
- (2) la couche de canopée urbaine (Ringebach, 2004 et Leroyer, 2006).

Elle s'étale sur une hauteur de plus de 500 m pendant la journée et entre 200 à 300 m pendant la nuit. Elle est plus développée en été qu'en hiver (Hufty, 2001 ; Moppert, 2006 in Selmi, 2014). L'écoulement de la masse d'air au niveau de chaque couche n'est pas dû par les mêmes processus. Si les échanges énergétiques au niveau de la CLU sont contrôlés par les processus à méso-échelle, ceux exercés au niveau de la canopée urbaine sont, quant à eux, soumis uniquement à des processus de micro-échelle, d'où la séparation entre ces deux couches (Leroyer, 2006 ; Hufty, 2001).

La rugosité des surfaces bâties freine l'écoulement d'air à l'aide des forces de frottement. Ces dernières se propagent en altitude et inhibent la vitesse du vent sur l'ensemble de son profil vertical (Plate et Kiefer, 2001 in Selmi, 2014). De ce ralentissement émerge un forçage dynamique qui, en s'associant avec le forçage thermique, entraîne une forte turbulence pendant l'épisode diurne caractérisé par une température et une humidité constante (Hufty, 2001 ; Moppert, 2006 in Selmi, 2014). Les diverses activités anthropiques apportent une énergie supplémentaire sous forme de chaleur. Cette dernière se libérant dans la CLU est ressentie dans le cas des conditions atmosphériques stables (épisode nocturne) (Mehdi et al., 2013a).

4. Le sol urbain

Les sols urbains et suburbains sont constitués de matériaux très divers. Des matériaux d'origine industrielle ou domestique, de même que des débris de constructions plus anciennes, sont souvent présents ou ont été rapportés. Ils gardent aussi l'empreinte du passé (anciennes voiries ou anciennes constructions, implantations d'usine et pollutions anciennes...). Fortement imperméabilisés et recouverts de revêtements artificiels, bitume, pavement, etc., les sols urbains sont très peu utilisés pour leurs propriétés épuratrice et biologique. Ils sont avant tout un support de bâti ou d'infrastructure et servent de matériaux.

a- La ville bouleverse les fonctionnalités du sol : Le sol constitue le support de toutes les activités humaines et de la plupart des écosystèmes. Il assure 3 grandes fonctions :

- Une fonction environnementale : le sol est intimement lié aux autres compartiments de l'environnement, l'air, l'eau et la biosphère. Il assure une fonction régulatrice et épuratrice et a aussi un rôle tampon.

- Une fonction de production : production alimentaire et agricole (champs, jardins...), production à but énergétique (cultures énergétiques, bois...) et production de matériaux (terres, gravats, roches...)

- Une fonction de support : implantation des bâtiments, des infrastructures. À ce titre, il est un héritage culturel des paysages et de notre histoire.

Ces fonctions interagissent entre elles de par les mécanismes complexes du sol :

Il est le berceau des cycles biogéochimiques : altération des minéraux, libération d'éléments nutritifs, recyclage des éléments nutritifs et du carbone pour produire une nouvelle biomasse, décomposition des matériaux toxiques par la faune et la flore du sol...

Il est une composante importante dans le cycle de l'eau : infiltration de l'eau, stockage de l'eau pour assurer l'alimentation des racines, ruissellement en surface ou sur une couche imperméable de sol, réservoir sollicité lors de l'évapotranspiration...

Il contribue au stockage, à l'élimination ou la restitution de certains éléments, nutritifs ou polluants : le complexe argilo-humique permet d'adsorber les éléments qui pourront ensuite être restitués au milieu et aux racines, ou être dégradés par les micro-organismes du sol ou être stockés dans le sol pour une durée plus ou moins longue.

Son inertie assure un rôle tampon : les variations brutales de température sont amorties, les changements de composition de la solution du sol sont atténués, l'eau qui circule dans le sol est en partie purifiée, le sol participe aux échanges gazeux.

Mais ces fonctions sont peu présentes en ville car un large pourcentage des sols urbains et suburbains n'a aucun ou peu de contact avec l'atmosphère : la surface du sol est scellée par des bâtiments ou des revêtements divers, les échanges gazeux, la circulation de l'eau, les cycles biochimiques et géochimiques sont fortement perturbés, et l'action des micro-organismes n'est pas utilisée, voire leur survie est engagée (Bourgogne, 2010).

Planter en ville (fig. 8), c'est encore bien souvent creuser et remplir une fosse de plantation : la partie fertile du sol urbain se limite à une fosse de plantation dans un environnement inconnu et remplie d'une terre aléatoire, souvent importée. Les conséquences ne tardent pas à se faire sentir : échecs à la reprise, développement insuffisant de la végétation, mortalité précoce des peuplements et résultats paysagers parfois décevants.

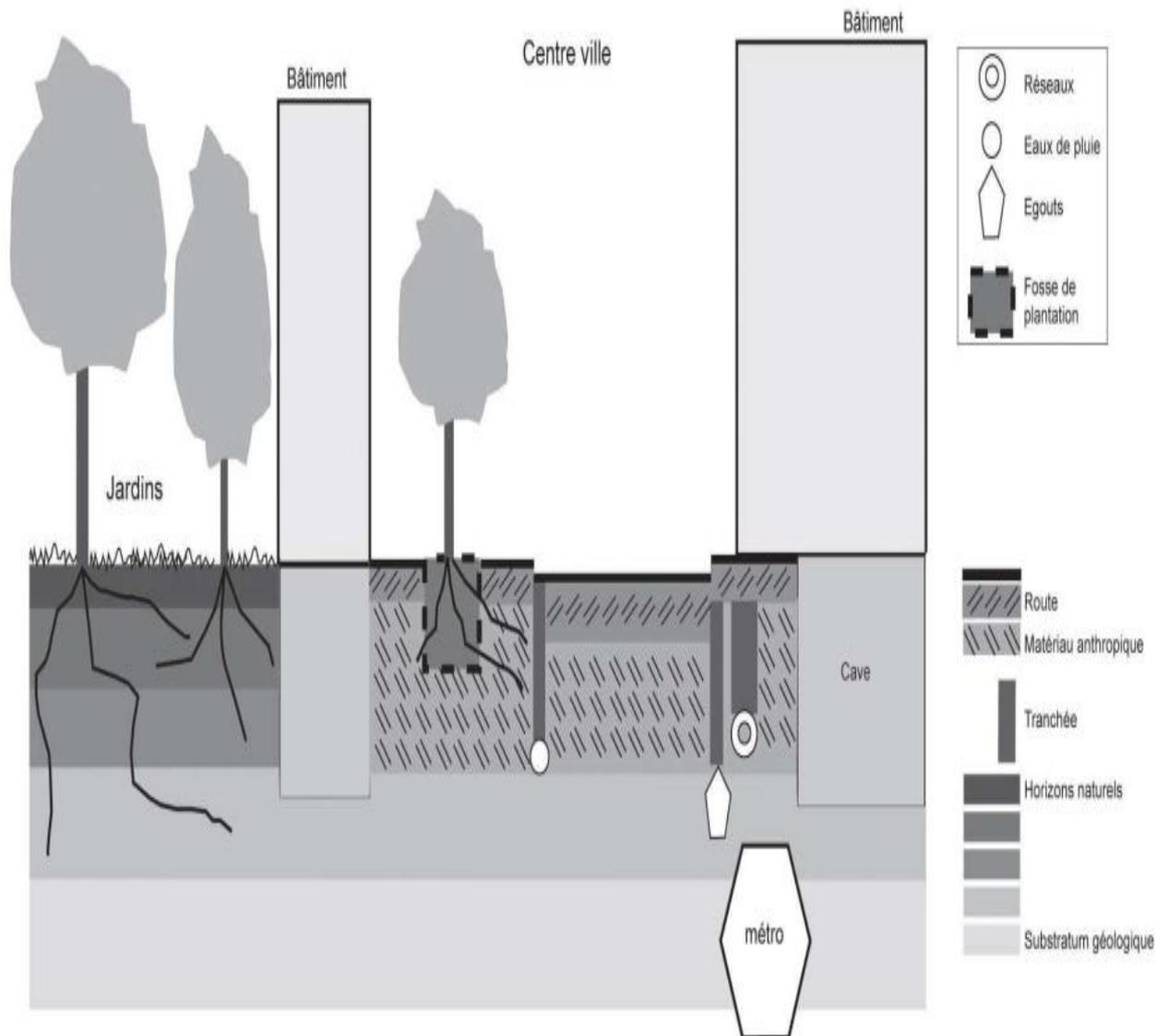


Figure 8 - Schéma de la partie souterraine des villes (selon Xavier Marié)

5. 5. Pollution atmosphérique urbaine

Depuis la prise en compte des enjeux environnementaux, la pollution atmosphérique a fait l'objet de diverses directives à l'échelle planétaire, européenne et nationale. Pour apporter quelques éléments d'éclairage sur la pollution atmosphérique, nous nous appuyons sur la définition proposée par la loi LAURE (Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie, 1996) : « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur

les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives.»

A l'échelle de l'écosystème urbain, les scientifiques évoquent la « pollution atmosphérique de proximité » principalement générée par les activités anthropiques (Frère et *al.*, 2005) (fig. 9).

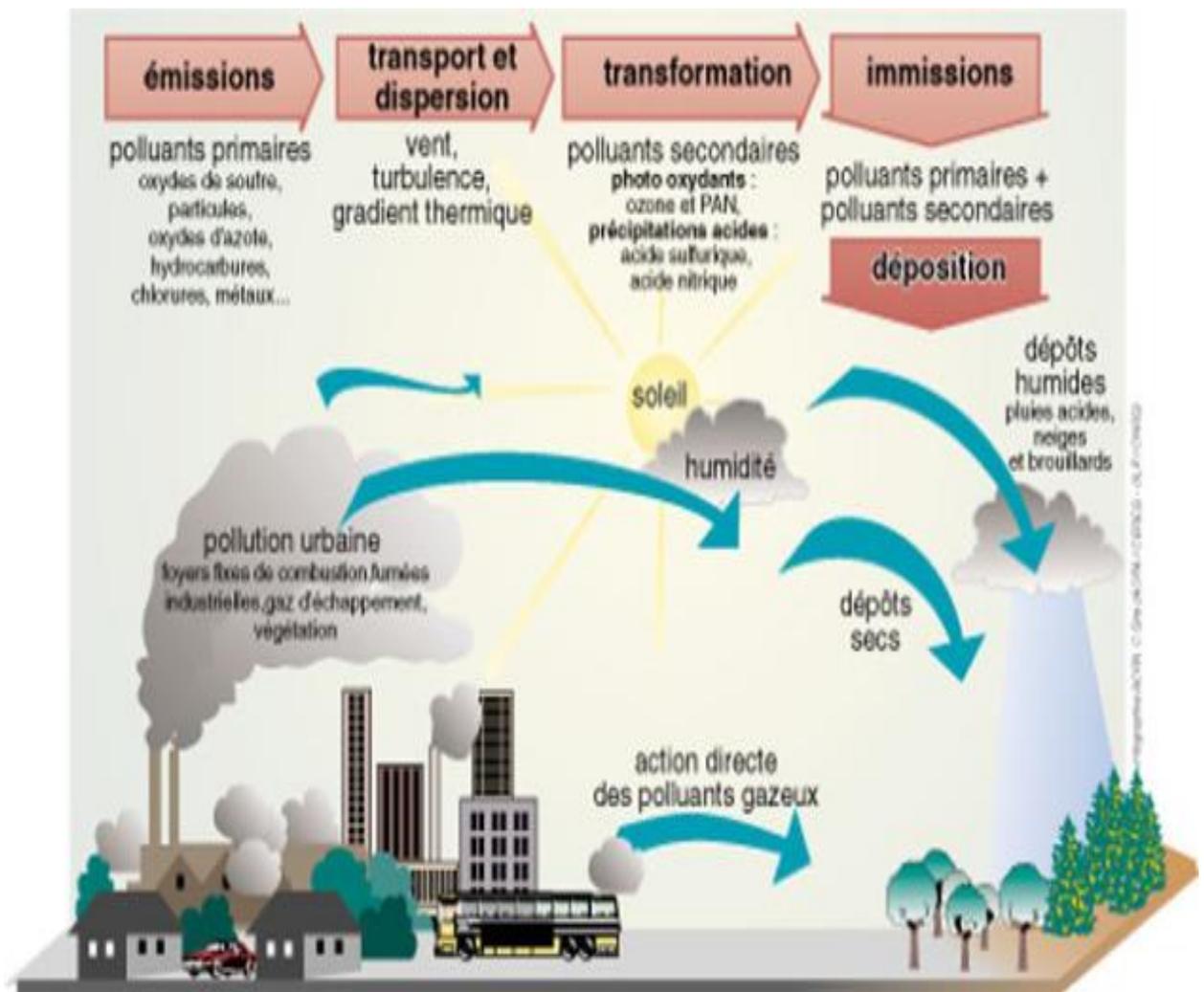


Figure 9 - Circulation de la pollution dans l'atmosphère urbain.

Pour surveiller le taux de la pollution, les acteurs concernés mesurent les concentrations de certains polluants considérés comme indicateurs de la qualité de l'air urbain (dioxyde de soufre SO₂ ; oxyde d'azote NO_x ; oxyde de carbone CO ; ozone O₃ ; composés organiques volatils COV ; particules en suspension PM₁₀ et PM_{2.5}). Depuis leur émission, les polluants séjournent dans l'atmosphère qui exerce une influence à la fois dynamique et chimique. Ils y sont soumis à différents mécanismes: modification chimique, dilution, stagnation (Roussel, 1998). Une fois émis, les polluants se dispersent au

niveau de l'atmosphère en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, humidité, turbulence) et topographiques. Dans les couches les plus basses, c'est-à-dire au voisinage de la surface, la dispersion des polluants est sous l'influence des caractéristiques thermiques et physiques des bâtiments (Oke, 1987). Une rugosité élevée contribue par exemple au transport convectif et à la dispersion de certains polluants. En revanche, elle entraîne l'accumulation des grosses particules même en présence d'une ventilation (Laurent, 2006). Au niveau de la couche limite urbaine, d'autres facteurs sont mis en jeu à savoir la stabilité et la vitesse du vent (Hufty, 2001 ; Oke, 1987). En effet, pendant l'épisode diurne, l'atmosphère est instable, le volume de la couche de mélange augmente, par conséquent la concentration des polluants s'affaiblit. A l'arrivée du vent, cette masse de polluants se disperse vers la campagne formant le panache urbain (fig. 10). En revanche, lorsque des conditions de stabilité s'imposent et en absence de vent, la couche de surface devient chaude ce qui empêche la dispersion des polluants et entraîne un dôme urbain (fig. 11) (Hufty, 2001).

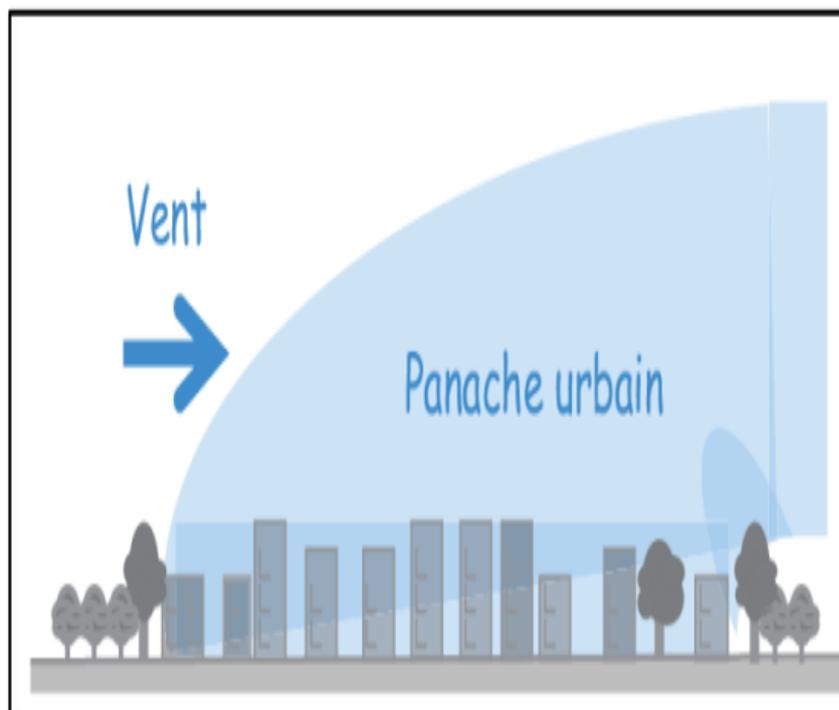


Figure 10 - Panache de pollution de la ville

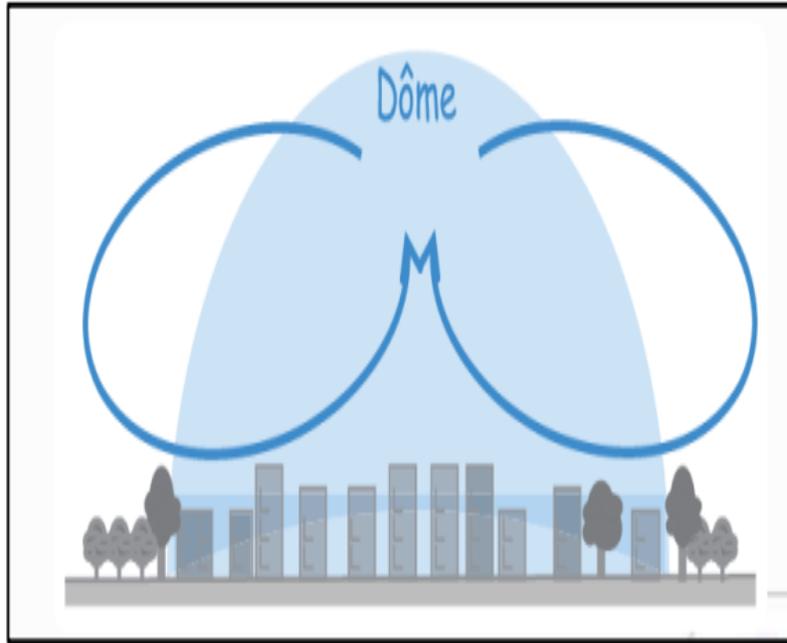


Figure 11 - Dôme de pollution

En présence d'un rayonnement intense, les polluants émis subissent des réactions chimiques et photochimiques et produisent des polluants secondaires comme l'ozone. La production de ce dernier résulte de la réaction des hydrocarbures avec les oxydes d'azotes et les rayons ultraviolets.

En l'absence des réactions chimiques, les polluants se déposent soit localement par dépôt sec soit sur une longue distance par dépôt humide (par précipitation). Pour la pollution atmosphérique urbaine de proximité, le dépôt sec sur la végétation est la voie d'élimination des polluants la plus efficace. Elle reste le seul moyen d'élimination en absence de précipitation (Roupsard, 2013).

6. Le confort thermique et la végétation

La température et l'hygrométrie de l'air dépendent de la nature de la surface urbaine. On en distingue trois catégories :

- **Les surfaces couvertes de végétation** (herbe, taillis) qui favorisent l'évapotranspiration d'eau et réduisent le réchauffement de l'air. Cette propriété de la végétation, appelé rafraîchissement par évaporation, est utilisée pour le confort d'été.

- **Les surfaces minérales à forte inertie** (roches, sables, béton, pavés, macadam...) qui stockent la chaleur durant les journées ensoleillées et rayonnent en début de soirée. Cela a

pour effet de retarder la chute des températures nocturnes. Ceci est d'autant plus vrai si les surfaces sont de couleur sombre, c'est l'albédo.

- **Les étendues d'eau** qui stockent une grande quantité de calories. L'eau agit comme un volant thermique en réémettant ou en absorbant la chaleur par rayonnement et convection, respectivement lors des chutes ou des hausses de température, et réduit ainsi les amplitudes des variations de températures de l'air. La restitution de la chaleur est plus lente qu'avec les sols minéraux. Un lac ou même un étang peut tempérer les amplitudes de température. L'effet est proportionnel à la taille de la surface d'eau. Les plans d'eau ont un rôle de volant thermique jour/nuit, leur température croît modérément pendant la journée et diminue peu pendant la nuit. En pratique, l'utilisation de la végétation environnante est conseillée dans la construction de quartiers ou d'habitations. Elle permet de moduler les apports solaires en fonction des saisons, de façon positive en hiver, négative en été (Bourgogne, 2010).

7. Les richesses spécifiques des villes

La diversité des activités humaines menées dans les villes a créé une grande variété d'habitats, allant de ceux qui sont plus naturels à d'autres, hautement modifiés, dont certains ne se retrouvent pas ailleurs. Grâce à cette grande diversité d'habitats, les paysages urbains offrent une grande richesse spécifique (Niemela, 1999a) principalement d'espèces non natives (Zerbe et *al.*, 2004) (Une plante **native** d'un lieu est une **espèce** végétale indigène ou autochtone d'une région donnée en temps géologique). Cela comprend les plantes qui se sont développées, qui se produisent naturellement ou qui ont existé pendant de nombreuses années dans une région (arbres, fleurs, herbes et autres plantes).

Cependant, une quantité et une diversité remarquable d'espèces natives ainsi que d'espèces rares et menacées persistent encore dans les villes. À titre illustratif citons les exemples suivants: les restes de la forêt Atlantique (Mata Atlântica) à Silo Paulo Moraes Victor *et al.*, 2004) (La forêt atlantique est un biome de type forêt tropicale humide localisé le long du littoral du Brésil et qui s'étire également dans l'extrême-nord de l'Argentine et du Paraguay (c'est un point chaud de biodiversité) ; la ville de Cape Town (Afrique du Sud) est située à l'intérieur du *Cap Floral Kingdom*, le plus petit et le plus riche habitat par unité de superficie (1 300 espèces par km²). Finalement, des études de diversité au niveau des habitats et des espèces menées dans des villes européennes ont abouti à des résultats étonnants. Par exemple, la ville de Fribourg (Suisse) abrite, sur à peine 10 km², 721 espèces de plantes dont un quart figure sur la liste rouge. En outre, les villes italiennes contiennent

presque 50% de toutes les espèces de l'avifaune italienne et plus de 1000 espèces différentes des plantes vasculaires ont été identifiées à Stockholm (Bolund et Hunhammar, 1999).

Remarque : Les espèces sont dites *indigènes*, *natives* ou *autochtones* lorsqu'elles sont originaires de l'aire considérée. Elles sont introduites, exotiques, exogènes ou allochtone lorsqu'elles sont originaire d'une autre aire de répartition.

La richesse spécifique le long du gradient urbain-rural décroît généralement de la périphérie vers le centre des villes (fig. 12). Le cœur des villes enregistre donc les richesses spécifiques les plus faibles (Faeth et *al.*, 2011; McKinney, 2008), ce qui est souvent expliqué par la présence faible ou même l'absence du couvert végétal naturel (Aronson et *al.*, 2014; McKinney, 2002). Cette tendance a été observée chez les mammifères, les oiseaux et les arthropodes. À l'inverse, la diversité spécifique chez les plantes augmente souvent vers le centre des villes. Cette tendance s'explique par l'introduction d'espèces exotiques par l'homme pour l'aménagement des cours privées, des jardins ornementaux et des parcs (Faeth et *al.*, 2011; McKinney, 2008).

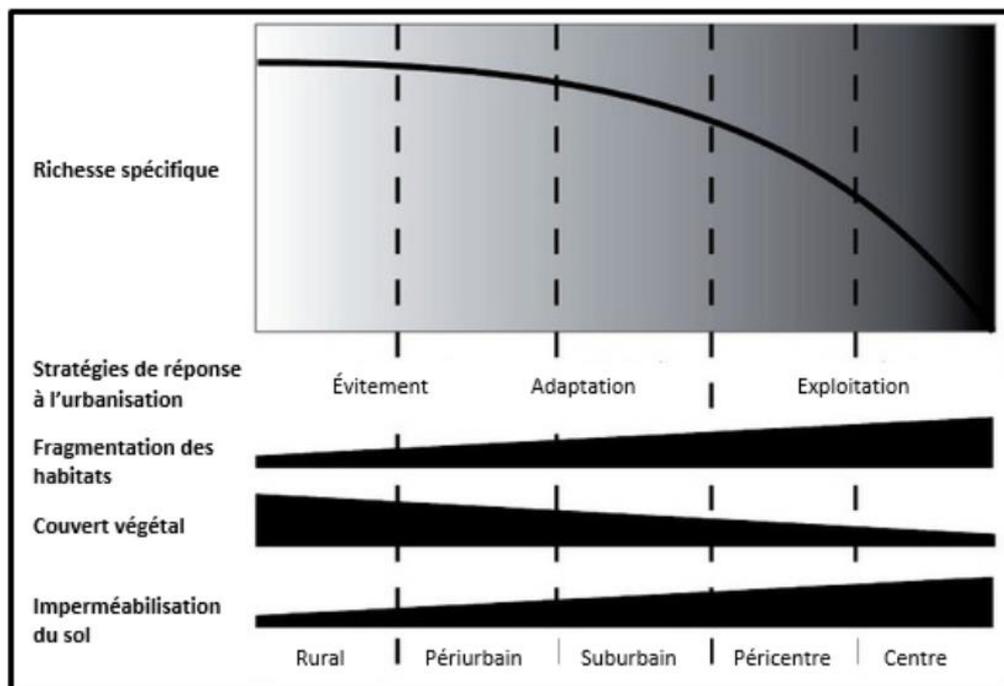


Figure 12 - Le gradient urbain-rural, ses changements physiques et la réponse de la biodiversité (Modification de : Arnould et al. (2011) et McKinney (2002))

Le concept de l'hétérogénéité des habitats stipule qu'une augmentation de la diversité des habitats peut mener à une augmentation de la diversité spécifique. Les habitats plus

complexes ont généralement tendance à fournir une gamme de ressources environnementales et de niches écologiques qui peuvent être utilisées par un plus grand nombre d'espèces (MacArthur and MacArthur, 1961). L'hétérogénéité des habitats présents dans les banlieues et les zones périurbaines pourrait donc expliquer l'augmentation de la richesse spécifique à mi-chemin du gradient urbain-rural (McKinney, 2002; Porter et al., 2001).

Chapitre III. Caractéristiques des écosystèmes Urbains

1. Les écosystèmes en ville

Comme le soulignait Nathalie Blanc, la ville est fragmentée dans sa naturalité. On pourrait rajouter « dans ses écosystèmes ». L'écosystème, unité de nature dans laquelle les plantes, les animaux et l'habitat interagissent, se caractérise par les échanges entre ses êtres vivants. En ville, les écosystèmes se visualisent assez facilement par la taille des espaces de verdure, qui abritent plus ou moins d'espèces animales. À chaque type d'espace correspondent des enjeux d'aménagement pour que s'établisse un équilibre entre installation d'une biodiversité ordinaire (services écosystémiques), esthétique (fonction socioculturelle) et préservation de la qualité des milieux (air, eau, sol). On distingue ainsi (Coulomb, 2010):

• *Les très petits espaces* : Les pieds d'arbres, les bords de route. L'enjeu de ces espaces est de limiter l'intoxication du sol (déjections animales, sels des routes, désherbants, compaction excessive de la terre...) et de redonner sa fonctionnalité à cet espace de sol non artificialisé. Avec un aménagement minimum de fleurissement ou même de flore spontanée, le sol peut retrouver un peu de vie microbienne et recouvrer une capacité de filtration de l'eau (proportionnelle à sa surface), bénéfique à l'arbre et au système sol-plante. Une entomofaune du sol peut s'installer sur ce micro-écosystème. Dans cette catégorie on pourrait inclure les toitures végétalisées, dont l'enjeu essentiel est la limitation du ruissellement des eaux de pluies, et le confort thermique des habitations ; le fleurissement des balcons qui participe à la vie de l'entomofaune (abeilles, syrphes, moucheron...) et donc à celle des oiseaux (fig. 13).



Figure 13 - Les très petits espaces

•**Les espaces délaissés, ou friches** : L'enjeu est de redonner de l'attrait à un secteur de la ville ou de quartier qui se dégrade. Sur ces zones en attente de projet urbain, une flore se met progressivement en place si « l'entretien » en laisse la possibilité. Il est possible de laisser une flore spécifique de terrain dégradé se mettre en place, mais l'aspect d'abandon contribue à l'engrenage de dégradation par les individus. Certaines initiatives de jardin partagé voient le jour dans ces lieux délaissés, lorsque les mairies les autorisent. Elles contribuent à redonner une vie sociale au quartier (fig. 14).



Figure 14 - Les espaces délaissés

•**Les surfaces verticales** : Les façades ont un rôle non seulement lorsqu'elles sont végétalisées, mais aussi en tant que surface minérale pour les oiseaux rupestres, les petits reptiles, lichens et autres. Elles ne doivent pas être trop lisses, et laisser des anfractuosités et possibilité de nidification (sous les corniches par exemple). L'enjeu des surfaces végétalisées est d'apporter du confort thermique, de limiter le rayonnement estival, d'abriter une petite faune. Mais accepter une activité biologique sur les façades est encore souvent synonyme de dégradation (lierre, mousses, nids d'oiseaux ou de guêpes...) (fig. 15).



Figure 15 - Les surfaces verticales

•**Les petits espaces verts, squares ou jardinets privés** : L'enjeu est essentiellement esthétique et agrément de proximité. Il est aussi de profiter du complexe sol/plantes pour absorber les eaux de pluies et éventuellement absorber les polluants de l'air. Le paillage du sol limitera l'invasion d'herbes indésirables et donc l'emploi de pesticides, et favorisera la pénétration et la rétention de l'eau dans le sol. Un choix d'espèces compatibles avec les conditions du milieu (fort rayonnement solaire par les façades minérales, arrosage par l'eau de pluie, sol, exposition) permettra de limiter les interventions humaines, et donc le coût d'entretien. La variété des formes, des volumes, des espèces de végétaux favorisera la biodiversité en offrant des abris pour différentes espèces animales. Les strates végétales jouent un rôle important dans l'accueil de la faune (fig. 16).



Figure 16 - Les petits espaces verts

• *Les espaces verts urbains, d'immeubles ou d'entreprise* : Plus les espaces verts et parcs sont grands, plus il y a de micro ou méso-écosystèmes qui coexistent. La taille du parc permet toutefois d'offrir des conditions de vie à une certaine faune, petits rongeurs, oiseaux, qui y trouvent abri et nourriture. L'enjeu est de favoriser la diversité des espèces et des habitats (en laissant quelques tas de bois mort, des arbres creux, en faisant un fauchage tardif sur certaines parties, etc.). Les enjeux concernent tous les services (socioculturel, qualité de l'air, de l'eau, des sols, de la diversité biologique...) (fig. 17).



Figure 17 - Les espaces verts urbains

2. Caractéristique de l'écosystème urbain

L'écosystème urbain concerne l'ensemble des zones où des constructions humaines ont été réalisées et où la surface de ces infrastructures est supérieure à celle des zones naturelles présentes dans le périmètre. Il contient l'ensemble des zones construites, les réseaux (routiers, ferroviaires, ...) mais aussi les espaces verts créés par l'Homme.

Les écosystèmes urbains présentent des caractéristiques spécifiques par rapport aux écosystèmes naturels :

- ils sont très dépendants des apports externes et ne fournissent pas toujours aux espèces l'ensemble des éléments nécessaires pour assurer leur cycle biologique efficacement (Synergiz, 2013).

- la qualité de l'environnement y est altérée, au niveau de l'air, de l'eau et des sols. Les nombreuses particules fines en suspension dans l'atmosphère participent à la nitrification des sols urbains et les concentrations élevées en azote et en phosphore ont des répercussions sur les eaux de surface et les eaux profondes, où l'on retrouve également d'autres polluants comme les métaux lourds (Clergeau, 2008).

- la température extérieure y est plus élevée en raison des gaz émis par les automobiles et les bâtiments (dioxyde de carbone, méthane, ozone), de la réflexion des rayons solaires sur les bâtiments et du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

- ils présentent également une forte imperméabilisation de leurs sols, en grande partie recouverts d'asphalte. De nombreuses études menées au niveau mondial constatent à la fois les effets négatifs de la ville sur l'installation d'espèces sauvages (pollution, destruction/fragmentation des habitats naturels, bruit intense et constant, éclairage permanent,...) et sur l'homogénéisation des communautés d'espèces (on retrouve les mêmes types d'espèces dans la plupart des grandes villes du monde), et montrent en même temps la capacité d'adaptation qu'ont certaines populations pour se satisfaire des espaces transformés par l'homme et qui présentent une absence de grands prédateurs et des ressources alimentaires abondantes. Ces milieux perturbés sont également très attractifs pour des espèces dites généralistes qui ont la capacité d'occuper des habitats très différents (Mc Kinley, 2006).

Outre la dominance humaine, l'écosystème urbain se distingue des autres écosystèmes écologiques par son incapacité à recycler ses déchets et à produire la biomasse. Il est par conséquent dépendant des autres écosystèmes environnants (Rondel, 2008). Selon Frontier (1999), un écosystème urbain n'intervient pas dans la production des denrées, il invente plutôt des technologies pour :

- (1) accéder à ces produits fabriqués par les écosystèmes naturels ou agricoles voisins ;
- (2) maintenir cette production en fonction de ses besoins.

Nous récapitulons les caractéristiques écologiques des milieux urbains, dans le tableau suivant (tab. 2):

Tableau 2 - Principales caractéristiques écologiques des milieux urbains (Borgstrbm, 2006)

Caractéristiques écologiques urbaines

<i>Climat</i>	<i>Biodiversité</i>
Plus chaud	Haute fréquence d'invasions
Plus sec	
Plus venteux	Haute fréquences d'espèces généralistes, Moins de présences d'espèces spécialistes,
<i>Hydrologie</i>	Haut degré d'hétérogénéité
Ruissellement accru	Altération des régimes de perturbations
Moins d'évaporation /transpiration	Altération des successions écologiques
Diminution de la nappe phréatique	
<i>Pollution</i>	Floraison précoce Accroissement du stress hydrique en été
Augmentation des niveaux de particules	
Changements dans la radiation solaire	
Augmentation de la pollution par bruit	
Production des déchets	
<i>Sols</i>	
Acidification des sols	

3. Typologie des services écosystémiques

Le milieu urbain est un milieu hautement artificialisé qui concentre l'activité humaine. C'est une source importante de pollution pour l'environnement. Des infrastructures et des réglementations sectorielles permettent de limiter les pollutions, comme pour l'épuration des eaux usées, ou l'élimination des déchets ménagers. Les infrastructures naturelles contribuent aussi à limiter les pollutions, de façon souvent moins ciblée et donc plus complexe (arbres en ville pour filtrer l'air, maintien de la biodiversité pour limiter les prédateurs d'insectes ou de rongeurs...) (Bourgone, 2010).

La nature en milieu urbain dispense des aménités au citoyen. Elle améliore son cadre de vie, lui procure des lieux de promenade, de pratiques sportives de plein air, un refuge contre le bruit, le stress, la pollution et la possibilité de cultiver un jardin familial. Ces services d’agrément présentent une contrepartie économique qui ne peut être négligée, en tant que contribuant à l’attractivité de la ville, à sa valorisation touristique.

La végétation urbaine dans son ensemble offre des bienfaits aussi variés qu’utiles, également appelés services écosystémiques (SE). Certains de ces avantages ont fait l’objet de plusieurs études, à l’instar de l’impact du végétal sur la pollution atmosphérique et des nuisances urbaines en général (Niemela *et al.*, 2010 ; Dobbs *et al.*, 2011).

La définition du concept de « services écosystémiques » a donné lieu à une littérature aussi riche que diversifiée. Daily (1997) a défini les SE comme l’ensemble des conditions et des processus à travers lesquels les écosystèmes naturels et les espèces qui y trouvent refuge soutiennent la vie humaine.

Une autre définition a été proposée par Costanza et son équipe (Costanza *et al.*, 1997) pour qui les services écosystémiques sont « les bénéfices directs et indirects » rendus à la société par les fonctions des écosystèmes.

Costanza et ses collègues (1997) proposent aussi une typologie de SE renfermant 17 grandes catégories. Cette typologie affiche une certaine ressemblance avec celle proposée par de Groot *et al.* (2002). Cependant, en les comparant toutes les deux, nous remarquons le désaccord des auteurs quant à la classification des bénéfices. Si la première équipe privilégie le recours au terme « service », la deuxième, quant à elle, préfère celui de « fonction » et propose une classification synthétique en quatre grandes catégories qui se déclinent en vingt-trois sous-classes (tab. 3).

Tableau 3 - Comparaison entre la classification de Costanza *et al.* (1997) et de de Groot *et al.*

Service/fonction	Costanza <i>et al.</i> 1997	De Groot <i>et al.</i> , 2002
	Exemples	
Régulation de l’atmosphère	Maintien de la balance CO ₂ /CO	Fonctions de régulation
Régulation du climat	Régulation des gaz à effets de serre	
Régulation des perturbations climatologiques	Protection contre les tempêtes et les inondations	

Régulation de l'eau	Approvisionnement en eau pour l'agriculture et l'industrie	
Approvisionnement en eau	Approvisionnement en eau potable et création des réservoirs	
Contrôle d'érosion et la rétention des sédiments	Prévention contre les pertes des sols, stockage des eaux de ruissellement	
Formation du sol	Accumulation de matière organique	
Maintien du cycle des éléments nutritifs	Fixation d'azote du phosphore et du potassium	
Traitement des déchets	Contrôle de la pollution	
Pollinisation	Rôle des pollinisateurs dans la reproduction des plantes	
Contrôle biologique	Maintien du réseau trophique	
Refuge	Refuge pour la biodiversité	
Réservoir pour la biodiversité	-	Fonctions d'habitat
Production alimentaire	Production des fruits, légumes, poissons, etc.	Fonctions de production
Production de la matière première	Production du bois de charpente, carburant, etc.	
Ressources génétiques	Production des produits pharmaceutiques, Production des plantes ornementales	
Ressource médicinale	-	
Ressource ornementale	-	
Esthétique	-	
Récréation	Ecotourisme, activités sportives, etc.	Fonctions d'information
Information culturelle et artistique	Valeur esthétique, artistique Education	
Spiritualité	-	
Science et éducation	-	

Chapitre IV. Les contraintes biotiques

Doit-on étudier la végétation seule, ou la végétation et le milieu ?

Cette question a souvent séparé en deux clans les botanistes, les phytogéographes, les phytosociologues et les écologues.

Au colloque de Toulouse sur les méthodes de cartographie de la végétation (CNRS, 1961), Fosberg invitait les participants à établir une distinction assez nette entre les recherches poursuivies pour la végétation elle-même et celles où la référence au milieu était sans cesse sous-jacente, sinon explicite. Cela consistait plus simplement à opposer les phytogéographes orthodoxes qui vouaient tous leurs efforts à la seule description et au recensement du tapis végétal aux autres spécialistes qui tentaient de trouver, en plus, une explication écologique de la végétation décrite.

Il faut bien reconnaître qu'une simple description de la végétation ne saurait suffire, sauf bien entendu pour ce qui concerne les territoires relativement neufs ou peu explorés. Une explication du tapis végétal doit cependant être recherchée car elle contribue à une meilleure connaissance de ses caractéristiques et justifie, entre autres, la nature des interventions que l'homme lui fait subir. C'est en particulier pour la compréhension de la dynamique végétale que cette explication est fondamentale.

Quelques phytogéographes, essentiellement les « physionomistes », tels Kuchler (1967) ont recommandé de s'en tenir le plus possible à la diagnose du couvert végétal, tel qu'il est, et ont essayé de proposer pour cela des classifications appropriées. Cependant, Kuchler lui-même a montré qu'il était très difficile d'être trop exigeant en la matière et des références, même indirectes, aux variables écologiques lui ont paru inévitables pour qualifier certaines unités.

Dans la majorité des cas, et en particulier si l'on se réfère à la dynamique de la végétation, une observation précise et déterminée des variables écologiques est nécessaire.

1. La pyramide de perception écologique des relations végétation-milieu

La végétation joue un rôle principal dans l'explication des variables du milieu, par exemple, du bilan hydrique ou thermique en un point donné alors que, le plus souvent, des données météorologiques ou hydrologiques font défaut. C'est cette aptitude à permettre, sous

certaines réserves, la généralisation des faits et des relations concernant le milieu naturel, qui est sans aucun doute l'intérêt primordial du recours au diagnostic phytoécologique réalisé à divers niveaux de perception.

Les relations entre les êtres vivants et le milieu sont un moyen commode de décrire les conditions d'organisation, de structure, de fonctionnement et d'évolution des divers systèmes écologiques recensés. Cependant, les variables biotiques et abiotiques ne doivent pas être toutes retenues avec un poids égal lors de l'analyse des situations concrètes. En effet, selon le niveau de perception écologique considéré, certaines variables, qualifiées de prépondérante, seront plus significatives, ou actives, que d'autres. Elles peuvent alors jouer un rôle discriminant dans la diagnose de l'écosphère.

Par souci de simplification, il est souhaitable de regrouper la multitude des systèmes écologiques complexes en présence, dans quelques grands ensembles, ayant une certaine cohérence, ensembles à partir desquels il sera plus commode, dans un premier temps, de décrire, puis de comprendre, les relations complexes qui caractérisent les interactions entre tous les constituants de l'écosphère. Pour certains phyto-écologues, ces grands ensembles sont (Godron *et al.*, 1968 et Long, 1973) (tab. 4) :

- 1^{er} niveau : zone écologique
- 2^{ème} niveau : région écologique
- 3^{ème} niveau : secteur écologique
- 4^{ème} niveau : station écologique
- 5^{ème} niveau : élément de station écologique

A chaque niveau de perception écologique correspondent :

- Des unités de végétation concrètes, c'est-à-dire identifiables grâce à leur structure et par leurs constituants majeurs ;
- Des variables écologiques prépondérantes, ou certains états de ces variables ;
- Des niveaux d'intégration ou d'organisation des systèmes écologiques ;
- Des échelles d'expression cartographique aptes à traduire les caractères analytiques propres à chaque niveau.

Tableau 4 - Niveaux de perception écologique

Niveaux de perception écologique	Unités de végétation concrètes	Variables écologiques prépondérantes (non exhaustif)	Niveaux d'intégration ou d'organisation	Echelles d'expression cartographique
Zone écologique	Grands types de végétation (ex. zone de forêt sclérophylles sempervirentes..)	Latitude : position relatives des masses continentales et marines et des grands massifs montagneux ; climat général	Ecosystème zonaux, biomes	1/1000000 et + petit (très petite échelle)
Région écologique	Types de végétation (ex. maquis, garrigues..)	Relief général ; climat régional ; unités géomorphologiques majeures ; homme	Ecosystèmes régionaux ; domaines de l'utilisation du sol	1/1000000, 1/500000 (petite échelle)
Secteur écologique	Grandes formations végétales (ex. divers maquis, ou garrigues...)	Positions topographiques, climats locaux ; types de formations superficielles ; conditions d'exploitation des ressources	Ecosystème au niveau du secteur ; unité de l'occupation des terres	1/250000 à 1/50000 (moyenne échelle)
Station écologique	Formations végétales en pays faiblement influencé par l'homme et/ou Formes de végétation en pays fortement influencé par l'homme	Micro-relief ; variables édaphiques ; action de l'homme et des animaux	Ecosystèmes stationnels ; unités de l'occupation des terres et des sols	1/25000, 1/10000.. et + grand (grand échelle)
Elément de station écologique	Portions de formations végétales ou de formes de végétation	Variables micro-climatiques et micro-édaphiques, variables biotiques (y compris action des micro-organismes)	Portions d'écosystèmes stationnels ; éléments d'occupation des terres et des sols	1/500-1/1 (très grande échelle)

a) Premier niveau : zone écologique

Il s'agit, dans son expression écologique, de la « zone biogéographique » des géographes. Elle met en relief le caractère de zonalité qui s'attache à la distribution des êtres vivants (et surtout de la végétation) lorsqu'on va des pôles vers l'équateur, du bord des mers à l'intérieur des terres, du piedmont des grands massifs montagneux à leur sommet. Cette zonalité est encore parfaitement perceptible dans les territoires où l'influence de l'homme est assez faible ; mais elle tend à s'estomper là où l'homme a considérablement modifié le paysage. Ainsi, la zone des forêts sclérophylles sempervirentes sous climat méditerranéen, s'étend non seulement sur le pourtour de la mer méditerranée, mais aussi dans d'autres territoires en Amérique (Californie, Chili), en Afrique (Afrique du sud), en Australie, c'est-à-dire partout où règne précisément le climat méditerranéen (Emberger, 1959).

Cette loi de zonalité écologique est utile dans la connaissance de la productivité biologique naturelle des biomes, c'est-à-dire des grands écosystèmes zonaux que sont la toundra, la taiga, la prairie, la forêt de feuillus caducifoliés, le désert, la savane, la forêt tropicale ombrophile etc..

b) Deuxième niveau : région écologique

La notion de région écologique est très proche à celle de « région de végétation » proposée par Flahault (1900). Elle peut aussi être assimilée à la région naturelle des géographes.

La région écologique peut s'étendre sur des territoires dont la superficie varie de quelques centaines de km², à plusieurs milliers de km², voire à plusieurs centaines de milliers de km². En outre, suivant le degré d'intervention de l'homme au cours de l'histoire de la mise en valeur des terres, les limites d'une même région écologique ont pu paraître changer ; elles demeurent cependant suffisamment stables dans leur ensemble pour qu'il ne soit pas nécessaire de les modifier sans cesse. Elles seront d'autant plus stables que les critères qui ont permis de les définir ont peu de chances de varier (climat général, relief général, géologie structurale et lithologie, grands processus géomorphologiques).

c) Troisième niveau : secteur écologique

A ce niveau, la perception des critères de végétation et de milieu se précise dans le détail. La végétation apparaît sous la forme des principales formations végétales qui peuvent être classées, par exemple, dans les séries de végétation ou dans les étages de végétation ;

elles peuvent aussi être classées par rapport aux domaines d'utilisation des terres (forêt, herbages, cultures) déjà distingués au niveau de la région écologique. L'accent est mis sur la structure de la végétation : répartition spatiale des volumes et des masses entre ligneux hauts, ligneux bas et herbacés.

Les variables écologiques prépondérantes au niveau du secteur écologique sont les positions topographiques (formes élémentaires du terrain), certains caractères des climats locaux (ensoleillement relatif des versants, zones d'air froid, zones des brouillards, couloirs de vent dominant...) et, surtout, les types lithologiques et les formations superficielles qui sont les substrats de la végétation. En outre, c'est au niveau du secteur écologique que se définissent le plus aisément les pratiques agricoles et d'exploitation du milieu rural qui lui confèrent son aspect de « terroir ».

d) Quatrième niveau : station écologique

Ce niveau est soit celui de la parcelle cadastrale homogène en zone fortement influencée par l'homme, soit celui de la parcelle écologique ou station, en zone plus faiblement influencée par l'homme.

La station écologique se définit comme une surface où les conditions écologiques sont homogènes et où la végétation est uniforme. Selon Godron (1971), une station est homogène lorsque chaque espèce peut y trouver des conditions de vie équivalentes d'une extrémité à l'autre et dans toute son étendue ».

L'analyse écologique à ce niveau de perception devra par conséquent introduire fréquemment les variables biotiques.

e) Cinquième niveau : élément de station écologique

Pour diverses raisons, on peut être amené à considérer seulement une portion infime de la station qui est choisie comme échantillon de référence. Cette portion de station est un élément de station écologique.

L'inventaire écologique de la végétation procède précisément de l'accumulation d'observations phyto-écologiques qui sont faites sur des éléments de station, donc sur une aire relativement faible, quelques m² à quelques centaines de m², et représentatives des conditions de toute la station ; il s'agit, en l'occurrence, de ce que les phytosociologues appellent l'aire minima de la communauté étudiée (Godron, 1971).

C'est sur des éléments de station que sont effectuées les enquêtes de production les plus précises des milieux soumis à une exploitation forestière, pastorale ou agricole.

2. Les différentes formations herbacées terrestres naturelles, semi-naturelles et leurs caractéristiques

Les travaux des botanistes et biogéographes permettent de distinguer de nombreux types de formations herbacées terrestres dans le monde. Le premier niveau de différenciation s'appuie sur l'origine climacique ou non de ces formations herbacées. Rappelons à ce propos la définition du climax : c'est l'état d'un écosystème ayant atteint un stade d'équilibre relativement stable (du moins à l'échelle humaine), conditionné par les seuls facteurs climatiques et édaphiques.

Dans une région donnée, le climax n'est généralement pas unique, et on peut souvent distinguer :

- un climax climatique en équilibre avec les seules conditions macroclimatiques,
- des climax stationnels dont l'existence est liée à l'action prédominante locale de facteurs écologiques permanents, autres que le climat ou l'homme.

Pour les formations climaciques, on distingue ensuite en fonction de la durée de vie des espèces : les formations herbacées à espèces pérennes ou annuelles, puis, selon les conditions climatiques, des formations de régions froides, tempérées subarides ou chaudes. L'effet de compensation de certaines caractéristiques climatiques par la situation topographique (en altitude ou en zone littorale) permet d'isoler, sous climat tempéré, les pelouses alpines des étages supraforestiers de montagne et les prairies halophiles.

L'importance des formations constituées surtout d'espèces annuelles sous climat méditerranéen subaride et climat subtropicale semi-aride est à noter de leur étude par télédétection ne soulève pas les mêmes problèmes que celle des formations à espèces pérennes (tab. 5).

Enfin, il faut souligner l'importance des formations herbacées non climaciques qui couvrent des surfaces très importantes, tant sous climat tempéré que tropical ou équatorial, et qui sont soit semi-naturelles (secondaires), soit complètement artificielles. Dans l'un comme dans l'autre cas elles nécessitent des soins et des modes de gestion plus au moins intensifs.

Tableau 5 - Les diverses formation herbacées

Formations herbacées climaciques		
Espèces pérennes	Régions froides subpolaires	Toundra herbacée à lichens
	Régions tempérées subarides ou à période sèche	Steppe continentale Prairie (Am. Du Nord) Pelouse steppiques Pampa (Am. Du Sud)
	Régions chaudes	Savanes primaires
	Etages supraforestiers des montagnes	Pelouse alpine
	Zones littorales des régions tempérées	Prairies halophiles
Espèces annuelles	Région méditerranéenne subaride	Steppes
	Région subtropicales semi- arides	Pseudo-steppes
Formations herbacées non climaciques		
Formations semi-naturelles secondaires	Régions tempérées humides	Prairies permanentes
	Régions tropicales, zones non arides	Savanes
Formations artificielles	Cultures d'espèces annuelles ou bisannuelles	Culture en mélange (Légumineuse- céréale) Cultures pures
	Cultures d'espèces pluriannuelles (4 à 6 ans maximum)	Prairies temporaires (Graminées pures) Prairies artificielles (Légumineuses pures Autres familles

3. La phénologie des arbres

Les variations phénologiques sont quelquefois considérées comme une stratégie d'adaptation écologique et physiologique des espèces à leur environnement. La phénologie est apparue récemment comme une priorité importante pour la recherche écologique, car c'est un très bon indicateur des conditions climatiques locales et donc des changements climatiques, étant un caractère très sensible aux variations thermiques. La phénologie est la répartition dans le temps des événements biologiques cycliques (de la flore ou de la faune) qui sont influencés par l'environnement. Le champ d'étude de la phénologie peut aussi être élargi à l'étude des facteurs qui l'influencent. Chez les arbres, deux catégories d'évènements phénologiques se produisent au cours d'une année. La première catégorie concerne la phénologie foliaire, et affecte la photosynthèse, la productivité et la survie des individus (débourrement des bourgeons au printemps, sénescence foliaire à l'automne...). La deuxième catégorie concerne la floraison et la maturation des fruits, et affecte la reproduction et la descendance de l'arbre. Ainsi, la phénologie est cruciale pour la fitness des plantes, car elle affecte leur croissance, leur survie et leur reproduction. Les études phénologiques peuvent être utilisées à différentes fins. Elles enrichissent la connaissance de l'autécologie des essences, de leurs capacités adaptatives et sont depuis peu employées afin d'étudier la réponse de la végétation au changement climatique. Pour les forestiers, ces études peuvent permettre de choisir les espèces et les provenances les mieux adaptées à un contexte climatique particulier, voire fournir des outils dans des programmes d'amélioration génétique.

La phénologie est la science ayant pour objet l'étude des phénomènes saisonniers qui marquent la vie des plantes et des animaux tout au long de l'année. Pour les plantes par exemple, il s'agit de l'apparition et de l'éclatement des bourgeons ; de la date de floraison ; des débuts et arrêts croissance des rameaux ; de l'apparition, du déploiement, du jaunissement et de la chute des feuilles ; de la formation, des changements de couleur, de la maturité et de la chute des fruits, etc. Les hommes ont, sans doute depuis la nuit des temps et pour des questions de survie lorsqu'ils étaient encore des chasseurs-cueilleurs nomades, fait la relation entre le climat et l'activité des plantes et animaux : arrivée ou départ des troupeaux d'herbivores, maturité des fruits à récolter, émergence des plantes médicinales. Mais ces relations ne sont pas toujours simples ni fiables sur le court terme : on sait bien qu'une hirondelle ne fait pas le printemps. C'est pourquoi le besoin d'observations régulières et sur le long terme, permettant de valider ou infirmer les savoirs populaires et de mieux comprendre ces relations, a émergé précocement. Dès 1875-80, le Service de la Météorologie française,

les services forestiers et des jardins botaniques ont ainsi mis en place des réseaux nationaux de suivi phénologique destiné à fournir des indices à mettre en relation avec les données météo. Ces réseaux ont malheureusement été abandonnés au milieu du XXe siècle. Plus récemment, de nouveaux réseaux internationaux et nationaux ont été déployés dans le même objectif. En Allemagne par exemple, plus de 6000 stations d'observations sont suivies continuellement depuis 1951. En France, l'ensemble des réseaux d'observation, généralement récents (10 à 20 ans), ont été regroupés en 2006 dans un réseau scientifique et complétés par un réseau populaire, l'Observatoire des saisons (Chuine, 2005a).

Si la phénologie des plantes est clairement liée au climat (Differt, 2001 ; Lebourgeois et al., 2008), cette relation dépend de l'espèce, de sa variabilité génétique et de sa sensibilité à différents facteurs météorologiques : ainsi, certaines espèces dépendent plus de la pluie, d'autres de la température, certaines sont plus sensibles aux limites imposées par le froid en hiver ou par la chaleur au printemps. Pour une espèce donnée cette dépendance thermique peut varier en fonction de sa situation par rapport aux limites de son aire de répartition (Morin et al., 2007). La phénologie est donc un élément important de l'autécologie des espèces : elle a été à l'origine de nombreux essais d'amélioration génétique, par exemple pour sélectionner des variétés ou provenances dont la date de débourrement printanier est la plus adaptée aux probabilités de gels tardifs dans les différentes régions.

4. Débourrement et exposition aux pressions biotiques et abiotiques

La phénologie apparaît comme un caractère adaptatif permettant aux plantes de faire face à des pressions environnementales diverses, comme la sécheresse, la compétition pour les ressources, la température, ou la photopériode. Cependant, les pressions opposées liées à l'occurrence des gels tardifs au printemps et à la durée de la saison de végétation semblent être les plus contraignantes sur le timing du débourrement. En effet, les plantes doivent faire un compromis entre diminuer le risque de dégâts liés au gel sur les parties en pleine croissance et maximiser l'assimilation de carbone et la production de biomasse. La quantité de matière sèche produite par les plantes chaque année est étroitement liée à la quantité d'énergie lumineuse interceptée par le feuillage pour l'activité photosynthétique. Favoriser la photosynthèse au printemps semble donc particulièrement important, car le rayonnement solaire intercepté par les feuilles y est bien plus important qu'à l'automne. Cependant, les dégâts liés au gel diminuent la surface foliaire, affectant l'énergie et le budget carbone des arbres, ces derniers participant alors à la refoliation de l'arbre, et diminuant ainsi

potentiellement la longueur de la saison de végétation. Ainsi, il a longtemps été considéré que le timing du débourrement était le reflet d'un compromis entre ces deux pressions de sélection. Les recherches ont montré que ce compromis purement en termes de bilan carbone, la production gagnée durant la saison de végétation par un débourrement précoce et la production perdue à cause des dégâts liés au gel pouvant être traduits en gains et pertes de carbohydrates.

Cependant, après avoir longtemps été une question controversée, aujourd'hui le timing du débourrement des arbres tempérés est aussi vu comme une réponse adaptative aux interactions biotiques, mutualistes ou antagonistes. Les jeunes feuilles étant particulièrement vulnérables aux attaques d'insectes et de pathogènes, ces derniers sont de plus en plus vus comme des déterminants majeurs des processus écologiques et évolutifs. Une étude de Lobo et al. (2003) (l'une des rares à étudier simultanément des facteurs biotiques et abiotiques affectant la phénologie de l'arbre) suggère que la phénologie de la floraison de la famille Bombacaceae dans les forêts sèches néo tropicales est principalement contrainte par les pressions de sélection liées à la compétition pour les pollinisateurs, même si des facteurs abiotiques liés aux précipitations et à la teneur du sol en semblent aussi réguler le débourrement.

La contribution relative des forces biotiques et abiotiques à la phénologie peut dépendre des conditions locales, particulièrement le long de gradients environnementaux. Aux latitudes ou altitudes élevées, on s'attend à une forte sélection directionnelle due aux gels. Inversement, les ravageurs et les maladies y exercent certainement une pression plus faible, car la densité des arbres hôtes et les facteurs climatiques y sont moins favorables au développement de fortes populations d'insectes et de pathogènes qu'aux plus faibles latitudes ou altitudes. Les forces sélectives biotiques et abiotiques ont fréquemment des effets opposés sur les populations locales, car les principales contraintes physiques liées aux faibles températures agissent plutôt en amont du débourrement (contraintes liées à l'hiver), alors que les interactions avec les insectes et les pathogènes ont plutôt un effet une fois que le débourrement a eu lieu (jeunes feuilles sensibles). Ainsi, les interactions avec les pollinisateurs, les herbivores ou les pathogènes peuvent moduler voire annuler les patterns de sélection contrôlés par l'environnement physique. A ce jour, la plupart des études ont porté séparément sur la relation des facteurs biotiques ou abiotiques avec la phénologie. Il y a donc un besoin de recherches considérant les deux types de facteurs simultanément.

5. Comment faire face aux pressions

Les organismes se sont adaptés aux contraintes abiotiques et biotiques auxquels ils ont à faire face en développant différents mécanismes de survie, c'est-à-dire en modifiant des traits d'histoire de vie afin d'atténuer les effets négatifs des dégâts sur leur fitness. L'évitement par la phénologie est un élément-clé de la survie des plantes. Cependant, si un évitement total n'est pas possible ou efficace, les organismes peuvent limiter les effets délétères des événements aléatoires auxquels ils sont exposés par de la résistance (*sensu lato*). La résistance implique deux processus : la résistance *sensu stricto*, qui limite (activement) le niveau de dégât, et la tolérance, qui est la capacité de la plante à maintenir la fitness malgré les dégâts.

La tolérance aux maladies a été initialement définie dans la littérature des sciences de l'agriculture, en 1951, en tant que capacité à produire du grain en présence de la maladie. La résistance peut être induite, c'est-à-dire s'exprimant seulement en présence du facteur de stress, ou au contraire constitutive. Face aux attaques biotiques ou aux facteurs abiotiques, la plante peut se défendre par la mise en place de barrières (cuticule, poils, barrière chimique par la sécrétion de composés toxiques, renforcement des parois cellulaires et des structures tissulaires...) ou par la production de molécules de défense : antibiotiques ou pesticides naturels, expression de peptides ou protéines de défense...

La tolérance de la plante suite aux dégâts peut s'exprimer par des modifications d'allocation des ressources entre compartiments, des modifications phénologiques ou physiologiques, ou un fort taux de croissance relative. Etant donné le risque de réduction de la fitness pouvant être causé par des facteurs biotiques ou abiotiques, on pourrait s'attendre à une forte sélection pour les traits de défense qui protègent les hôtes contre les parasites par exemple, mais ceci est contrecarré par le coût élevé de la résistance pour la plante.

Des observations montrent que les arbres tardifs de la forêt de mousson indienne subissent des dommages d'insectes significativement plus élevés que les arbres plus précoces, car les insectes herbivores ont émergé avec les pluies. D'autre part, des recherches ont montré que le débourrement précoce chez l'orme représentait un mécanisme d'évitement de la graphiose de l'orme, maladie létale causée par l'agent pathogène *Ophiostoma ulmi*, permettant une asynchronie entre la période sensible de l'hôte et la période d'infection naturelle par les vecteurs de cette maladie (scolytes). D'autre part, la variation phénologique au sein d'une population peut être une stratégie de défense face aux herbivores. Un fort

niveau de variations phénologiques dans la production foliaire au niveau de la population peut limiter la colonisation des arbres voisins par la dispersion des larves d'insectes. Inversement, une émergence des feuilles simultanée au sein de la population peut être une stratégie de défense si la production de biomasse foliaire dépasse la capacité de consommation des insectes herbivore. Cependant, les mécanismes de résistance et de tolérance jouent généralement un rôle essentiel dans l'adaptation des plantes aux contraintes biotiques. En effet, une grande différence entre les contraintes abiotiques et biotiques est que les agents biotiques peuvent s'adapter aux traits de l'hôte impliqués dans les interactions, tels que la phénologie.

La phénologie des arbres étant sous contrôle génétique et répétée d'une année sur l'autre (dans la limite des conditions météorologiques et de la plasticité phénotypique), les espèces d'herbivore peuvent et ont besoin pour survivre de se synchroniser avec la phénologie de l'hôte, entre et au sein des différentes populations. Ce processus est appelé la formation de dème adaptatif. La relation du parasite avec son hôte peut ainsi être analysée à travers le concept de filtre d'association : dans tout système formé par deux organismes aux génomes différents, la sélection naturelle tend à maximiser indépendamment leur fitness. Il existe deux types de filtres dans le système hôte / parasite : le filtre de rencontre et le filtre de compatibilité. Les parasites tendent à ouvrir les filtres (sélection de gènes pour « rencontrer » ou « survivre ») alors que les hôtes tendent à fermer les filtres (sélection de gènes pour « éviter » ou « tuer »). Les deux « courses aux armements » ne sont pas indépendantes : à la sélection de gènes pour « rencontrer » dans une population de parasites, une population d'hôtes peut répondre par la sélection de gènes pour « tuer ».

Chapitre V. Méthodes et outils de la géomatique au service de l'analyse et la gestion des espaces végétalisés urbain.

1. Introduction à la géomatique

Le mot « géomatique » est un néologisme issu de la contraction des termes « géographie » et « informatique ». Ce néologisme a été proposé, dans les années 1960 par Bernard Dubuisson. En effet, Bernard Dubuisson considérait que sa profession se renouvelait grâce à l'informatique. Il eut alors l'idée de mettre en avant le rôle croissant de l'informatique en géographie par la création de ce néologisme. C'est tout d'abord au Québec que le terme de « géomatique » va se développer. Désormais, ce néologisme est utilisé dans le monde entier. Plus précisément, la géomatique regroupe l'ensemble des outils et des méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques. Par conséquent, la géomatique regroupe au moins trois activités distinctes : la collecte des données géographiques, le traitement de ces données et la diffusion de celles-ci. Les outils informatiques apparaissent indispensables à ces trois activités. La géomatique est donc bien la discipline où la géographie (les données géographiques) et l'informatique sont indissociables. Dans les faits, la géomatique est une science qui permet d'appréhender des phénomènes naturels ou anthropiques (liés à l'activité humaine) en manipulant des informations numériques dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Aujourd'hui, la géomatique se reprend sur le web par le biais notamment du « WebMapping ».

2. L'information géographique

Au préalable, il est important de bien préciser ce qu'est l'information géographique. L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel ou imaginaire, présent, passé ou futur, localisé dans l'espace à un moment donné (quelles qu'en soient la dimension et l'échelle de représentation). Il s'agit d'un type d'information très répandu, décrivant des objets, phénomènes, êtres vivants ou sociétés, dès lors qu'ils sont reliés à un territoire. Les deux principales composantes de l'information géographique sont :

- l'information relative à un objet décrit par sa nature, son aspect : c'est le niveau sémantique. L'ensemble des attributs de l'objet forme ses attributs (comme par exemple : le numéro d'une parcelle cadastrale, le nom d'une route, le nom d'une rivière, le nombre d'habitants d'une commune...);

▪ la forme et la localisation de l'objet sur la surface terrestre, exprimés dans un système de coordonnées explicite : c'est le niveau géométrique. Un système de coordonnées peut être valable sur tout ou partie de la surface terrestre ou autre (comme par exemple le système géodésique mondial WGS 84). On peut aussi définir un système de « coordonnées relatives » par rapport à un point d'origine quelconque, comme c'est souvent le cas pour les relevés topographiques.

Il est possible d'associer à ces deux composantes une troisième composante qui concerne les relations d'un objet avec les autres. C'est le niveau topologique (comme par exemple : la contiguïté entre deux communes, l'inclusion d'une parcelle dans une commune, l'adjacence entre les différents nœuds des tronçons constituant des parcelles cadastrales...). Pour représenter de l'information géographique, il existe trois formes de représentation (fig. 18). Premièrement, l'information géographique peut être représentée sur une image, où l'on peut voir une multitude d'objets (comme par exemple une photo aérienne ou une image satellite) sans connaître directement leurs attributs (on ne voit pas le nom de la route, ni le nombre d'habitants des communes). Deuxièmement, l'information géographique se prête particulièrement bien à la représentation sur une carte, où l'on situe les objets et les phénomènes dans un repère général et homogène. Enfin, l'information géographique peut être représentée par un texte ou un fichier de données littérales, où elle est représentée par des données numériques et par une adresse (comme par exemple les fichiers des abonnés à l'ADSL qui contiennent nom, prénom, numéro de téléphone, adresse postale...). Ces trois formes de représentation sont distinctes mais complémentaires :

- l'image comporte surtout des données géométriques (forme, dimensions, localisation).
- le texte ou le fichier littéral comporte surtout des données sémantiques (attributs).
- la carte comporte des données à la fois sémantiques et géométriques.

D'un point de vue numérique, il existe deux modes de représentation (fig. 19). Le mode maillé (ou raster en anglais), où la surface de la carte ou de l'image est décrite selon un balayage ligne par ligne. Chaque ligne est composée de pixels. C'est mathématiquement ni plus ni moins qu'une matrice (dans le langage usuel un tableau de

chiffres). Le deuxième mode de représentation est le mode vecteur, où chaque objet représenté sur la carte est décrit par un ou des points successifs composant sa forme.

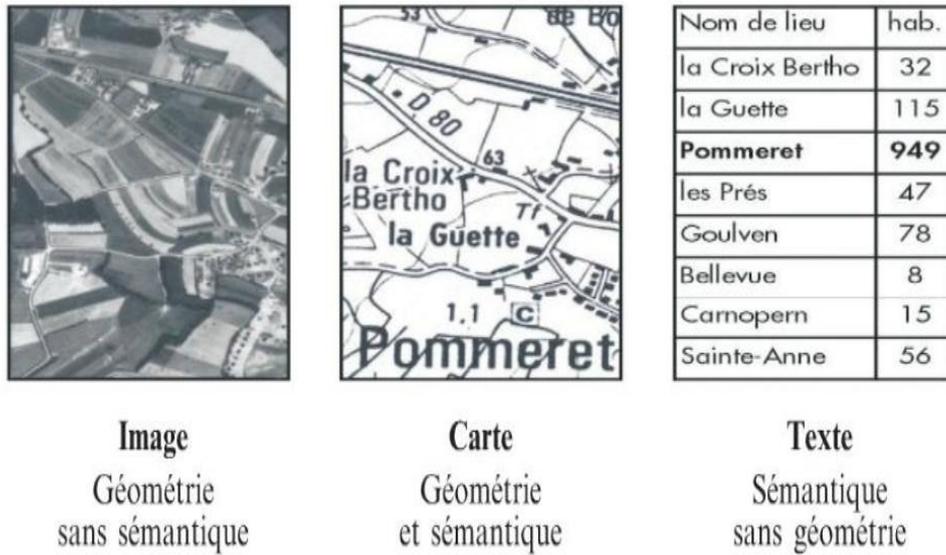


Figure 18 - Les trois modes de représentation de l'information géographique (Denègre et Salgé, 2004)

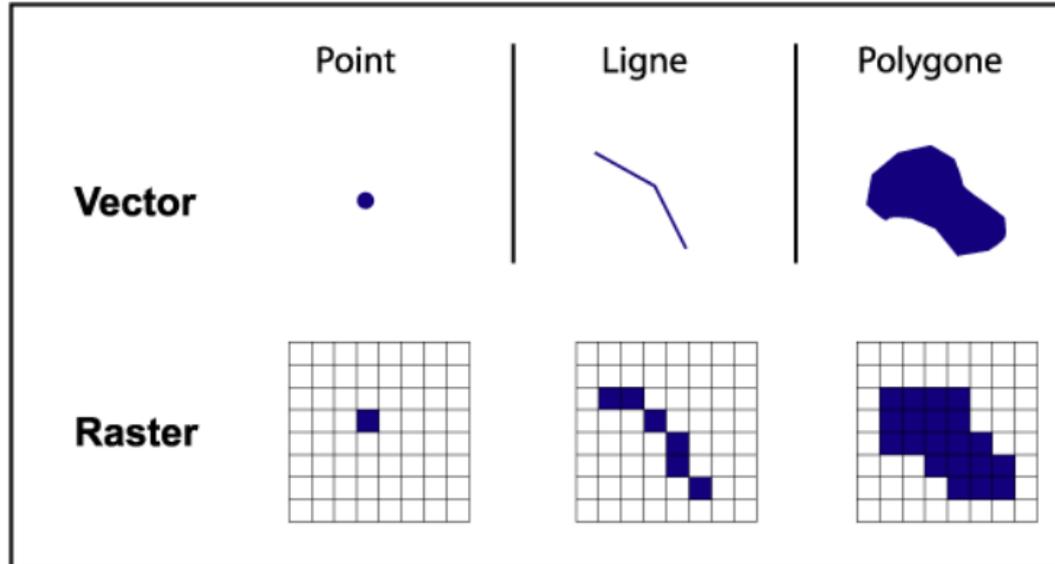


Figure 19 - L'information géographique en mode numérique et les formes d'objets

Figure 19. L'information géographique en mode numérique et les formes d'objets

3. Les fondements de la localisation

Les outils SIG proposent de nombreux systèmes de coordonnées et permettent aisément de passer d'un système à un autre. Tout va alors pour le mieux dans le meilleur des mondes lorsqu'on a un bon SIG et les bons systèmes de coordonnées.

La définition du mode de localisation et de la projection cartographique est un des deux composants indispensables à toute information géographique. C'est ce qui constitue son originalité. Les fondements en la matière sont indispensables à tout géomaticien et peuvent, d'un point de vue pratique, éviter de perdre beaucoup de temps.

Tout d'abord, il est important de préciser que la localisation des objets sur la surface de la terre peut être exprimée de deux manières : selon un mode textuel ou selon le mode mathématique.

Le mode textuel est le nom de l'endroit où l'on se trouve. L'adresse postale est l'exemple le plus répandu. Il existe aussi d'autres adresses de localisation : le numéro de la parcelle cadastrale, le numéro de commune INSEE... Ces systèmes de localisation sont très utilisés dans la vie quotidienne et l'administration (impôts, abonnements à l'électricité et au téléphone, etc ...), mais ils ne se prêtent pas aisément à une représentation directe sur une carte.

Le mode mathématique correspond aux coordonnées dans un système de référence donné.

Ce sont les navigateurs qui, les premiers, ont utilisé des coordonnées (latitude et longitude) mesurées à partir des étoiles, afin de caractériser leur position sur les océans. Ces coordonnées sont obtenues à partir d'un référentiel choisi arbitrairement. Ainsi, la localisation d'un objet n'a rien d'absolu. Par exemple, le choix du méridien d'origine et du nombre de méridiens résulte d'une convention. Dans la pratique, le géomaticien préférera bien souvent manipuler les localisations dans le mode mathématique. En effet, ce mode est plus efficace pour effectuer de l'analyse spatiale ou pour positionner automatiquement des objets géographiques sur une carte ou sur un écran d'ordinateur.

4. La collecte : topométrie, télédétection et photogrammétrie

Pour disposer et manipuler de l'information géographique, faut-il encore l'avoir collectée.

Pour cela, il existe différentes méthodes. On peut les classer au sein de deux grandes familles : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

Les méthodes qualifiées de directes sont fondées uniquement sur des mesures effectuées sur le terrain. Au moins une personne va donc se déplacer sur le terrain avec les outils de son choix (tachéomètre, niveau, GPS) pour effectuer le relevé d'une zone donnée.

Néanmoins, il n'est pas toujours nécessaire de réaliser des campagnes de terrain longues et coûteuses pour obtenir des informations géométriques et attributaires sur des objets. On peut avoir recours aux méthodes indirectes qui collectent de l'information sans qu'il n'y ait de personne sur le terrain (télédétection, photogrammétrie).

4.1. La topométrie

La topographie est la science qui permet la mesure puis la représentation sur un plan ou une carte des formes et des détails visibles sur le terrain. La topométrie se concentre sur la partie concernant les mesures. Son objectif est de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée. Pour cela, il existe différentes méthodes. Selon l'échelle à laquelle on travaille, la précision que l'on veut obtenir, l'investissement que l'on est prêt à réaliser, l'objectif qu'on s'est fixé, une méthode se révélera plus pertinente qu'une autre.

La topométrie directe est la méthode « classique » et « historique » de collecte de l'information géographique. C'est pourquoi, lorsque l'on traite de la topométrie, il est possible de faire abstraction des méthodes indirectes.

Le nivellement (fig. 19) est une opération qui a pour objectif de déterminer, de manière plus ou moins précise, l'altitude de points situés à la surface terrestre. On distingue deux types de nivellement : le nivellement direct (géométrique) et le nivellement indirect (géodésique). Les méthodes de nivellement direct constituent l'arsenal le plus efficace pour déterminer l'altitude de points particuliers. Pour le nivellement direct, la précision dépend du matériel employé mais aussi et surtout des méthodes (nivellement par rayonnement, nivellement d'itinéraire par cheminement...). Le point commun des méthodes directes de nivellement

réside dans l'utilisation d'un niveau et d'une mire. Le niveau et les mires sont placés à la verticale et la lunette du niveau effectue une « visée » horizontale. La lecture (ou l'enregistrement) des valeurs de la mire A et de la mire B permet de déterminer la dénivelée par différence des deux lectures.

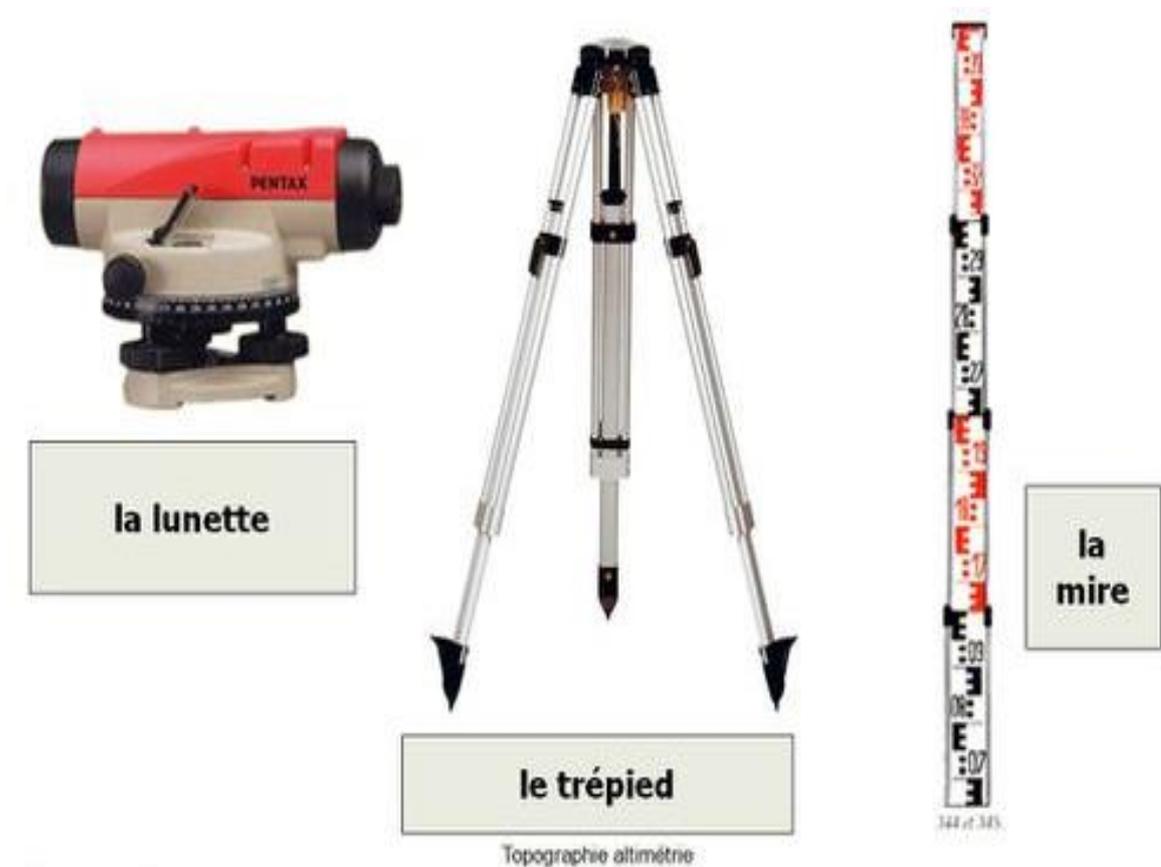


Figure 20 - Les instruments utilisés pour exécuter un nivellement

Parallèlement à ces méthodes directes traditionnelles, le recours aux outils GPS s'est accentué. Désormais, il est tout à fait pertinent d'utiliser des outils GPS (fig. 20) pour localiser de l'information géographique. Le GPS (*Global Positioning System*) est à l'origine un système militaire américain, conçu dans les années 1970. Le GPS est un système spatial de radio positionnement et de transfert de temps. Il fournit, à un nombre illimité d'utilisateurs à travers le monde, dans un système global et unique, quelles que soient les conditions météorologiques, une information de position, de vitesse et de temps. Plus précisément, l'exploitation civile du système GPS doit être considérée du point de vue de ses trois composantes essentielles : le segment spatial, le segment de contrôle et les utilisateurs. Le segment spatial comprend tous les éléments orbitaux du dispositif de positionnement : les plates-formes, le signal GPS et le message de navigation. Le segment de contrôle envoie

quant à lui des informations permettant d'assurer la précision du système GPS (calcul d'orbite précise, condition météorologique...).



Figure 21 - Système de positionnement global (GPS) Garmin

4.2. La télédétection

La télédétection désigne, dans son acception la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement (fig. 21). On fait souvent appel à des instruments tels que les appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres pour capter l'information embarqués à bord d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau.



Figure 22 - Instrument de mesure en télédétection (Satellite)

Le principe fondamental de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme.

Ainsi, la télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible et un vecteur. En géomatique, la cible est la portion de la surface terrestre observée par le vecteur (l'objectif photo, le radar). Pour les observations satellites, la surface de la cible peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres. La source d'énergie est l'élément qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique (le soleil émet des flux de photons). Le vecteur récupère les informations (bien souvent il récupère l'énergie solaire) réfléchies par la cible. Plus précisément, le vecteur peut être décomposé entre d'une part les capteurs (appareil photo, caméra thermique...) et d'autre part les porteurs (satellite, avion, drone...) (fig. 22).

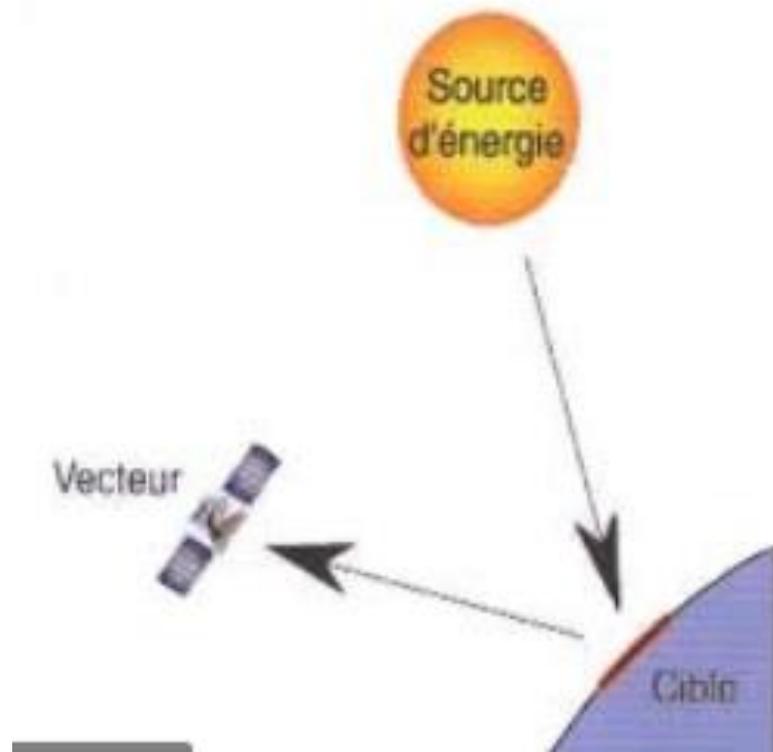


Figure 23 - Les éléments de la télédétection

4.3. Les systèmes d'information géographique

Denègre et Salgé résumant parfaitement la vocation principale des Systèmes d'Information Géographique : « rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique, relatives à la fois à la Terre et à l'homme, à leurs interactions et à leurs évolutions respectives, quels que soient les domaines concernés : physiques, sociaux, économiques, écologiques, culturels, etc. Ce rassemblement permet d'élaborer les synthèses indispensables à la prise de décision dans tous ces domaines, aussi bien dans les situations de crise que dans les évolutions à long terme ».

A l'instar de tout système d'information, un SIG est, par définition, un système permettant de communiquer et de traiter l'information, en l'occurrence de l'information géographique, c'est-à-dire, au sens étymologique du terme, de l'information décrivant le monde terrestre.

Dans ce cadre, le but ultime d'un SIG est l'aide à la décision, appuyée sur des connaissances géographiques et des moyens de traitement, de représentation et de communication de celles-ci. Dans le faits, le SIG est donc présent dans l'ensemble des phases consistant à acquérir, représenter, analyser et diffuser de l'information géographique. Ainsi,

au cours des années 1980, la notion de Système d'Information Géographique s'est imposée comme l'objectif général de la géomatique, englobant l'ensemble des éléments, relations et fonctions liés à l'exploitation des connaissances sur l'espace terrestre. Un SIG possède alors deux originalités essentielles :

1) la capacité de gérer et de traiter les relations spatiales entre objets ou phénomènes dans l'espace terrestre, ce qui implique des fonctions d'analyse spatiale (non courantes dans les traitements d'information classiques) et de synthèse pour l'aide à la décision ;

2) la représentation visuelle de cet espace sous la forme d'une carte ou d'un plan, ce qui implique des fonctions de conception et de production cartographiques, constituant en elles-mêmes un langage différent du langage ordinaire (textuel ou numérique).

Les SIG possèdent de nombreux domaines d'application : l'aménagement du territoire ; la gestion du trafic ; la gestion des réseaux techniques ; l'agriculture ; la protection de l'environnement ; la gestion des risques technologiques et naturels...

Les bases de données géographiques

Les bases de données géographiques sont les outils opérationnels qui permettent d'organiser et de gérer l'information géographique sous forme numérique. Ce sont des ensembles structurés de fichiers décrivant les objets et les phénomènes localisés sur la Terre (avec leurs attributs et leurs relations nécessaires à la modélisation de l'espace géographique). Ces ensembles sont munis d'un système de gestion permettant de les tenir à jour, de les archiver et de les diffuser. Les bases de données géographiques constituent le socle sur lequel s'appuient les Systèmes d'Information Géographique qui analysent et exploitent les données pour en tirer des informations utiles à la décision.

Plus précisément, une base de données « *database* » est un conteneur informatique permettant de stocker l'intégralité des informations en rapport avec une activité. Une base de données permet de stocker et de retrouver un ensemble d'informations de plusieurs natures ainsi que les liens qui existent entre les différentes informations. Le dispositif comporte un système de gestion de base de données (SGBD), c'est-à-dire un logiciel moteur qui manipule la base de données et dirige l'accès à son contenu. De tels dispositifs

comportent également des logiciels applicatifs et un ensemble de règles relatives à l'accès et à l'utilisation des informations.

Les bases de données s'organisent à partir d'un modèle conceptuel de données qui définit les entités (les tables), les propriétés (les variables) des entités et les relations existant entre les entités. Le schéma conceptuel de données définit ainsi les classes d'objets, les attributs, les relations de construction et les relations de composition de l'application considérée. Le modèle conceptuel de données décrit la sémantique, c'est à dire le sens attaché à ces données et non l'utilisation qui peut en être faite. Il peut aussi spécifier la nature géographique des données (points, lignes, surfaces). Pour établir un modèle conceptuel de données, il est nécessaire de recenser et de nommer l'ensemble des données du domaine étudié : c'est-à-dire de recenser les entités. Chaque entité est alors caractérisée par ses propriétés. Par exemple, un territoire est caractérisé par un identifiant, un nom, une géométrie de type surfacique et un système de coordonnées... Une relation (ou une association) est un lien existant entre deux entités. Chaque relation possède un nom (souvent un verbe) qui caractérise le type de relation existant entre les entités. De plus, pour chaque relation, il est nécessaire d'établir les cardinalités, c'est-à-dire de déterminer le nombre de participation d'une entité à une relation.

5. Identification des groupements végétaux

Un groupement végétal (prairial ou autre) rassemble des espèces qui vivent dans un milieu donnée. Ces espèces sont strictement liées à des milieux bien définis, d'autres peuvent occuper des milieux assez différents. La phytosociologie classe les groupes d'espèces qui cohabitent ou au contraire s'excluent mutuellement. Il est donc très intéressant de pouvoir identifier par la télédétection des groupements végétaux. En effet, si l'on admet que les groupements végétaux sont de bons intégrateurs des conditions de milieu, on acquiert ainsi une information sur :

- les différents types de couverts végétaux ;
- les conditions du milieu ;
- les modes d'exploitation ou l'usage qu'en fait l'homme.

Des groupements végétaux seront identifiables par télédétection s'ils présentent, à une date donnée, un comportement spectral particulier, permettant de les séparer d'autres

groupements. Ce comportement spectral sera sous la dépendance des stades phénologiques et des états physiologiques des espèces les plus abondantes dans le groupement.

6. Suivi de l'environnement par la télédétection

Comme cela fut suggéré par Thomas et *al.* (1994), la surveillance est l'une des méthodes essentielles pour la recherche en l'environnement. En fait, le suivi doit observer la dynamique de l'environnement, discerner et mesurer ses changements, en intégrant les dimensions spatiale et temporelle de sa dégradation. Cependant, Lambin (1997) a précisé que la mesure de la dégradation du sol est particulièrement difficile parce qu'il y a une forte interaction entre la variabilité normale ou aléatoire des précipitations et les changements anthropogènes de couverture végétale. Par conséquent, la surveillance constitue une recherche approfondie dans laquelle n'importe quel facteur menant au malentendu doit être pris en considération. Le relevé de terrain effectué à différentes dates est la méthode de suivi la plus directe, par laquelle nous pouvons directement observer et tracer dynamiquement la situation de l'environnement dans le secteur concerné. L'imperfection de cette méthode se situe dans sa limite à obtenir des données régionales et globales concernant les modes d'occupation et leurs changements pendant une période donnée, avec un soutien financier limité. Les techniques de télédétection surmontent cette imperfection grâce aux divers capteurs qui peuvent être installés sur différentes plates-formes, tels que les satellites artificiels ou les avions, et peuvent régulièrement balayer la surface de la terre ou le secteur intéressé et acquérir multi-temporellement des informations dynamiques sur l'environnement. Cependant, l'interprétation des données télédétectées peut ponctuellement rencontrer une difficulté lorsque ces données sont utilisées pour analyser un changement subtil. Par conséquent, la combinaison du relevé de terrain (avec le GPS) et de la télédétection semble être une méthode plus adaptée pour accomplir un suivi. Dès 1963, Verstappen a commencé à employer les photographies aériennes et le relevé de terrain pour mesurer le changement côtier. C'est probablement la première détection de changement de l'environnement par la télédétection. Depuis lors, le suivi de changement est devenu une des applications principales des données spatiales.

Plusieurs auteurs ont entrepris ce genre d'études et nombre de documents référentiels pourraient être recensés concernant ce sujet. Ces chercheurs se sont servis des données satellitaires pour distinguer et surveiller divers genres de changements environnementaux comme le développement urbain ou de frange urbaine, le changement de forêt, le déboisement, la modification côtière, les changements d'utilisation du sol en agriculture, etc.

Leurs recherches sont à la base de la création d'un algorithme efficace pour le suivi de changement.

6.1. Transformation multispectrale

La transformation d'image est, en fait, une conversion de l'information spectrale par certains calculs, ou algorithmes mathématiques, visant à mettre en évidence l'information d'utilisation du sol concerné (par exemple, la végétation, le sol nu), en opérant à une réduction des impacts atmosphériques et des volumes de données (Kauth et *al.*, 1976 ; Richards, 1984 et 1986). Les transformations fréquemment utilisées sont ainsi énumérées :

Indices de végétation

Il y a plusieurs manipulations multispectrales pour appréhender et mettre en œuvre les informations de couverture de végétation, par exemple :

- Indice de végétation en ratio = (NIR/R) (Jordan, 1969 ; Knipling, 1970) ;
- NDVI (Normalized Difference of Vegetation Index) = $(NIR-R)/(NIR+R)$ (Rouse et *al.*, 1974 ; Tucker 1979) ;
- TVI (Transformed vegetation index) = $(NDVI+ 0,5)^{1/2}$ (Deering et *al.*, 1975) ;
- PVI (Perpendicular vegetation index) = $a1(NIR) - a2(R) + \text{constante}$ (Richardson et *al.*, 1977) ;

Ces index ont été suggérés sur la base de la spécificité des données des images satellites dont NIR correspond à la bande proche-infrarouge et R à la bande rouge. Ils sont applicables pour images Landsat MSS, Landsat TM et SPOT HRV (ER Mapper User Guider, 2000 ; Mathieu et *al.*, 1998) et pour d'autres données satellitaires. Ces indices ont été développés pour le renforcement de différence spectrale sur la base du fort pouvoir d'absorption de la végétation dans la partie rouge et du fort pouvoir de réflexion dans la partie proche-infrarouge du spectre. Ils sont corrélés, de manière significative, avec la biomasse verte de sorte qu'ils puissent être employés pour l'évaluation de la productivité de la forêt, du pâturage ou du rendement agricole (Deering et *al.*, 1975 ; Tucker et *al.*, 1975, 1979 et 1991 ; Girard et *al.* 1999 ; FAO, 2000). De plus, Tucker et *al.* (1991) ont rapporté que le NDVI est bien associé aux précipitations annuelles et l'ont employé pour surveiller l'expansion et la contraction du

Sahara. Ces index de végétation peuvent non seulement augmenter les différences entre les sols et la végétation mais également éliminer, dans le temps et l'espace, une variété de facteurs comme le gain et l'offset et supprimer des variations de radiance liées à l'angle, à l'aspect topographique et à l'ombre des nuages (Holben et *al.*, 1981 ; Schowengerdt, 1983 ; Lillesand et *al.*, 1994). Cependant, ils sont également affectés par l'effet atmosphérique et l'angle de vue du capteur (Kaufman, 1986).

Huete (1988) a développé un index de végétation ajusté sur le sol (SAVI), dont l'équation mathématique est la suivante :

$$SAVI = (1+L) \frac{NIR-R}{NIR+R+L}$$

où, NIR et R sont les valeurs de réflectance des bandes proche-infrarouge et rouges et L un coefficient d'adaptation s'étendant de 0 à 1 :

- Pour une végétation de faible densité, L = 1,
- pour une densité de végétation intermédiaire, L = 0,5
- pour une densité de végétation plus élevée, L = 0,25.

Huete (1988) affirme que, quel que soit le coefficient d'adaptation compris entre 0.25 et 1, les influences de sol sont considérablement réduites par rapport au NDVI et au PVI. Cependant, en ce qui concerne une faible densité de végétation, la réflectance du sol augmente dans les bandes rouge et infrarouge. Pour cerner au mieux ce système de sol-végétation et réduire l'effet du sol nu au minimum, un index de végétation ajusté modifié pour le sol (MSAVI) a été développé par Qi et *al.* (1994). Sa formule est la suivante :

$$MSAVI = (NIR + 0.5) - [0.25 (2NIR + 1)^2 - 2 (NIR - R)]^{1/2}$$

Du fait que le NDVI est considérablement influencé par la dispersion et l'absorption atmosphérique (Kaufman et *al.*, 1988), Kaufman et Tanré (1992 et 1996) ont développé un index de végétation résistant à l'atmosphère (ARVI). Comparé au NDVI, la résistance à l'effet atmosphérique de l'ARVI est réalisée par un processus d'autocorrection sur la bande rouge. La différence entre les bandes rouge et bleue réduit au minimum les effets de la dispersion atmosphérique par des aérosols dans la bande rouge. Comme l'ont précisé ces auteurs, l'ARVI

a la même gamme dynamique que le NDVI mais est quatre fois moins sensible aux effets atmosphériques que le NDVI. Cet index est calculé comme suit :

$$ARVI = \frac{\{NIR - [Rouge - \gamma (Bleu - Rouge)]\}}{\{NIR + [Rouge - \gamma (Bleu - Rouge)]\}}$$

où γ est un facteur atmosphérique d'autocorrection dépendant des types d'aérosol. Kaufman et Tanré (1992) ont suggéré que ce γ soit placé à 1 puisqu'il permet un meilleur ajustement pour la plupart des applications quand les données atmosphériques sont inconnues. De cette façon, la formule présentée ci-dessus peut être simplifiée comme suit :

$$ARVI = \frac{[NIR - (2Rouge - Bleu)]}{[NIR + (2Rouge - Bleu)]}$$

ARVI a été conçu pour le capteur MODIS mais il peut également être utilisé pour les données d'autres capteurs, tels que TM, etc.

6.2. Distinction des changements

La détection de changement est le processus qui consiste à identifier des différences dans l'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à différentes dates (Singh, 1989). C'est donc une procédure essentielle pour le suivi de l'environnement. Les types de changements qui pourraient être intéressants vont des phénomènes à court terme, tels que la couverture neigeuse ou les inondations, jusqu'aux phénomènes à long terme, tels que le développement de la frange urbaine ou la désertification. Dans le meilleur des cas, les procédures de détection de changement ne devraient intégrer que des données acquises par un même capteur (ou un capteur similaire) et être enregistrées en utilisant la même résolution spatiale, le même angle de vue, les mêmes bandes spectrales et le même horaire. Des dates anniversaires sont souvent employées pour minimiser l'influence de l'angle solaire et de la différence saisonnière (Lillesand et al., 1994). Depuis les années 70, un certain nombre d'algorithmes ont été développés et employés pour la détection des changements, incluant la détection de changement de delta, le differencing d'image, la comparaison de post-classification, le ratioing, et l'analyse de vecteur de changement, etc. (Lunetta, 1999 et Yuan et al., 1999).

Détection de changement de delta

Cette technique, suggérée à l'origine par Anuta (1973), se base sur la classification d'un ensemble de données (dataset) composé de données multispectrales obtenues à dates

différentes. Une soustraction (delta) combine deux groupes de données (datasets) de n-canaux obtenus à dates différentes et produit un nouvel ensemble de données (dataset) multispectrales de delta ayant n-canaux.

Cette méthode n'exige qu'une soustraction simple suivie d'une classification de changement multispectral au lieu de souligner des changements de classification multispectrale. Comme Weismiller et *al.* (1977) l'ont souligné, cette méthode est peut être trop simple pour traiter avec précision tous les facteurs impliqués dans la détection du changement de lieu. Beaucoup d'informations peuvent être négligées lors de la soustraction. L'image créée par les données de delta peut être tout à fait utile mais le changement d'image est limité à une l'évaluation qualitative. Le point le plus important de cette méthode tient au fait qu'elle intègre le concept de "soustraction" (differencing).

Differencing d'image

Probablement dérivée de la technique de détection de delta, la technique dite de différenciation ou de differencing d'image a été présentée pour la première fois par Rifman (1975) pour la détection de changement puis couramment utilisée, par la suite, pour la discrimination de changement d'utilisation du sol. C'est une approche commune employée pour la détection de changement, qui implique une soustraction des images d'une date à celles d'une autre, pixel par pixel. Les valeurs de pixel de soustraction (DCs) peuvent s'étendre de -255 à + 255. Les résultats sont normalement transformés en valeur positive par l'adjonction d'une constante, C. L'opération s'exprime mathématiquement comme suit (Jensen et *al.*, 1982 ; Nelson, 1983) :

$$\Delta X_{ijk} = X(t_1)_{ijk} - X(t_2)_{ijk} + C$$

où

i — numéro de ligne,

j — numéro de colonne,

k — numéro de bande,

ΔX — valeur de pixel après la soustraction

$X(t_1)$ — valeur de pixel à temps 1

$X(t_2)$ — valeur de pixel à temps 2

C — constante, par exemple 255

Les recherches effectuées par Toll et *al.* (1980) et Ingram et *al.* (1981) prouvent que la méthode du differencing d'image occasionne moins d'erreurs de détection de changement que les autres approches. L'élément délicat de cette méthode est le choix des seuils entre pixels de changement et pixels de non-changement, comme cela fut démontré dans l'histogramme (Jensen et *al.*, 1982). L'analyste peut déterminer les seuils en utilisant les données statistiques de l'image soustraite ou sa propre connaissance empirique. Mais quelle que soit la procédure, le choix des seuils nécessite de nombreux essais. Les données statistiques de l'image soustraite sont disponibles après avoir exécuté la fonction d'histogramme ou la fonction de statistique dans le système de traitement d'image comme PCI, ER Mapper, ENVI, etc. Ainsi la valeur moyenne (M), écart type (variance,) sont connus pour l'image soustraite (fig. 23).

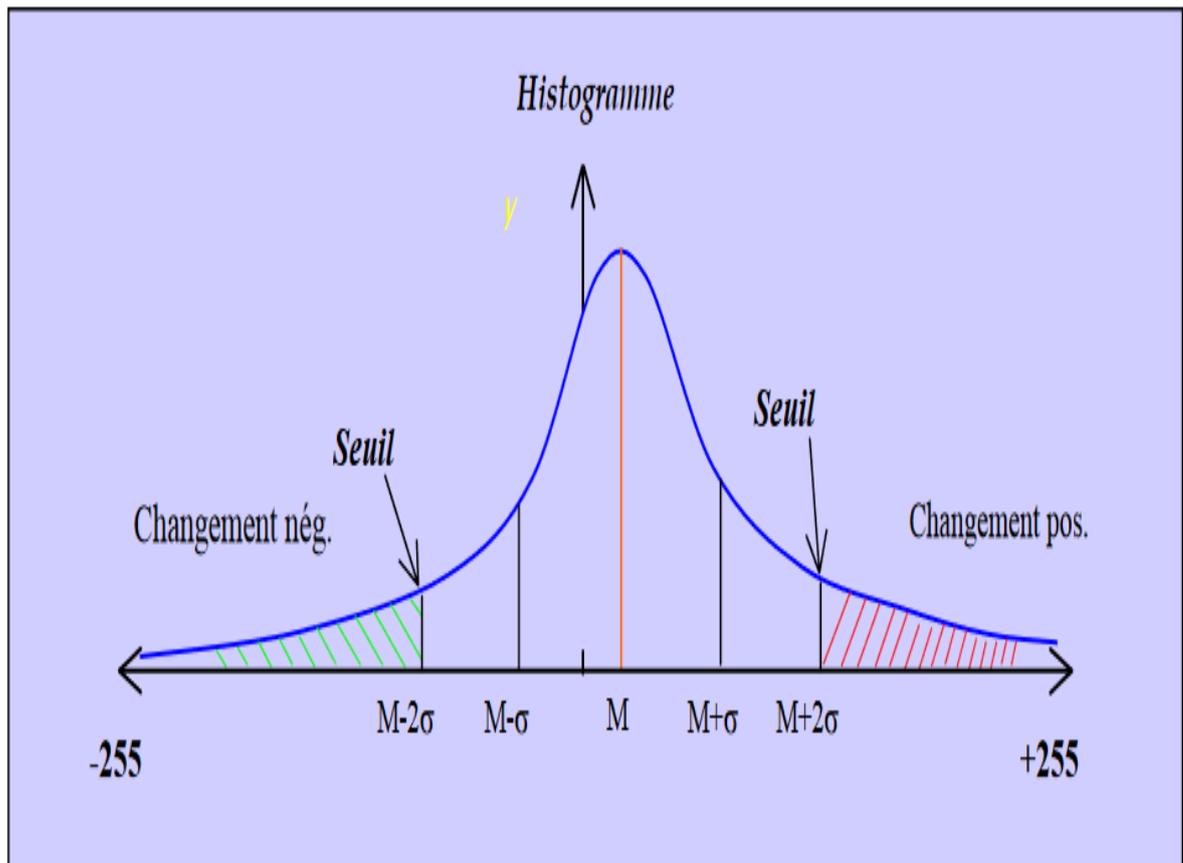


Figure 24 - Etablissement des seuils pour déterminer les changements

Analyse de vecteur de changement

Le vecteur décrivant la direction et l'importance de changement entre la première et la deuxième date est le vecteur spectral de changement (Lambin et *al.*, 1994). La direction du vecteur contient des informations sur le type du changement (par exemple coupe de bois ou repousse (regroth)). C'est, en fait, une extension conceptuelle du differencing d'image, dans laquelle un seuil concernant la grandeur est établi comme base pour déterminer les secteurs de changement (Lillesand et Kierfer, 1994). Cohen et *al.* (1999) ont utilisé cette méthode pour détecter le changement de forêt de conifères en se basant sur une transformation de Kauth-Thomas à partir des données de Landsat TM et obtenu qui affirmaient que la composante Humidité est la plus importante pour différencier les classes de forêts de conifères (fig. 24).

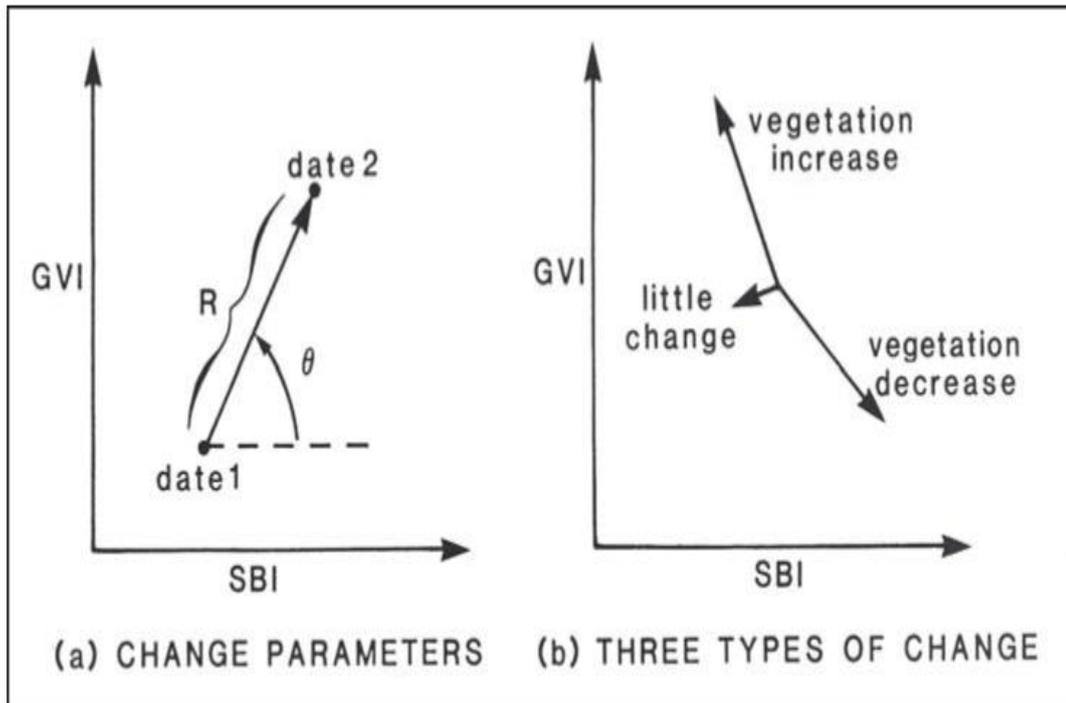


Figure 25 - Analyse de vecteur de changement (d'après Schowengerdt, 1983)

Lambin et *al.* (1994) ont étendu le vecteur de changement spectral à l'espace multitemporel et ont mis en application une détection de changement par l'observation en série chronologique d'un indicateur d'occupation du sol (par exemple, NDVI) mesuré pour les différentes années. La trajectoire de temps du vecteur d'indicateur contient l'information détaillée et permet de distinguer les changements brusques et subtils d'occupation du sol.

Chapitre VI. Synthèse des disciplines utilisées pour résoudre des problématiques écologiques (pédologie, bioclimatologie, écologie végétale, botanique, statistiques, SIG et GPS)

Tout ce qui se passe sur cette Terre – que ce soient des phénomènes naturels ou des activités humaines – a des répercussions sur l'environnement. L'impact de ces phénomènes ou activités peut être extrêmement important, touchant un ou plusieurs milieux: le sol, l'eau, l'air, les ressources naturelles (réserves) ou la biosphère (plantes, animaux, êtres humains). Prenons l'exemple d'une activité telle que «faire des grillades» dans le diagramme systémique des impacts avec les flux (entrants et sortants) de ressources et énergies utilisées.

1. Sol

Le sol c'est la dégradation de la roche mère. Elle se compose des plusieurs couches horizontales nommés horizons. Ces couches ne sont pas toutes visitées par des racines, s'il s'agit d'un sol cultivé au niveau où s'arrêtent les nutriments, les instruments de labour le plus profond et les micro-organismes. L'horizon A est l'horizon proche de la surface est en générale riche en matière organique, tandis que l'horizon C est surtout minérale et possède une composition très voisine de la roche initiale. Un sol évolué et associé à un couvert végétal dense, qui l'entretien par recyclage de la matière organique. A ce stade, le sol comporte un horizon B qui correspond à l'accumulation des niveaux lessivés (entraînement mécanique depuis la surface). Le sol constitue le support pédologique de la plante et sa base de vie et de production.

Les premiers contacts avec une des principales méthodes d'étude du sol, l'observation des courbes de profil du sol ; s'il ne vous procure pas pour l'instant que des réponses sommaires ; nous amènes cependant à comprendre les définitions scientifiques du sol :

L'agrologie : Etymologiquement (Agro= champ cultivé et logos=discours, traité). L'agrologie s'intéresse avant tout à des couches cultivables où peuvent s'enfoncé les instruments de culture ; cette couche (la terre arable, cultivable) est d'environ 30Cm de profondeur.

La définition agrologique du sol reflète de la roche mère qui est une couche superficielle de l'écorce terrestre qui grâce à sa structure meuble d'assurer un développement normal des végétaux cultivés et non cultivés.

• **La pédologie** : est une science moderne des sols, vient alors compléter l'agrologie, en donnant un sens à la succession des couches du sol, en expliquant leurs origines et en précisant leurs influences sur la fertilité du sol.

La pédologie retrace l'histoire du sol et prévoit son avenir. Si l'agrologie considère un peu le sol comme point de vue tout différents, pour les scientifiques, le sol est une formation naturelle qui est de support à la vie végétale de sol agricole, celui qui est cultivé par l'homme, situé au carrefour des sciences des terres et des sciences de la vie. Elle étudie les sols dans leurs globalités, que ce soit leur formation et leur évolution (pédogenèse), leurs propriétés physiques morphologiques, chimiques, biologiques et minéralogiques ; ainsi que leur répartition à la surface du globe. Les études pédologiques permettent ainsi de classer les sols, notamment en fonction de leur texture. Par ailleurs, les études concernant l'interaction de sols avec le climat, la flore et la faune sont fondamentales pour la préservation de l'environnement naturel.

• **Pédogèse** : correspond à une couche superficielle de la terre obtenue par la désagrégation de la roche mère qui s'aménise progressivement et qui constitue un milieu favorable pour la vie des animaux (micro-organismes, virus et bactéries) et des végétaux qui participent à son enrichissement vital (Autotrophes).

• **Pédogenèse** : correspond à une science de la terre qui incluse l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologique liés à la formation, transformation du sol dès son existence des sols et à leur évolution.

• **Pédoécoclimatique** : correspond à un terme complexe constitué des préfixes ayant trait aux bases de l'agriculture :

- Pédologie : préfixe lié au sol ;

- Eco : préfixe lié à la science qui étudie les conditions d'existence des êtres vivants animaux et végétaux en fonction du milieu naturel où ils vivent ;

- Climatologie : c'est un adjectif relatif au climat.

Bref : Pédoécoclimatologie correspond aux études des conditions ayant trait au sol, à l'écologie et au climat pour une rentabilité de l'agriculture et une adaptation des plantes (Cultures).

2. La climatologie

Face aux nombreux problèmes environnementaux, de plus en plus récurrents dans le monde, la climatologie joue un rôle de premier plan dans l'univers des sciences de nos jours. Le réchauffement de la planète et les changements climatiques deviennent des sujets préoccupants. A travers le monde, on observe une récurrence des phénomènes météorologiques extrêmes: ici et là, ce sont des cyclones, sécheresses, inondations, etc. En même temps que ce fléau engendre une hausse du niveau des océans, ils entraînent par ailleurs une rareté sans précédente des eaux douces à la surface de la terre. Pour une meilleure compréhension du phénomène, il faut des disciplines transversales avec la Climatologie et la bioclimatologie en tête de file. La Climatologie devient par conséquent une science incontournable de nos jours.

Le climat, pourquoi ?

a. Exigences de la plante:

La plante doit absorber des éléments du milieu extérieur (nutrition):

-Eau;

-O₂ et CO₂ de l'air;

-Éléments minéraux (dans le cas des végétaux autotrophes, c'est-à-dire toutes les cultures pratiquées sauf les champignons).

Elle a besoin également de lumière, source d'énergie pour la photosynthèse Enfin, elle ne peut se développer et croître que des certaines conditions, par exemple:

-Dans certaines limites de températures;

-Avec certaines alternances de lumière et d'obscurité;

-Dans une certaine gamme de Ph du sol.

Toutes ces conditions influent sur les fonctions physiologiques.

Parmi ces éléments et ces conditions, certaines sont liées au sol, comme les éléments chimiques par exemple. D'autres sont présents dans le sol, mais liés à l'état de l'atmosphère au dessus du sol: par exemple la présence d'eau ou d'air dans la porosité va dépendre des

précipitations entre autres. La lumière, la température vont être liées à ce qui se passe dans l'atmosphère et au dessus.

Intuitivement, on sait que les précipitations, la température de l'air font partie du «climat» d'un lieu. C'est donc le climat qui va conditionner une grande partie de l'activité des plantes. Il va, en particulier, leur fournir l'eau dont elles ont besoin, et la lumière.

b. Effet du climat sur la plante

Mais c'est aussi une caractéristique du milieu dans laquelle la plante doit vivre, et à laquelle elle est donc soumise; d'autre part, l'ensemble des végétaux contribue à modifier ce milieu. Par exemple, les événements climatiques pourront avoir des effets irréversibles sur la plante. Au-delà de 30°C, le grain de blé, en cours de maturation, est «échaudé»; c'est une transformation irréversible de la nature de ses réserves qui diminue le rendement en farine ou semoule. Avec de basses températures, les boutons floraux des arbres fruitiers gèlent: le cerisier de -2.2°C à -3.2°C, le pêcher de -3.9°C à -4.9°C. Une grêle violente peut perforer les feuilles et détruire une bonne partie des plantes. Une température et une humidité importante peuvent indirectement influencer la vie de la plante en provoquant l'apparition d'agents de maladie (champignons par exemple) sur la plante.

La climatologie: c'est la branche de la géographie physique qui étudie les climats de la terre c'est-à-dire la succession des conditions météorologiques ou des états de l'atmosphère d'un lieu donné sur de longues périodes. La climatologie est donc une science rétrospective qui se fonde sur des séries d'observations antérieures (10 ans au moins et 30 ans si possible). Elle s'intéresse essentiellement à la classification des climats à travers leurs : (a) caractéristiques ; (b) répartition et extension spatiales ; (c) facteurs d'explication et (d) évolutions.

La climatologie ou science des climats: plusieurs attitudes scientifiques se regroupent sous ce nom; exemples:

-Climatologie descriptive: on décrit et on classe les différents climats;

-Bioclimatologie: on étudie les relations entre le climat et les êtres vivants (bioclimatologie végétale: relation entre climat –plantes).

3. Ecologie végétale et botanique

La botanique n'échappe pas à la logique générale des disciplines naturalistes en leur début. Il s'agit d'abord de réaliser l'inventaire des plantes, les décrire et les classer, puis de caractériser et cartographier les ensembles naturels dans lesquels elles s'insèrent et enfin de rechercher une valorisation économique des différents constituants (plantes utiles, exploitation des milieux à des fins agricoles sensu lato ou de conservation). L'expression de cette logique dépend du contexte dans lequel elle s'insère car, en fonction des conditions, certaines orientations seront naturellement ou volontairement développées (GROUZIS et al., 2010).

La définition de la végétation comme objet géographique n'a rien d'évident (LECOMPTE et ALEXANDRE, 1996, ALEXANDRE et al., 1998b, ALEXANDRE et al., 2002). Cette définition met l'accent sur la nature de l'information attendue par son étude. Ensemble de végétaux assemblés en un lieu ou une région donnée, la végétation livre une information spatiale de trois natures:

-Une information d'ordre physionomique; elle porte sur sa structure horizontale et, dans le cas de végétations complexes, sur sa structure verticale; en se référant à l'usage établi par August GRISEBACH (1875), on désignera comme formation végétale une végétation identifiée par des critères physionomiques, un type de paysage végétal, en somme; l'information recueillie peut être qualitative (type de formation, types biologiques ou espèces dominantes) ou quantitative (taux de recouvrement, biomasse, spectre biologique, etc.);

-Une information sur son contenu floristique, c'est-à-dire la liste des espèces botaniques présentes; on parlera ici de communauté végétale pour désigner un ensemble d'espèces dont les individus vivent côte à côte; la fréquence de co-occurrence de certaines espèces permet de déterminer des groupements végétaux dont la phytosociologie cherche à établir la classification; la flore est ici envisagée comme un élément de la végétation, ce qui n'est pas toujours d'usage; l'information floristique est a priori qualitative mais la fréquence des espèces dans les communautés peut aussi être quantifiée, ce qui rappelle que les niveaux d'information physionomique et floristique sont interpénétrés;

-Une information de nature démographique et dynamique; chaque végétation est un assemblage de populations spécifiques qui peuvent être étudiées en elles-mêmes avec leurs caractères biométriques, chorologiques ou, dans leur évolution spatio-temporelle, en interaction les unes par rapport aux autres; lorsque libre cours est laissé à cette dynamique, il

se dessine des successions végétales; les principales d'entre elles ont été «modélisées» sous le nom de séries de végétation dont le terme serait la végétation climacique; la théorie du climax a soulevé, ceci étant, des questions aussi bien théoriques que pratiques. Où? Jusqu'où? Où? Cette question permet de définir le lieu en précisant ses attributs. La végétation participe ainsi à définir le caractère biophysique d'un lieu. «Elément de base de l'espace géographique, son atome en quelque sorte» (BRUNETR., in BRUNET, FERRAS, THERY éd., 1990), le lieu n'existe que comme point dans une étendue formée d'une infinité d'autres lieux. Il faut ainsi passer des faits de localisation à la spatialisation qui peut être définie comme l'étude de l'agencement des lieux. La première opération qui vient à l'esprit est une opération de généralisation spatiale; elle consiste à préciser jusqu'où s'étend le fait observé en tel lieu, passant ainsi du point à l'aire homogène au regard de l'objet ou du phénomène étudiés. Lorsque le caractère change, une limite peut être tracée; il en résulte une figure qui peut être dessinée sur une carte. La cartographie de la végétation et la cartographie écologique qui lui est associée, quelle que soit l'échelle à laquelle elles ont été réalisées, ont généralement procédé ainsi⁶. Le protocole expérimental est à peu près toujours le suivant: à partir d'un échantillon représentatif de points de relevés, ces derniers sont classés en fonction du degré de similitude observé; les critères sur lesquels s'effectue cette classification sont, à partir de là, extrêmement divers et des discussions parfois âpres ont été menées à ce sujet. L'information contenue dans la flore est reconnue comme plus riche et de plus grande valeur dans ses indications écologiques que l'information attachée à la physionomie de la végétation, laquelle, en revanche, enregistre clairement l'action passée et présente des sociétés humaines; les critères qui décrivent une formation végétale (son étendue, sa forme, sa structure horizontale ou verticale) sont par ailleurs une information essentielle pour la connaissance des écosystèmes dont ils vont moduler le fonctionnement. Quoi qu'il en soit, pour chacun des points, les résultats sont généralisés à une aire qui a été tracée, lorsque l'ensemble du terrain n'a pu être parcouru (ce qui est le cas général), à partir par exemple des zones d'égale apparence sur les documents de télédétection disponibles (photographies aériennes ou images satellitaires de plus ou moins haute résolution selon l'échelle de travail) ce qui postule que la structure spatiale des groupements végétaux se calque sur celle des formations végétales. Les levés topographiques permettent de nuancer dans le cas de formations végétales d'apparence trop homogènes. Cette approche par généralisation du lieu à l'aire offre une représentation de la végétation à grande échelle. Celle-ci finit par rejoindre, en procédant par emboîtement d'échelles, une autre visée, fort ancienne, qui procède de façon inverse en recherchant un découpage de la «face de la Terre»: «La connaissance de la Terre ne saurait se contenter

d'informations ponctuelles, hétérogènes. Son approfondissement appelle la saisie des ensembles, une intelligence de la surface de la Terre, qui passe par sa division logique, rationnelle. De tout temps, les hommes ont marqué et ont pris possession de la Terre en la divisant. Les Grecs y distinguaient des climats, c'est-à-dire des zones ...» (PINCHEMELPh. et G., 1979). Ce découpage s'appuie sur la création de catégories dont on va ensuite rechercher les principes d'une classification. Penser –Classifier: Georges PEREC, un des écrivains que les géographes aiment à citer, donna ce titre-manifeste à un texte (publié dans un recueil posthume: 1985). Doit-on le transposer et le proposer comme un horizon indépassable? Qu'il soit indispensable de créer des catégories de référence n'implique pas que l'ensemble de l'objet d'étude (en l'occurrence, l'espace géographique) soit découpé et rangé de force dans ces catégories. Cela revient à corseter la réalité et, ce faisant, à abandonner sur des bases arbitraires une partie de l'information contenue dans celle-ci (LECOMPTE et ALEXANDRE, 1996). La volonté d'aboutir à une classification partielle ou universelle a été poussée particulièrement loin en biogéographie végétale. Depuis plus d'un siècle, de telles classifications se succèdent, évoluant entre plusieurs concepts définis à des échelles plus ou moins explicites : formations (GRISEBACH, 1875), étages de végétation (SCHRÖTER, 1904), synusies (GAMS, 1918), associations végétales (BRAUN-BLANQUET, 1928, PAVILLARD, 1935), étages bioclimatiques (EMBERGER, 1930), séries de végétation (GAUSSEN, 1938), biogéocoenoses (SUKACHEV, 1942), groupes phyto-écologiques (GOUNOT, 1958), unités de paysage et géosystèmes (BERTRAND, 1969) ... Pour ne pas toutes les citer ... Les plus élaborées de ces classifications proposent une véritable systématique, la phytosociologie sigmatiste principalement.

Dans sa composition comme dans sa physionomie, la végétation offre une grande variété selon le lieu. C'est que tout lieu est un milieu qui offre aux êtres des conditions de vie plus ou moins hostiles ou favorables. Ce constat est un fait géographique majeur et a donné naissance à une science qui est devenue par excellence la science de la nature et de l'environnement: l'écologie. J'emploierai peu le mot de nature dans ce qui suit, bien que le sens que les Grecs donnaient au mot *physis*, traduit par *natura* chez les auteurs latins, convienne assez bien à mon propos. Il correspond bien au monde bio-physique ou à la biosphère dont il sera plus volontiers question, le mot de nature s'étant chargé de trop de significations contradictoires. Comme toutes les histoires de cette science (ACOT, 1988, DELEAGE, 1991, DROUIN, 1993, MATAGNE, 2002) le soulignent, l'écologie a, en effet, pris naissance à partir de la géographie des plantes que TOURNEFORT ou LINNE avaient esquissée avant qu'Alexandre

de HUMBOLDT(1807) n'en pose les fondements. Ce dernier avait jeté les bases du raisonnement géographique moderne; la géographie ne peut consister en un agrégat de connaissances ou un inventaire des lieux; elle doit, au contraire, être construite comme un tout à l'intérieur duquel «les choses sont considérées selon les places qu'elles occupent sur la Terre».

De nombreux auteurs reconnaissent que le concept d'écosystème, fondamental en écologie, a permis de fédérer les chercheurs, de consolider les bases théoriques de cette discipline et de donner enfin à l'écologie une unité d'étude. La création du mot en 1935 est le fait d'un botaniste, A.G. Tansley, qui se propose de clarifier « le fondement logique d'une théorie de la végétation » (cité par Drouin, 1984). Mais il faut attendre 1942 pour qu'un limnologue, R.L. Lindemann, lui donne le statut de concept. Pour Schlesinger (1989), les études écosystémiques traditionnelles sont des analyses de flux d'énergie et de matériaux au travers d'unités composées de communautés biotiques arbitrairement définie.

Les années 50 se caractérisent par le développement de ce type d'approche dont la généralisation est assurée par l'édition d'ouvrages de synthèse. Par exemple, le *Fundamentals of ecology* d'Odum (1953), véritable bible des écologistes, officialise l'utilisation du terme écosystème en exposant les méthodes quantitatives énergétiques et en proposant différents modèles. Cette présentation est reprise par de nombreux auteurs dont Duvigneaud (1962, 1974) et Margalef (1968). Au cours des années 60, en liaison avec le Programme biologique international, on assiste au développement des études écosystémiques qui s'orientent vers la biogéochimie.

Selon Drouin (1984), « dès l'origine, les débats théoriques auxquels donne lieu le concept d'écosystème mettent en jeu une série de rapports entre l'homme et la nature, le vivant et le non vivant, l'unité et la multiplicité ». Cette analyse est confortée par Acot (1988), philosophe des sciences, pour qui naît alors une « pensée écosystémique » induisant « l'apparition d'une idéologie écologiste systémiste qui transformera les représentations sociales des relations nature-société dans les sociétés industrielles ».

4. Statistiques pour résoudre des problématiques écologiques

Objectifs des statistiques de l'environnement consiste à :

- Améliorer la connaissance de l'environnement;
- Supporter des décisions politiques fondées sur des faits et faciliter la prise de décision;
- Fournir des informations sur l'état de l'environnement et les principaux facteurs qui l'influencent, pour le grand public et pour des utilisateurs spécifiques.

Les champs d'application des statistiques de l'environnement sont :

- Couvre les aspects biophysiques de l'environnement et les aspects du système socio-économique qui influencent et interagissent directement avec l'environnement.
- Les champs d'application des statistiques environnementales, sociales et économiques se chevauchent, et il n'est pas facile – ou nécessaire– de tracer une ligne claire divisant ces domaines.
- Les statistiques sociales et économiques qui décrivent des procédés ou des activités ayant un impact direct ou interagissant avec l'environnement sont largement utilisées dans les statistiques de l'environnement.
- Les autres statistiques économiques et sociales pertinentes, qui ne font pas partie des statistiques de l'environnement, sont également tenues de placer les questions environnementales dans leur contexte et de faciliter l'analyse intégrée des processus environnementaux, sociaux et économiques.
- L'utilisation de définitions et de classifications cohérentes entre ces domaines favorise leur intégration.

Principaux utilisateurs des statistiques de l'environnement : Le type, le niveau d'agrégation thématique, spatiale et temporelle, et le format des statistiques de l'environnement dépendent du type d'utilisateur et l'utilisation prévue.

Les principaux produits de statistiques de l'environnement sont :

- Séries détaillées de statistiques descriptives de l'environnement

- Indicateurs environnementaux

Les deux peuvent être:

- Stockés dans des bases de données multi usages
- Disséminés sous la forme de
 - Bases de données en ligne
 - Publications (par ex., recueils, annuaires, rapports thématiques)
 - Publications analytiques (par ex., rapports sur l'état de l'environnement)

L'information environnementale comprend les faits quantitatifs et qualitatifs qui décrivent l'état de l'environnement et ses changements.

Information environnementale quantitative

- Consiste en des données, statistiques et indicateurs, et est normalement disséminée à travers des bases de données, fichiers Excel, recueils et annuaires.

Information environnementale qualitative

- Consiste en des descriptions (par ex., textuelles et picturales) de l'environnement ou de ses parties constituantes qui ne peuvent pas être adéquatement représentées par des descripteurs quantitatifs précis.

L'information environnementale géo référencée apporte des faits sur l'environnement et ses composants en utilisant des cartes numériques, des images satellites et d'autres sources liées à une localisation ou une caractéristique d'une carte

Les données environnementales sont de grandes quantités d'observations et de mesures sur l'environnement et les processus connexes.

- Elles peuvent être collectées ou compilées:
 - par les instituts nationaux des statistiques, les ministères de l'environnement, les autorités sectorielles (par ex., eau, forêts, mines)

□ en utilisant différents types de sources:

- enquêtes statistiques (recensements ou sondages)
- archives administratives, bases de données géographiques, registres et inventaires
- réseaux de surveillance, cartographie thématique, télédétection, recherches scientifiques et études sur le terrain.

Les statistiques de l'environnement sont des données environnementales qui ont été structurées, synthétisées et agrégées selon les méthodes, normes et procédures statistiques.

Les statistiques de l'environnement transforment des données environnementales et d'autres données en des statistiques pertinentes qui décrivent l'état et les tendances en matière d'environnement ainsi que les principaux processus l'affectant.

Les données environnementales ne sont pas toutes utilisées pour produire des statistiques de l'environnement.

Les unités de statistiques de l'environnement compilent, collectent, valident, décrivent et structurent des données environnementales pour produire des séries de statistiques de l'environnement.

5. SIG et GPS pour résoudre des problématiques écologiques

Les SIG nous permettent d'établir les liens complexes entre ou, plutôt, de relier dans l'espace de multiples types d'informations issues de sources variées, comme la géographie, la géologie, la géomorphologie, la pédologie, la phytogéographie, la météorologie, l'analyse d'utilisation du sol, etc. Les informations sont organisées en couches de données qui peuvent être superposées, mises en interaction ou isolées (fig. 25). Les données peuvent être organisées en raster (cellule de grille) ou en vecteur (polygone, polyligne et point). Les images digitalisées issues de la télédétection et les données scannées, par exemple, la carte du sol, la carte hydrologique, apparaissent habituellement sous forme de raster.

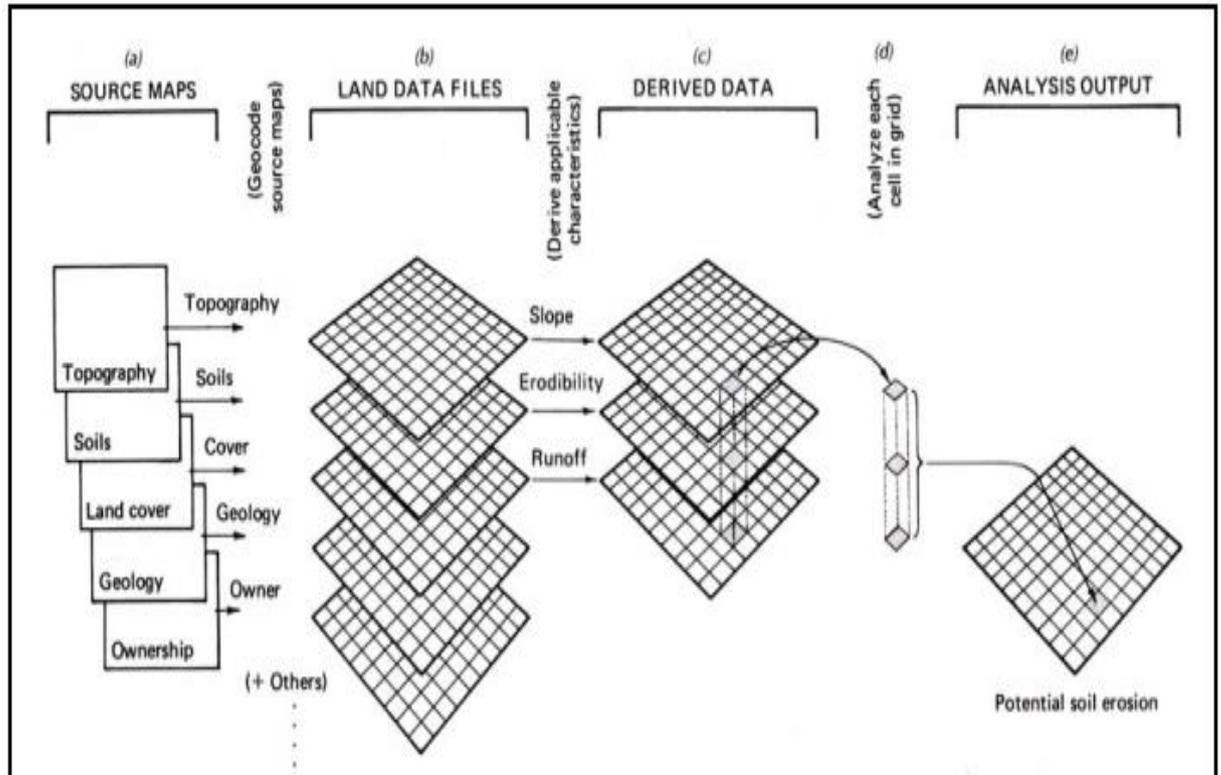


Figure 26 - Un exemple de SIG et des procédures d'analyse

(D'après Lillesand and Kiefer, 1994, 2000)

Le feed-back (retour d'information) de l'analyse peut être présentée sous forme de diagrammes, de tableaux et de statistiques synthétisant les données. C'est l'autre principe fondamental des SIG. Concrètement, les applications des SIG peuvent être les suivantes :

STOCKAGE ET GESTION DES DONNEES

Un stockage et une gestion efficaces sont les fonctions premières des SIG. L'échelle des SIG peut s'étendre d'un niveau local, régional jusqu'à un niveau global et leurs contextes de gestion varient de l'environnement à la sociologie et de l'administration civile à l'économie. Ainsi que nous l'avons démontré plus haut, n'importe quel type de sources de données pertinentes telles que les cartes géologiques et géographiques, l'information d'utilisation du sol, les images spatiales, les données démographiques, socio-économiques, etc., peuvent être intégrées dans les SIG pour le stockage, la gestion ou d'autres analyses.

Sur la base des fonctions présentées ci-dessus, les SIG ont été largement appliqués aux aspects suivants de la recherche pour l'environnement :

Gestion, suivi et planification de l'environnement (Lindgren, 1985, De Sède *et al.*, 1992; Didon *et al.*, 1992 ; Meuret *et al.*, 1992 ; Nicoullaud *et al.*, 1992, Duguay *et al.*, 1996 ; French *et al.*, 1996 ; Negahban *et al.*, 1996 ; Bibby *et al.*, 1999 ; Larsen, 1999) ;

Cartographie (Vidal *et al.*, 1992) ;

Analyse et modélisation spatiales (Baize *et al.*, 1992 ; Gaury, 1992 ; Legros *et al.*, 1992; Gessler *et al.*, 1996 ; Mackey *et al.*, 1996 ; Maidment, 1996 ; Mitasova *et al.*, 1996 ; Aspinall *et al.*, 1996 ; Aspinall, 1999 ; Verburg, *et al.*, 2000 ; Serneels *et al.*, 2001) ;

Evaluation d'écoulement (King *et al.*, 1992 ; Battaglin *et al.*, 1996 ; Vieux *et al.*, 1996), Evaluation du risque naturel (Brimicombe *et al.*, 1996 ; Emmi *et al.*, 1996 ; Wu *et al.*, 2003a).

Cependant, une grande partie de l'utilité des SIG réside dans leur efficacité pour la gestion et la mise en œuvre des données spatiales (Aspinall, 1999). La réflexion spatiale a pris peu de place dans la recherche écologique qui s'est plutôt orientée vers la compréhension des processus que vers l'analyse de mode (Getis, 1999 ; et Openshaw *et al.*, 1999). L'utilisation d'une analyse statistique spatiale avancée, intégrant d'une manière synthétique divers genres d'information spatiale, et permettant de traiter de nombreuses données spatiales à l'échelle régionale voire globale, pourrait être fort utile.

Il est probable que le manque d'ensemble d'outils (*package*) de modélisation plus performants pouvant être intégrés dans les GIS, implique que ce potentiel reste encore beaucoup à développer. Quelques efforts ont été faits, par exemple, Anselin (1992) a développé le logiciel SpaceStat pour l'analyse de données spatiale qui a été lié avec l'ArcView (<http://www.rri.wvu.edu/utilities.htm>) (Anselin, 1999).

Mais l'analyse spatiale liée aux SIG reste toujours à améliorer en particulier pour traiter les très nombreuses et hétérogènes données spatiales. Un exposé plus détaillé en ce qui concerne l'analyse statistique spatiale basée sur les SIG sera présenté dans la section suivante. L'objectif final de l'application des SIG est de participer à la prise de décision des dirigeants, en s'appuyant sur une analyse synthétique. Par conséquent en intégrant la télédétection et les données géographiques, les SIG constituent un outil puissant pour surveiller et modéliser l'environnement aride.

SUIVI ET DETECTION DE CHANGEMENT

Il est possible de surveiller le changement environnemental et d'entreprendre une détection simple de changement par la vectorisation puisque des données spatiales dynamiques multitemporelles et leur information de changement peuvent être intégrées et mises à jour dans le système d'information géographique. Avec des SIG, il est facile de localiser et distinguer n'importe quel changement spatial.

Chapitre VII. Traitement des données

1. Pourquoi utilise-t-on l'AFC en phytoécologie ?

En phytoécologie, on cherche généralement à mettre en évidence des associations entre espèces (notion de communautés végétales) ou bien à faire des groupes écologiques de relevés (notion de typologies de station). De manière intuitive, cela revient à regrouper les espèces et les relevés qui se ressemblent, soit en associant les espèces présentes dans les mêmes relevés, ou bien en regroupant les relevés ayant des profils floristiques similaires. Effectuer ce travail à la main, dès l'instant où l'on dispose d'un nombre important de données, représente un travail long et fastidieux.

Le recours à l'outil statistique permet d'automatiser une procédure de tri par agrégations des espèces qui vont ensemble et des relevés qui se ressemblent. En ce sens, l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) d'un tableau floristique est une méthode semi-automatique permettant de représenter géométriquement, dans un espace à plusieurs dimensions, les « distances écologiques » qui séparent les espèces suivant leurs dispositions dans les relevés ainsi que pour les relevés, suivant la composition de leurs profils floristiques.

La difficulté associée à cette méthode d'ordination réside dans la représentation que l'on se fait d'un espace à plusieurs dimensions (autant que d'espèces ou de relevés). Néanmoins, il est possible de simplifier cet espace par projection sur une, deux ou trois dimensions afin de mieux « voir » les distances qui séparent chaque espèce ou chaque relevés. Le jeu consiste à bien choisir la projection la plus pertinente de cet espace à plusieurs dimensions dans un espace réduit à un plan, ou un axe, de façon à résumer au mieux la variabilité, ou inertie du nuage des espèces (resp. des relevés).

Par analogie, si l'on veut décrire un chameau à quelqu'un qui n'a jamais vu l'animal, le message le plus explicite sera de dessiner sur le papier une représentation de profil, c'est le plan factoriel qui décrit le mieux l'animal en question. L'objectif de l'AFC appliquée au tableau floristique est identique à celui de vouloir expliquer par le dessin ce que l'on a retenu de l'allure générale du chameau (simplification de notre réalité tridimensionnelle sur une feuille de papier plane).

En définitive, l'AFC permet d'**analyser** un espace multidimensionnel, afin d'y trouver un axe ou bien un plan dit « **factoriel** » qui maximise simultanément la **correspondance** entre les espèces et les relevés.

2. Définition et principes : approche phytoécologique

L'AFC a été conçu au départ comme une méthode de statistique descriptive destinée à étudier les relations entre deux **variables qualitatives** à partir d'un « **tableau de contingence** ». Cette table de contingence correspond au croisement des différentes modalités qui composent chacune des deux variables qualitatives : à chaque case du tableau est affecté l'effectif des individus présentant les modalités considérées. Par exemple, soit une variable peuplement à trois modalités, et une variable humus à trois modalités. On effectue l'AFC sur la table de contingence suivante :

Tableau 6 - Table de contingence Humus/Peuplement

	Moder	Hemimoder	Eumoder	Total
Peuplement feuillus	11	9	10	30
Peuplement résineux	13	10	7	30
Mélange feuillus/résineux	10	10	10	30
Total	34	29	27	90

Or un tableau floristique n'est pas un tableau de contingence : on parle plutôt de « **tableau disjonctif semi-complet** » : chaque case du tableau contient une information codée en présence/absence pour l'espèce j dans le relevé i :

Tableau 7 - Tableau floristique codé en présence/absence

	Espèce1	Espèce2	Espèce3	Espèce j	Espèce P
Relevé n°1	0	1	1	...	1
Relevé n°2	1	0	0	...	0
Relevé n°3	1	0	1	...	1
Relevé n°i
Relevé n°N	0	0	1	...	1

Si en phytoécologie, l'objectif de l'AFC est l'étude de la correspondance entre les espèces, alors il faut attribuer à chaque espèce du tableau floristique un rôle de variable qualitative à deux modalités (présence ou absence) et à chaque relevé le rôle d'individu. Par analogie avec l'AFC classique, cela reviendrait à construire une table de contingence très complexe sur un nombre important de variables bimodales. Pour retomber dans le cas de l'AFC classique, il faudrait que sur l'ensemble des relevés étudiés, le nombre total d'espèces atteigne deux (cas très simple, non rencontré dans la réalité). Dans ce cas très simplifié, on pourrait transformer le tableau floristique en une table de contingence du type :

Tableau 8 - Table de contingence Espèce1/Espèce2

	Espèce1 (présence)	Espèce1 (absence)
Espèce2 (présence)	24	12
Espèce2 (absence)	10	14

Pour trois espèces, on peut aussi représenter la table de contingence dans un cube à deux modalités par côté. Au delà de trois, la représentation de la table de contingence est impossible. Néanmoins, lorsque le nombre de variables qualitatives est supérieur à deux, il est possible d'effectuer une AFC non plus sur la table de contingence, mais sur un « **tableau disjonctif complet** ». Il s'agit d'effectuer ce que l'on appelle un codage disjonctif des variables. Reprenons l'exemple de l'AFC classique sur les variables Humus/Peuplement : dans ce cas, chaque variable dispose de trois modalités. Parmi les 90 relevés issus de l'effectif total, considérons 5 relevés à titre d'exemples et contenant les modalités Humus/Peuplement suivantes :

- R1 : Moder/**Résineux**
- R2 : Eumoder/**Feuillus**
- R3 : Moder/**Résineux**
- R4 : Hemimoder/**Résineux**
- R5 : Eumoder/**Mélange**

Pour ces 5 relevés, le tableau disjonctif complet correspond à un éclatement des modalités de chacune des deux variables Humus et Peuplement en un ensemble de 6 variables binaire (0/1) :

Tableau 9 - Tableau disjonctif complet sur 5 relevés

	Moder	Hemimoder	Eumoder	Résineux	Feuillus	Mélange
1	1	0	0	1	0	0
2	0	0	1	0	1	0
3	1	0	0	1	0	0
4	0	1	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	1

Le résultat de l'AFC sur le tableau disjonctif complet contenant les 90 relevés de l'effectif total donne les mêmes résultats que l'AFC effectué sur la table de contingence présentée plus haut. Cette représentation permet cependant de travailler sur un nombre plus grand de variables qualitatives, autant que d'espèces contenues dans l'ensemble des relevés. C'est sur la base de ce constat que l'on s'appuie pour dire que l'AFC d'un tableau floristique correspond à réaliser une AFC sur une table de contingence à n variables (n étant le nombre d'espèces). Cependant dans le cas d'un tableau floristique, le tableau disjonctif n'est pas complet, étant donné le rôle symétrique de la variable espèce (présence/absence). En toute logique, il faudrait compléter le tableau floristique des présences par celui des absences pour obtenir un tableau disjonctif complet (information redondante).

Par conséquent le lien qui existe entre AFC classique et AFC sur tableau floristique, c'est le passage par un **codage disjonctif** des variables.

3. Distinction entre Analyse en Composante Principale (ACP) et AFC en phytoécologie

L'AFC est une méthode proche de l'ACP, que l'on emploie lorsque l'on dispose de données qualitatives. Comme l'AFC, l'ACP est utilisée à des fins descriptives pour étudier les ressemblances entre variables et les proximités entre individus. Cependant, l'ACP étudie les ressemblances entre les variables de nature quantitative par l'intermédiaire des **distances euclidiennes**, tandis que l'AFC s'intéresse à la relation entre deux variables (ou plus) de nature qualitative par comparaison des **distances du Chi2**.

L'ACP est une analyse factorielle, en ce sens qu'elle produit des facteurs (ou axes principaux) qui sont des *combinaisons linéaires* des *variables* initiales, hiérarchisées et indépendantes les unes des autres. On appelle parfois ces facteurs des « dimensions latentes », du fait qu'ils sont l'« expression de processus généraux dirigeant la répartition de plusieurs phénomènes qui se retrouvent ainsi corrélés entre eux » (Béguin & Pumain, 2000).

4. Correspondance entre espèces et relevés

Comment mettre en évidence l'information contenue, sous forme de variabilité floro/faunistique, dans un tableau espèces x relevés, autrement dit comment faire apparaître la structure d'un tableau souvent volumineux et illisible? Certaines espèces sont-elles liées à certains groupes de relevés? Existe-t-il donc un classement des espèces tel qu'on puisse lui faire correspondre un classement des milieux ? Bref, peut-on mettre en correspondance les espèces et les relevés ?

4.1. Optimum écologique et ordination des espèces

Considérons la répartition d'une espèce dans divers relevés différant entre eux par une variable écologique quelconque. Sur l'axe représentant cette variable, chaque relevé est à la valeur x , prise par la variable en question (éventuellement en classes). Il y a donc ordination a priori des relevés. La distribution des relevés contenant une espèce donnée sur cet axe figure ce qu'on peut appeler le « profil écologique » (Gounot 1969) de l'espèce (cf. Romane 1972, Daget et Godron 1982). L'optimum de l'espèce sera logiquement estimé par un paramètre de position de la distribution, le plus souvent la moyenne par souci de simplicité. On pourrait aussi utiliser le mode de l'approximation gaussienne du profil de l'espèce (Gauch et al. 1974, Ter Braak et Looman 1986), mais cette méthode est difficilement utilisable si l'on dispose de

plus de deux ordinations concurrentes des relevés. Remarquons que la moyenne ne constitue un «résumé» satisfaisant de la position de l'espèce sur le gradient que si la distribution de cette dernière est unimodale.

Dès qu'on envisage plusieurs espèces se pose le problème de leur classement. Il est logique de les ordonner d'après les moyennes de leurs distributions, c'est-à-dire les moyennes des X_j des relevés où on les trouve. On obtient ainsi, à partir de l'ordination a priori des relevés, une ordination a posteriori y_j des espèces sur un axe-espèces correspondant (fig. 25). Sur cet axe, des espèces dont les optimums écologiques sont proches auront des y_j proches. Cette méthode de classement des espèces sur un gradient par leurs positions moyennes (moyennes pondérées, ou moyennes simples si les relevés sont en présence-absence), ou «averaging» simple (weighted averages), est classique (Whittaker 1948, in Whittaker 1960; «méthode des barycentres», Daget 1977). D'une façon générale, l'étude de la distribution des espèces sur un gradient écologique défini a priori est appelée «analyse de gradient directe». Cette définition a priori s'effectue en général à partir d'une variable du milieu dont l'importance est reconnue (humidité, altitude, stade d'une succession écologique, etc). On a également imaginé utiliser une combinaison a priori de variables à l'aide d'indices synthétiques comme dans la méthode des «scalars» (cf. Togerson 1958, McIntosh 1967, Austin et al. 1984).

D'un point de vue statistique, le classement obtenu par les moyennes maximise la corrélation entre les indices X_i des classes et les indices y_j des espèces. Mais la méthode ne fournit aucune information sur les ressemblances et différences floro/faunistiques entre relevés (c'est-à-dire entre les x ; puisque ceux-ci sont définis a priori). De plus, chaque espèce est considérée indépendamment des autres.

4.2. Espèces indicatrices et ordination des relevés

Selon un raisonnement symétrique du précédent, on peut désirer ordonner un ensemble de relevés d'après les espèces qu'ils contiennent, si les préférences de ces espèces concernant une variable écologique donnée sont connues (notion d'espèce «caractéristique»). La présence d'une espèce est alors considérée comme indicatrice d'une certaine valeur probable de la variable. Dans ce cas, ce sont les y_j (optimums des espèces sur ce facteur, autrement dit leur «valeurs indicatrices») qui sont fixés a priori. On en déduit l'ordination a posteriori des

relevés, la coordonnée X_i d'un relevé étant égale à la moyenne des y_j des espèces qu'il contient.

Ainsi Ellenberg (1948), désirant prédire l'acidité d'un sol d'après la présence de certaines plantes, classe d'abord ces espèces de 1 (très acidophiles) à 9 (très alcalophiles) ; la moyenne des indices des espèces d'un échantillon lui donne une estimation semi-quantitative de l'acidité du sol (voir aussi Ter Braak et Gremmen 1987). Whittaker (1960), ou Whittaker et Niering (1965), étudiant un gradient d'aridité, attribuent aux espèces les indices $y_j = 1$ («mésiques») à 4 («xériques»), puis ordonnent les stations d'après la moyenne de ces indices. De même, Demarq et Mourer-Chauviré (1976), cherchant à reconstituer les variations paléoclimatiques d'après des faunes d'oiseaux fossiles, indexent les espèces de $y_j = 1$ («arctiques») à 4 («méditerranéennes»); ils utilisent la moyenne des indices des espèces comme «indice thermique» de l'échantillon (voir d'autres exemples de «habitat adaptation numbers» ou «species position indices» in McIntosh 1967 et Goff et Cottam 1967).

Mais pour une matrice relevés x espèces donnée, la corrélation globale entre les indices x_i des relevés et y_j des espèces ne peut être optimale dès lors que l'on fixe a priori soit les uns, soit les autres. La qualité des ordinations obtenues par le calcul des moyennes dépend en effet de la qualité de l'ordination a priori. Elle dépend donc étroitement de l'expertise de l'écologiste et de la connaissance qu'il possède, ou croit posséder, soit des espèces, soit des relevés.

4.3. De l'ordination réciproque des espèces et des relevés à l'Analyse des Correspondances

On peut donc n'accorder qu'une confiance relative à l'ordination a priori des relevés (ou des espèces), et préférer s'en remettre à une méthode objective pour obtenir la meilleure ordination réciproque des espèces et des relevés possible. Ainsi, Dix et Smeins (1967), étudiant l'influence du drainage sur la végétation, commencent par ranger «à l'estime» leurs relevés dans les 6 classes d'une échelle approximative d'humidité. Ils choisissent alors 48 espèces indicatrices, c'est-à-dire ayant un mode bien marqué sur cette échelle provisoire, et les ordonnent de 1 (celles dont le mode est dans des stations très sèches) à 6 (très humides). Ils en déduisent une nouvelle ordination des relevés, placés à la moyenne des indices de leurs espèces, «more accurate than that based on the original visual assessment of topography and drainage » (Gauch 1982). Il s'agit-là d'un raisonnement qui conduit, par itérations, à Yaveraging réciproque, autrement dit à l'AFC.

Une des techniques de l'AFC (Hill 1973a) consiste en effet, à partir d'une ordination a priori des espèces, à ordonner les relevés d'après la moyenne des espèces qu'ils contiennent. Cette nouvelle ordination des relevés est utilisée pour réordonner les espèces par la même technique, qui conduit à une nouvelle ordination des relevés. On réitère ces deux étapes jusqu'à ce que les deux ordinations se stabilisent (Fig. 26). La solution, unique, ne dépend plus des ordinations initiales. Digby et Kempton (1987), sur un exemple, visualisent la convergence vers une ordination unique, après une dizaine d'itérations, en partant de deux ordinations initiales distinctes.

Ici, l'écologiste renonce donc à intervenir a priori dans l'ordination. Il en résulte trois propriétés importantes :

a) La solution dépend exclusivement de la structure interne du jeu de données. Elle est donc objective. Elle est aussi optimale. En effet, à chaque itération, la corrélation entre les indices X_j des relevés et y_j des espèces augmente, jusqu'à stabilisation où cette corrélation r est maximale. On obtient alors une ordination réciproque des espèces et des relevés, qui correspond au premier couple de facteurs de l'AFC. Cette ordination réciproque peut être visualisée par le graphe de corrélation canonique relevés x espèces (Fig. 26). L'ordination est optimale :

tout déplacement d'une ligne ou d'une colonne aurait pour effet de faire baisser la corrélation globale relevés x espèces (qui n'est autre que la racine de la valeur propre du facteur considéré de l'analyse).

Le maximum de points (de «présences») est situé vers la diagonale. Les lignes (ou colonnes) sont d'autant plus proches que leurs moyennes sur le gradient sont plus proches : la proximité sur l'axe est donc une mesure de ressemblance à la fois pour les espèces et pour les relevés.

b) Au coefficient $1/r$ près, chaque espèce a une abscisse y_j égale à la moyenne des abscisses X_i des relevés où on la trouve. Réciproquement, chaque relevé a une abscisse x_i égale à la moyenne des y_j des espèces qu'il contient. Si rest suffisamment élevé, on peut représenter espèces et relevés sur le même axe : les espèces sont alors au milieu de leurs relevés, et réciproquement. Mais on peut aussi choisir l'axe-espèces de variance unité et l'axe-relevés de variance égale à la valeur propre, auquel cas les points-relevés sont au barycentre des espèces qu'ils contiennent (mais non l'inverse). Si l'axe-relevés est de variance unité, et

Taxe-espèces de variance égale à la valeur propre, ce sont les espèces qui sont au barycentre des relevés où elles sont présentes.

c) Le «facteur» ainsi mis en évidence par l'analyse est un facteur purement abstrait qui ne traduit que la structure principale du jeu de données. Les coordonnées représentent de nouvelles variables synthétiques floro/faunistiques, de variance maximale. Le problème consistera à mettre en évidence a posteriori d'éventuelles corrélations de ce facteur abstrait (qu'on appelle quelquefois «variable latente») avec les variations de variables externes mesurées sur le terrain.

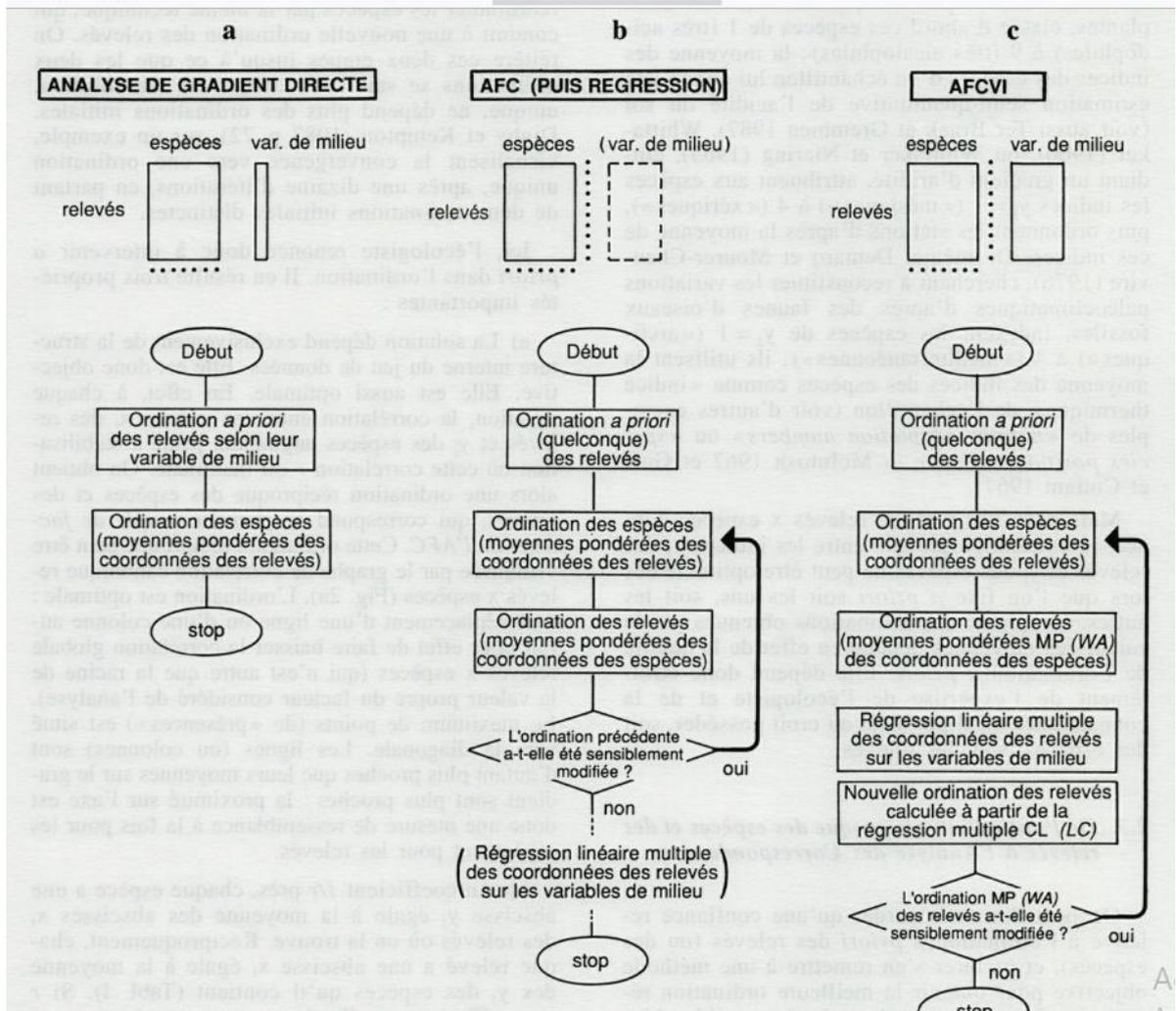


Figure 27 - Algorithmes correspondant à l'analyse de gradient directe avec averaging simple (a), à l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) éventuellement suivie d'une régression (b), et à Analyse Factorielle des Correspondances sur Variables Instrumentale

5. Choix d'une stratégie pour une étude espèces milieu

Les trois principales décisions à prendre lors de la mise en place d'une étude de relations taxons- milieu sont les suivantes (d'après Lebreton et Yoccoz, 1987 complété; voir aussi Wiens 1989) :

1) Quel ensemble de taxons échantillonner, et avec quelle méthode de mesure d'abondance ou de simple présence ?

2) Quelles variables de milieu mesurer?

3) Selon quelle planification des relevés?

Les réponses à ces questions dépendent en partie des objectifs et des questions biologiques, et en partie de considérations statistiques dont Fronder (1983) offre une bonne vue d'ensemble. L'ensemble de taxons échantillonné est généralement un groupe systématique bien défini, ou un ensemble d'espèces sensibles aux mêmes variations de milieu, susceptibles d'interactions, et échantillonnables par une même méthode (Coléoptères capturés par des pots de Barber, passereaux forestiers chanteurs, poissons pêchés au chalut, etc). Dans des études de groupes taxonomiques homogènes en relation avec la théorie de la niche, un plan d'échantillonnage selon un ou plusieurs gradients sera souvent retenu, alors qu'en biologie de la conservation, un plan d'échantillonnage systématique sera souvent approprié pour couvrir la région d'étude d'une façon homogène.

Choix des variables de milieu et planification des relevés sont d'ailleurs intimement liés. En effet par variables de milieu, il faut entendre toute variable caractérisant les relevés, y compris des variables qualitatives qui sont en fait des facteurs au sens analyse de variance du terme. Ainsi par exemple on pourra choisir 30 relevés dans un type de forêt, et 30 autres relevés dans un autre type, ou bien associer une variable qualitative (le versant) à une variable quantitative (l'altitude). Pour éliminer l'effet d'une variable, il est bien sûr toujours possible de limiter en conséquence l'échantillonnage, mais il sera souvent intéressant de pouvoir « éliminer » ces effets *a posteriori* (cf. par ex. Yoccoz et Chessel 1988, Dolédec et Chessel 1989). Ainsi, dans la planification d'une typologie de stations forestières, pour étudier l'effet du type de sol sur la composition floristique, on pourra :

— soit minimiser l'action du facteur altitude en répartissant strictement tous les relevés à l'intérieur d'un même étage altitudinal,

— soit procéder à une analyse, par exemple sur des variables instrumentales définissant les types de sol, conditionnellement à l'altitude. C'est ainsi que dans une étude d'invertébrés fluviaux, Richardot-Coulet *et al.* (1986; voir également Lebreton *et al.*, 1988b) caractérisent des relevés par une série de facteurs qualitatifs croisés, ce qui permet par exemple de tester l'effet de différentes méthodes d'échantillonnage compte-tenu d'autres sources de variation de composition spécifique comme la saison, le courant ou la station (Sabatier *et al.* 1989). On veillera aussi à limiter au maximum, par une planification soignée, les confusions de facteurs. Par exemple des comparaisons d'avifaunes entre régions par des méthodes de points d'écoute ne pourront faire l'économie, si les différences à mettre en évidence sont subtiles, d'un contrôle de l'effet observateur : croiser observateur et régions, chaque observateur effectuant une part des relevés de chaque région est idéal. Un seul observateur partout semblerait encore préférable, mais le risque est alors d'introduire une confusion régionsaison en étalant les relevés dans le temps !

Il est bien sûr recommandé de réduire le nombre de variables de milieu, à la fois pour les raisons de robustesse déjà discutées, mais aussi pour ménager les possibilités de mise en évidence d'effets car au delà de 4 variables des interactions complexes empêchent souvent la construction d'un modèle raisonnable.

D'après Chessel (1992), études théoriques et analyses concrètes permettent d'énoncer d'autres principes importants à prendre en considération dans la construction des plans d'échantillonnage : miniaturisation du sondage élémentaire (pour tenir compte de l'hétérogénéité du milieu et pouvoir augmenter le nombre des échantillons), emboîtement des mesures (plans de type hiérarchique), «abandon impératif de l'échantillonnage au hasard (constat d'ignorance et entretien de celle-ci)», contrôle des structures à plusieurs échelles... Les problèmes d'échelle sont au cœur de l'étude des relations espèces-milieu, depuis la définition des questions posées jusqu'à l'interprétation des résultats. En dépendent en effet tous les patrons de variabilité mesurés (Wiens 1989).

Conclusion

À la fin de ce document, l'étudiant sera en mesure : de distinguer et d'analyser les éléments de composition, de structure et de caractérisation des écosystèmes urbains, et d'utiliser l'inventaire écologique et floristique ainsi que les outils et les méthodes de diagnostic pour étudier les relations végétation - milieu dans le cadre de leur gestion durable.

Références bibliographiques

Coulomb Christine, 2010. « Biodiversité et nature en ville » Présentation à la journée nationale de formation Cédis pour élus - Jardins de Merlettes - 29 mai 2010.

Costanza, R., al., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital nature 387, 253–260

Cavayas François et Baudouin Yves, 2008. Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM Volets 1 et 2 : Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005). Département de Géographie Université du Québec à Montréal.

Clergeau P., 2008. Préserver la nature dans la ville. Responsabilité et environnement n°52.

Daily, G., 1997. Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems. Island Press.

de Groot, R., et al., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41, 393–408

DOBBS, C., FRANCISCO, J. E. et WAYNE, C. Z., (2011). « A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators », *Landscape and urban planning*, vol. 99, no 3-4, p. 196-206.

Foucault B. (de), 1981. Réflexions sur l'appauvrissement des syntaxons aux limites chorologiques des unités supérieures phytosociologiques et quelques-unes de leurs conséquences. *Lazaroa*, 3, 75-100.

Frankel O. H. et Bonnet E., 1970. Genetic resources in plants. Their exploration and conservation. I.B.P., Blackwell Scient. Publ., Oxford, 73-120.

Godron M, Daget P, Emberger L, Le Floch E, Poissonet J, Sauvage C, Wacquant JP (1968) Code pour le relevé méthodique de la végétation. CNRS Paris, 292 p

Kerroum Zohra, 2014. Contribution à l'Etude phytoécologique des groupements à matorrals de BOURICHE (Daïra de Youb-Wilaya de Saida). Mémoire de Master en Ecologie et Environnement. Université Dr. Tahar MOULAY –Saïda.

Gounot M., 1956. A propos de l'homogénéité et du choix des surfaces de relevé. Bull. Serv. Carte phytogeogr., CNRS, Montpellier, B, 1 (1), 7-17.

Gounot M., 1969. Méthodes d'études quantitative de la végétation, Masson et Cie, Paris, 314p.

Guinochet M., 1973. *La phytosociologie*. Collection d'écologie I. Masson éd., Paris, 227 p.

Géhu J.M., 1980. La phytosociologie d'aujourd'hui. Méthodes et orientations. *Not. Fitosoc.*, 16, 1-16, Pavia.

Géhu J.M., 1991. L'analyse symphytosociologique et géosymphytosociologique de l'espace. Théorie et méthodologie. *Coll. Phytosoc.*, XVII, *Phytosociologie et paysages*, Versailles, 1988, 12-46.

Géhu J.M., 1992. Réflexions sur les fondements syntaxonomiques nécessaires à une synthèse des végétations à l'échelle du continent européen et esquisse d'un synsystème dans l'optique de la phytosociologie Braun-Blanqueto-Tüxenienne. Ebauche de synsystème pour la France. *Annali di Botanica*, 1, 131-147.

Géhu J.M. & Rivas-Martinez S., 1981. Notions fondamentales de Phytosociologie. *In*: H. Dierschke (ed.), *Ber. der Intern. Symp. der Intern. Verein. für Vegetationsk., Syntaxonomie*, Rinteln 1980, 5-33.

GROUZIS Michel, GUILLAUMET Jean-Louis, RAZANAKA Samuel, 2010. Botanique et écologie végétale, Chapitre 13. Parcours de recherche à Madagascar. LJR-D-Orstom et ses partenaires Éditeurs scientifiques Christian FELLER, Frédéric SANDRON.

Long Gilbert, 1974. Diagnostic phytoécologique et aménagement du territoire. Tome 1, Masson Et C^{ie}, Editeurs, paris, France.

Mangin Michel, Courtadon Jean-Louis, De Lalos Eric, 2000. Village, forges et parcellaire aux sources de la seine. L'agglomération antique de Blessey-salmaise (Côte d'Or).

Presse universitaire franco-comtoises. Annales littéraires de l'université de Franche-Comté, volume 699, série « Environnement, Sociétés, Archéologie », numéro 2.

Mc Kinley M.L., 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological conservation* 127: 247-260.

NIEMELÄ, J., SAARELA, S-R., SÖDERMAN, T., KOPPEROINEN, L., YLI-PELKONEN, V., VÄRE, S. et KOTZE, D J. (2010). « Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study », *Biodiversity and Conservation*, vol. 19, no 11, 3225-3243.