الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
—
Université
Yahia FARES de MEDEA

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
———
جامعة يحي فارس بالمدية

Faculté des Sciences

كليــة العلــوم

N°:……/CSF/2018

POLYCOPIE DE COURS

Méthodes d'étude des populations et des peuplements végétaux

Auteur :
Fatma Zohra TCHAKER

Destiné aux étudiants de

Discipline : Ecologie

Spécialité : Ecologie et environnement, …

Niveau : 3éme année licence,

Année: 2020/2021
Approuvé par le Conseil Scientifique de la Faculté en date du:25-12-2020

Avant propres

Intitulé de la Licence: Ecologie et environnement
Semestre: 5
Unité d'enseignement méthodologies
Matière: Méthodes d'étude des populations et des peuplements végétaux
Crédits: 3
Coefficient: 2
Volume horaire semestriel: 45h00 (Cours et TD)

Objectifs de l'enseignement

Ce module permet d'étudier les stratégies d'échantillonnage et d'analyse des données à différentes échelles de perception et la dynamique des populations

Pré-requis:

Pour pouvoir tirer le maximum de ce cours, il faut avoir des connaissances sur:

- Écologie (Facteurs abiotique et biotique)
- Climatologie (Expressions numériques, Graphiques et diagrammes des données climatiques,...)
- Pédologie.
- La végétation (intérêts du modèle botanique) et le milieu.
- Les statistiques (Maitrise du logiciel de bureautique, Utilisation des logiciels,.....).

Ce polycopié peut être destiné à d'autres spécialités de Licence (Foresterie, Production et biotechnologie végétale, protection végétale…) ou à toutes personnes désirant acquérir des connaissances de base sur les bonnes pratiques en échantillonnage.

Contenu de la matière

Chapitre I. La végétation et le milieu

I.1. Matériel végétal…….. 06
I.1.1. Notion d'espèce…… 06
I.1.2. Notion de flore ……. 07
I.1.2.1. Définition…….. 07
I.1.2.2. Cortège floristique……. 08
I.1.2.3. Principaux types de flores……. 08
I.1.3. Notion de végétation …… 10
I.1.3.1. Définition…….. 10
I.1.3.2. Types et spectres biologiques……... 11
I.1.3.2.1. Définition des types biologiques……. 11
I.1.3.2.2. Typologie standard……... 12
I.1.3.2.3. Le spectre biologique …….. 16
I.1.3.2.3.1. Spectre biologique brut……. 17
I.1.3.2.3.2. Spectre biologique net……... 17
I.1.3.3. Formation végétale…… 17
I.1.3.3.1. Définition ……. 17
I.1.3.3. 2. Classification…… 18
I.1.3.3. 2.1. Formations végétales « pures »……. 18
I.1.3.3.2.2. Formations végétales « complexes » 20
I.1.3.3.3. Types de formations……. 22
I.2. Homogénéité et structuration…… 23
I.2.1. Définition de l'homogénéité…….. 23
I.2.2. Elément structuraux ……. 23
I.2.3. Structure de la végétation…….. 24
I.2.3.1. Structure verticale……. 24
I.2.3.1.1. Stratification……. 24
I.2.3.1.2. Natalité et mortalité ……. 25
I.2.3.1.3. Fluctuation des populations…….. 26
I.2.3.2. Structure horizontale…… 26
I.2.3.2.1. Abondance-dominance…… 26
I.2.3.2.2. Sociabilité…… 28
I.2.3.2.3. Fréquence …….. 28
I.2.3.2.4. Distribution…….…… 29
I.2.3.3. Zonation en altitude et Etage de végétation…… 30
I.2.3.3.1. Définition…… 31
I.2.3.3.2. Etages de végétation de la région méditerranéenne 32
I.3. Milieu…….. 33
I.3.1. Nomenclature des facteurs écologique …… 34
I.3.2. Plantes et milieu ……... 35
I.3.2.1. Facteurs climatique……... 35
I.3.2.1.1. Lumière…… 35
I.3.2.1.2. Température……. 36
I.3.2.1.3. Pluviométrie et hygrométrie……. 36

I.3.2.2. Facteurs édaphique…… 37
I.3.2.4. Facteurs biotiques…… 37
I.3.2.5. L'action destructrice de l'homme…… 37

Chapitre II. Echantillonnage

II.1. Notions de base et terminologie…….. 39
II.1.1. Echantillonnage…… 39
II.1.2. Elément ou unité d'échantillonnage…….. 39
II.1.3. Échantillon…… 39
II.1.4. Qu'est-ce qu'un bon échantillon?..... 40
II.1.5. Unité (ou individu) statistique…….. 40
II.1.6. Population……. 40
II.1.6.1. Population cible……. 40
II.1.6.2. Population statistique…… 41
II.1.7. Choisir le plan d'échantillonnage…….. 42
II.1.8. Définir le nombre d'échantillons……... 42
II.2. Principes généraux……... 42
II.2.1. Classification des descripteurs……... 42
II.2.1.1. Définition des descripteurs (variables)……. 42
II.2.1.2. Classification……... 43
II.2.1.2.1. Variable quantitative……. 43
II.2.1.2.2. Variable qualitative…….. 44
II.2.1.2.3. Variable semi-quantitative (ou qualitative ordonnée)…. 44
II.2.1.2.4. Variable complexes ou synthétiques……. 44
II.2.2. Choix des descripteurs……. 44
II.2.3. Echelles d'observation……. 45
II.3. Types d'échantillonnages……. 45
II.3.1. Échantillonnage non probabilistes ou subjectif……. 45
II.3.2. Échantillonnage probabiliste…… 46
II.3.2.1. Échantillonnage stratifié……. 46
II.3.2.1.1. Définition …… 46
II.3.2.1.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages 47
II.3.2.1.3. Avantages et inconvénients ……. 48
II.3.2.2. Échantillonnage aléatoire……. 49
II.3.2.2.1. Définition …… 49
II.3.2.2.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages ……... 49
II.3.2.2.3. Avantages et inconvénients…….. 51
II.3.2.3. Échantillonnage systématique……... 51
II.3.2.3.1. Définition…… 52
II.3.2.3.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages ……... 56
II.3.2.3.3. Avantages et inconvénients…….. 57
II.3.2.4. Analyse exhaustive……... 57
II.3.2.5. Échantillonnage progressif…… 58
II.3.2.6. Échantillonnage mixte……... 58
II.3.3. Différentes techniques de relevés……. 58
II.3.3.1. L'aire minimale…… 58

II.3.3.2. Transects…… 60
II.3.3.3. Quadrats …… 62

Chapitre III. Traitement des données

III.1. Structure des données écologiques…….. 65
III.2. Méthodes statistiques d'analyses multivariées…… 65
III.2.1. Méthodes d'ordination ……..... 66
III.2.1.1. Analyse en Composantes Principales ACP…….. 67
III.2.1.2. Analyse Factorielle des Correspondances AFC…… 67
III.2.2. Méthodes de classification…… 67
III.3. Analyse différentielle……..... 68
III.3.1. Définition ……..... 68
III.3.2. Coefficients de similitude…… 68
III.3.3. Dendrites…….. 69
III.4. Analyse fréquentielle…….. 70

Chapitre IV. Classification des types de végétation

IV.1. Méthodes physionomiques…….. 72
IV.2. Méthodes dynamiques…….. 73
IV.3. Méthodes Phytosociologiques…… 73
IV.3.1. Définition…… 73
IV.3.2. Phytosociologie dynamico-catenale……. 73
IV.3.3. Symphytosociologie et la géosymphytosociologie…….. 74
IV.3.3.1. Phytosociologie dynamique ou symphytosociologie …… 74
IV.3.3.2. Phytosociologie paysagère ou géosymphytosociologie……. 75

Chapitre V. Approches méthodologiques d'aménagement sur des bases écologiques.

V.1. Principes généraux…….. 75
V.1. 1. Définition…….. 75
V.1. 2. Objectifs …….. 75
V.2. Standard écologique…… 76
V.3. Différences avec les autres méthodes…… 79
V.3.1. Réhabilitation…… 80
V.3.2. Réaffectation…… 81
V.3.3. Rajeunissement…… 81

Références bibliographies …… 83

CHAPITRE I. LA VEGETATION ET LE MILIEU

L'étude de la flore de chaque région est utile dans la maîtrise des problèmes écologiques à l'instar de la protection biologique et la gestion des ressources naturelles. Les formes biologiques des plantes dépendent du caractère génétique aussi bien que des facteurs environnementaux, parce que l'environnement peut avoir des effets indéniables sur la formation de différentes formes critiques des plantes. La topographie diversifiée, la géologie, la variabilité spatiale et temporelle du climat en Afrique aurait créé une mosaïque de types de végétation distincts. Comprendre la réponse des communautés végétales à des modifications des conditions environnementales peut donc permettre de prévoir les conséquences de ces modifications sur des processus comme la productivité primaire. Cela peut avoir un grand intérêt en termes de gestion de l'environnement dans la mesure où ces processus influencent les services rendus par les écosystèmes sur le plan environnemental.

I.1. Le matériel végétal

La couverture végétale qui protège et stabilise le sol ne doit pas être considérée comme une couche inerte, mais bien au contraire comme un milieu vivant, dynamique, et en constante évolution sous l'influence de multiples paramètres tels que le climat, les conditions édaphiques, topographiques, les compétitions intra et extra-spécifiques .... Ainsi, l'implantation artificielle d'une végétation dans un milieu donné n'est pas sans conséquences sur son environnement. Bien que ponctuelle, une opération de végétalisation doit donc, dès le départ, prendre en compte l'évolution future des plantes mises en place.

I.1.1. Notion d'espèce

En 1583, **Césalpin,** philosophe, médecin, botaniste et naturaliste, utilise la notion d'espèce pour classer ses plantes. Pour lui, les plantes qui se ressemblent dans leur totalité font partie en général de la même espèce.

Charles Bonnet, naturaliste suisse, en 1740, définit une espèce par une combinaison de caractéristiques morphologiques (= liées à l'aspect), physiologiques (= liées au fonctionnement de l'organisme) et éthologiques (= liées au comportement).

En 1798, Georges **Cuvier** propose sa définition de l'espèce : est la collection de tous les individus issus de parents communs et de tous ceux qui leur ressemblent autant qu'ils se ressemblent entre eux".

D'après **Mayr** (1942), L'espèce est constituée par des groupes de populations naturelles potentiellement ou réellement interfécondes et isolées quant à la reproduction de tout autre groupe semblable. D'après **Mayr**, les espèces sont des groupes de populations actuelles capables d'inter-croisement et qui sont reproductivement isolés d'autres groupes semblables.

Cuénot précise que l'espèce est une réunion d'individus apparentés, ayant une même morphologie héréditaire, même caractère physionomique, un genre de vie commun, une aire géographique définissable, séparée des groupes voisins par une barrière généralement d'ordre sexuelle".

L'espèce est la collection de tous les êtres organisés descendus l'un de l'autre ou de parents communs et s'y éteignent en relation avec le déroulement de la succession ou avec l'arrivée de nouvelles perturbations. La définition de l'espèce est basée essentiellement sur la comparaison des caractères morphologique, sur les caractères liée à l'interfécondité, sur les caractères héréditaires des formes et sur les rapports des espèces avec les conditions de milieu.

La principale difficulté réside dans la limite des variations de caractères qui différencient les caractères individuels des caractères héréditaire.

Donc on peut définir la notion d'espèce à deux niveaux :

- **Sens biologique:** ensemble de populations effectivement ou potentiellement interfécondes dans les conditions naturelles et sexuellement isolées des autres populations ;

- **Sens taxonomique :** unité fondamentale dans la classification taxonomique qui distingue les grandes unités suivantes : règne, embranchement, classe, ordre, famille, genre et espèce.

Ces deux notions se recoupent la plupart du temps.

I.1.2. Notion de flore

I.1.2.1. Définition

La flore correspond à l'ensemble des espèces végétales vivant dans un même espace géographique à une période donnée. Le terme ne doit pas être confondu avec la végétation. La végétation est l'une des caractéristiques majeures de la biogéographie et se définit comme étant l'ensemble des communautés végétales renfermant la flore qui consiste en une liste de toutes les espèces végétales d'une région donnée. « C'est la masse végétale, l'ensemble des plantes considérées dans leurs rapports avec le milieu, le climat, le sol et les êtres vivants y compris l'homme ».

La flore d'une région est la liste des unités taxonomique, des taxons, des espèces qui composent cette région. La flore exprime ainsi principalement le résultat actuel de l'histoire des taxons, de leur variation et leur déplacement à la surface du globe.

La flore d'une région comporte des espèces considérées comme **indigènes** (ou natives ou autochtones) et des espèces **introduites** (ou étrangères ou exotiques). Les plantes introduites sont de quatre catégories: naturalisées, adventices, sub-spontanées et cultivées.

I.1.2.2. Cortège floristique

C'est l'ensemble d'espèces caractérisant un territoire donné : cortège méditerranéen…; il peut être décomposé en éléments : élément méditerranéen oriental, élément occidental.

La corrélation entre aires des espèces constituant un cortège floristique est dû à des raisons écologiques et paléo écologiques : ainsi, les espèces méditerranéennes sont réunies car elles ont une adaptation commune au même climat d'une part et d'autre part car elles sont issues d'un fond floristique existant depuis longtemps dans cette région.

Gaussen a proposé d'appeler cortège ou élément méditerranéen : l'ensemble des espèces adaptées au climat méditerranéen et qui ne peuvent dépasser ses limites et en revanche cortège ou élément mésogeen: l'ensemble d'espèces de souche géographique méditerranéenne mais ayant acquis une aire plus vaste et sont susceptibles d'exister en conditions subméditerranéennes ou même tempérée'' centre-européennes'' entre autres.

Ex : *Cortège méditerranéen : chêne vert, pistachier, caroubier, arbousier, genévrier, pin d'Alep, romarin…..

I.1.2.3. Principaux types de flores

- **Plante indigène ou autochtone**

Les plantes indigène sont des espèces végétales qui se développent naturellement à l'état sauvage, sans intervention intentionnelle de l'homme sur le territoire considéré (= qui pousse toute seule). La spontanéité d'une espèce dans certaines stations est difficile à déterminer : cela reste parfois incertain et est source de confusion. Les plantes indigènes constituent le « fond de la flore » du territoire considéré. Elles peuvent coloniser des milieux naturels, semi-naturels ou secondaires (fabriqués par l'homme).

- **Plante naturalisée**

Est une plante étrangère, introduite fortuitement ou volontairement, mais bien installée, c'est-à-dire se propageant comme une plante indigène et persistante dans plusieurs de ses stations. Parmi les espèces naturalisées d'un territoire, on considère comme envahissantes (ou invasives) celles qui, "par leur prolifération dans les milieux naturels ou semi-naturels, y produisent des changements significatifs de composition, de structure et/ou de fonctionnement des écosystèmes". Les invasions biologiques seraient la troisième cause

d'appauvrissement de la biodiversité, les deux premières causes étant la modification du climat et la destruction des milieux.

- Les espèces naturalisées anciennement introduites→ **Archéophyte**
- Les espèces naturalisées nouvellement introduites→ **Néophyte**

❖ **Plante Adventice**

Espèce végétale étrangère à la flore indigène d'un territoire dans lequel elle est accidentellement introduite et peut s'installer. Autrement, un **Adventice est une** plante qui pousse spontanément dans les milieux modifiés par l'homme, qu'elles soient autochtones ou originaires d'autres continents.

❖ **Plante Sub-spontanée**

Est une plante étrangère, d'abord cultivée dans les jardins, les parcs ou les champs, puis s'échappant de ces espaces mais ne se mêlant guère à la flore indigène et ne persistant généralement que peu de temps. Son installation dans les milieux naturels est encore précaire.

❖ **Plante Cultivée**

Est une plante faisant l'objet d'une culture intentionnelle, pour des buts variés: agriculture, horticulture, production de bois, ornement, intérêts médicinal ou apicole, protection des sols… Ces plantes sont volontairement introduites dans les champs, les jardins, les prairies et forêts artificielles, les villes, les bords de routes…

❖ **Plante cosmopolites**

Végétaux à grande répartition géographique ; roseau, ortie, morelle noire, bourse à pasteur….aussi, la végétation des eaux continentales « douce et saumâtre » est cosmopolite car ces milieux sont homogènes et les espèces aquatiques ont un grand pouvoir de multiplication.

❖ **Plante Ubiquistes**

Espèces capables d'occuper des milieux très différents du point de vue écologique.

❖ **Plante Endémiques**

Espèces dont l'aire de répartition est entièrement comprise à l'intérieur des limites territoriales ; elles ne se répartissent pas au hasard mais existent dans des régions dont la flore a été relativement isolée (îles, désert, hauts sommets de montagne); ainsi, l'isolement géographique « brusque variation des conditions du milieu» entrainant une fragmentation de l'aire globale, et chaque partie de cette aire a alors ses propres conditions déclenchant des

adaptations différentes ; en plus, suite à l'isolement géographique, s'installe des barrières à l'interfécondité et au brassage génétique instaurant un isolement génétique.

I.1.3. Notion de végétation

I.1.3.1. Définition

La végétation est perçue comme une mosaïque d'unités à différents stades d'évolution et/ou occupant des habitats différents ... Les espèces colonisent successivement ces unités, s'y installent plus ou moins durablement et s'y éteignent en relation avec le déroulement de la succession ou avec l'arrivée de nouvelles perturbations.

La végétation est l'une des caractéristiques majeures de la biogéographie et se définit comme étant l'ensemble des communautés végétales renfermant la flore qui consiste en une liste de toutes les espèces végétales d'une région donnée.

La caractérisation de la végétation permet de "peindre l'aspect que donne à une contrée la distribution, le port, l'abondance ou la rareté des plantes qui en couvrent le sol". "C'est la masse végétale, l'ensemble des plantes considérées dans leurs rapports avec le milieu, le climat, le sol et les êtres vivants y compris l'homme".

La végétation est largement indépendante de la nature systématique des végétaux qui la composent. Par contre, elle est le reflet fidèle du milieu dans lequel elle vit. Deux végétations équivalentes, croissant dans un climat analogue, peuvent n'avoir aucune espèce en commun. Elles n'en seront pas moins apparentées et susceptibles de se remplacer mutuellement.

La végétation peut donc se caractériser de façon multiple, puisqu'il s'agit de considérer des ensembles structurés de végétaux. Les proportions respectives des différentes espèces n'en sont qu'un aspect. Le mode d'association, la répartition spatiale, mais aussi la taille, la morphologie des organes et des individus sont d'autres critères qui peuvent être tout aussi important à considérer.

L'organisation et le fonctionnement des végétations peuvent être appréhendés à différents niveaux hiérarchiques (Figure I.1):

- **l'individu**: dans les prairies la définition de l'individu physiologique n'est pas toujours facile. Celui-ci est généralement constitué d'un assemblage de modules de base ou talles pour les graminées. Le terme courant de "plante" rend assez bien compte de la notion d'individu, sauf pour les végétaux stolonifères ou rhizomateux pour lesquels les "individus" réels sont peu distinguables.

- **la population**: c'est "l'ensemble des individus de même espèce vivant sur un territoire donné".

- **la communauté**: c'est "l'ensemble des végétaux réunis sur une même surface". Elle est donc constituée d'individus de différentes espèces vivant en interaction dans un même environnement écologique. Les termes de phytocénose, de groupement, que nous n'employons pas, ont des significations voisines.

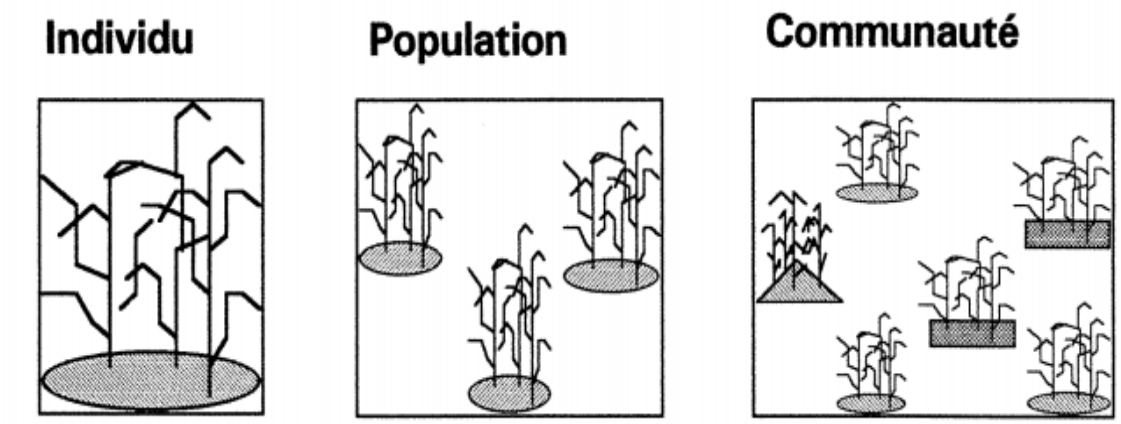


Figure I.1. Différents niveaux hiérarchiques de la végétation

I.1.3.2. Types et spectres biologiques

Plusieurs critères peuvent être employés pour classer les végétaux en fonction de leur type d'organisation morphologique et biologique:

❖ Selon **le milieu de vie**: on distingue des végétaux aérien (épiphytes), terrestres, vivant dans la vase (hélophytes) ou aquatique (hydrophytes);

❖ Selon **l'alimentation carbonée:** on distingue des végétaux autotrophes, hémiparasites, parasites, saprophytes ou symbiotiques;

❖ Selon **la durée de vie de la plante:** on distingue des végétaux annuels (thérophytes), bisannuel ou pérennes (vivaces);

❖ Selon **la hauteur** des **bourgeons de renouvellement** dans **la saison défavorable.** Dans ce cas, nous parlons de **types biologiques.**

I.1.3.2.1. Définition des types biologiques

Les types biologiques de Raunkiaër constituent l'une des caractéristiques très intéressantes de la végétation.

Les types biologiques ou formes biologiques qui désignent le comportement adaptatif de l'espèce. Elles renseignent sur le type de la formation végétale, son origine et ses

transformations. Selon Raunkiaer (1934), le type biologique d'une espèce végétale est défini par la situation des bourgeons qui survivent à la saison défavorable, par rapport au niveau du sol.

I.1.3.2.2. Typologie standard

Les végétaux sont classés selon leurs types biologiques déterminés par la morphologie générale de l'espèce, qui exprime son adaptation à l'environnement. Les cinq types biologiques de végétaux terrestres:

a) **Phanérophytes** (Ph), pour lesquels les bourgeons végétatifs persistants sont situés à l'extrémité de tiges ligneuses assez loin du sol ; selon la hauteur, on distingue:

- **Mégaphanérophytes** (MAPh) dont les tiges ligneuses dépassent 32 mètres;
- **Macrophanérophytes** (MPh), tiges ligneuses de 16 à 32 mètres;
- **Mésophanérophytes** (mPh), tiges ligneuses de 8 à 16 mètres;
- **Microphanérophytes** (mph), tiges ligneuses de 2 à 8 mètres;
- **Nanophanérophytes** (Nph), tiges ligneuses de 0.5 à 2 mètres.

Les subdivisions des Phanérophytes reposent sur le degré de protection des organes tendres vis-à-vis de la mauvaise saison. Parmi les caractères envisagés comme tels, Raunkiaer fait successivement état des suivants:

- Protection des bourgeons;
- Chute des feuilles avant la saison défavorable;
- Diminution de la taille des plantes;
- Adaptations xérophytiques en général.

b) **Chamaephytes** (Ch.), comprennent les végétaux dont les bourgeons ou les extrémités des pousses pérennantes sont situées à proximité du sol inférieur à 0,5 m, sur des rameaux rampants ou dressés.

La situation basse des organes persistants considère comme favorable pour assurer la protection des organes pérennants, par une couche de neige dans les pays froids, par les débris végétaux couvrant le sol dans les pays tempérés ou chauds. Dans les savanes des régions tropicales, cette disposition est également avantageuse, car elle assure une protection efficace entre les touffes plus ou moins denses des graminées. Cette situation constitue, de toute façon, un avantage, car il règne, à proximité du sol, même en saison sèche, un microclimat plus favorable que dans la biosphère exposée aux vents et à l'évaporation accentuée par la sécheresse.
Raunkiaer partage les chaméphytes en cinq sous-types principaux :

- **Chaméphytes suffrutescentes ou Herbes annuelles,** à ramification diffuse et dressée (CH f);

- **Chaméphytes rampantes,** branches décombrantes ne s'élevant guère au-dessus du sol (Ch. v);
- **Chaméphytes cespiteuses,** formant des touffes ou rosettes denses (Ch. c);
- **Chaméphytes en coussin,** croissance très compacte (Ch. p);
- **Chaméphytes bryoïdes,** mousses et lichens (Ch. m).

c) **Hémicryptophytes** (H), sont des plantes vivaces enracinées dont les pousses ou bourgeons de remplacement sont situés à la surface du sol. Normalement, chez les hémicryptophytes les plus parfaits, la pousse aérienne se dessèche complètement ou presque complètement durant la période défavorable. Les organes pérennants de ces plantes sont ainsi protégés dans le sol et leurs organes de rénovation sont abrités dans l'horizon Ao des pédologues, c'est-à-dire dans la couche de matières organiques en voie d'humification.

Le type hémicryptophyte présente également une grande diversité.

Braun-Blanquet (1928), à son tour, répartit les hémicryptophytes entre les sous-types suivants :

- **Hémicryptophytes cespiteux**, les bourgeons et les pousses sont protégés par des tuniques ou de véritables carapaces formées par les feuilles persistant en tout ou en partie et formant gaine autour des bourgeons et des jeunes axes de remplacement;
- **Hémicryptophytes rosettés**, plantes à feuilles étalées à la surface du sol, formant des rosettes, au moins temporaires, à assimilation souvent continue;
- **Hémicryptophytes scapeux**, dans ce type il se produit des pousses aériennes feuillées qui se détruisent plus ou moins complètement au cours de la mauvaise saison;
- **Hémicryptophytes grimpants**, ce sont des hémicryptophytes scapeux, mais à pousses aériennes dépourvues de rigidité et s'accrochant à un support.

d) **Cryptophytes** (C), pour lesquels ces bourgeons sont situés à l'intérieur du sol, et selon le type de sol les subdivisions suivantes sont reconnues:

d-1) Géophytes (G), sont des végétaux à pousses ou bourgeons persistants entièrement abrités, durant la mauvaise saison, sous une couche de terre d'épaisseur variable. Raunkiaer établissait une distinction entre géophytes proprement dits et hélophytes. Les géophytes sont des plantes de terre ferme, tandis que les hélophytes sont des cryptophytes palustres, à bourgeons persistants développés dans un sol imbibé d'eau et souvent recouvert par une nappe d'eau plus ou moins profonde.

Braun-Blanquet (1928) divise, à son tour, les géophytes de la manière suivante :

- **Eugéophytes:**
  - Géophytes bulbeux ou tubéreux;
  - Géophytes rhizomateux;

- Géophytes radicigemmes.

▪ **Géophytes parasites.** Végétaux parasites des racines dont les organes de persistance sont souterrains.

d-2) Hélophytes (Hé), quand ils sont dans un sol terrestre très humide comme de la vase. Les hélophytes sont des végétaux finissant par développer un appareil végétatif et reproducteur totalement aérien, mais en gardant leurs appareils souterrains dans un substrat vaseux gorgé d'eau. Certaines commencent leur cycle à l'état submergé alors que d'autres commencent d'emblé comme un végétal terrestre.

d-3) Hydrophytes (Hy), comprennent les plantes aquatiques dont les bourgeons persistants sont situés au fond de l'eau.
Braun-Blanquet (1928) partage ce type biologique en deux groupes :

- **Hydrophytes nageants:** plantes aquatiques flottantes ou faiblement enracinées;
- **Hydrophytes fixés:** plantes aquatiques fixées au substrat.

Ce sous-type est divisé à son tour par Koch (1928), de la manière suivante :

- **Hydrogéophytes:** Plantes aquatiques à rhizome;
- **Hydrohémicryptophytes:** Plantes aquatiques à bourgeons situés au ras de la vase, au fond de l'eau;
- **Hydrothérophytes:** Plantes aquatiques annuelles.

e) **Thérophytes** (T), végétaux herbacés annuels qui passent la mauvaise saison sous forme de graines et qui réalisent leur cycle entier en une année au maximum. Une grande diversité de comportement de ces « plantes annuelles». Certaines germent dès l'automne des régions tempérées, passent l'hiver à l'état de plantule, prennent un développement actif au cours du printemps et meurent durant la sécheresse estivale. D'autres ne germent qu'au printemps et leur cycle végétatif se termine en été. D'autres encore germent et se développent en tout temps et ne disparaissent qu'au cours des saisons défavorables. Nombreuses sont, parmi les plantes annuelles, celles qui développent plusieurs générations au cours de l'année.

Braun-Blanquet classe les thérophytes selon le comportement de la pousse aérienne. Il distingue les catégories suivantes :

- **Thérophytes érigés;**
- **Thérophytes prostrés;**
- **Thérophytes grimpants.**
- Müller (1933 *in* Parc national Albert) ajoute une quatrième catégorie, celle des **thérophytes à rosette.**

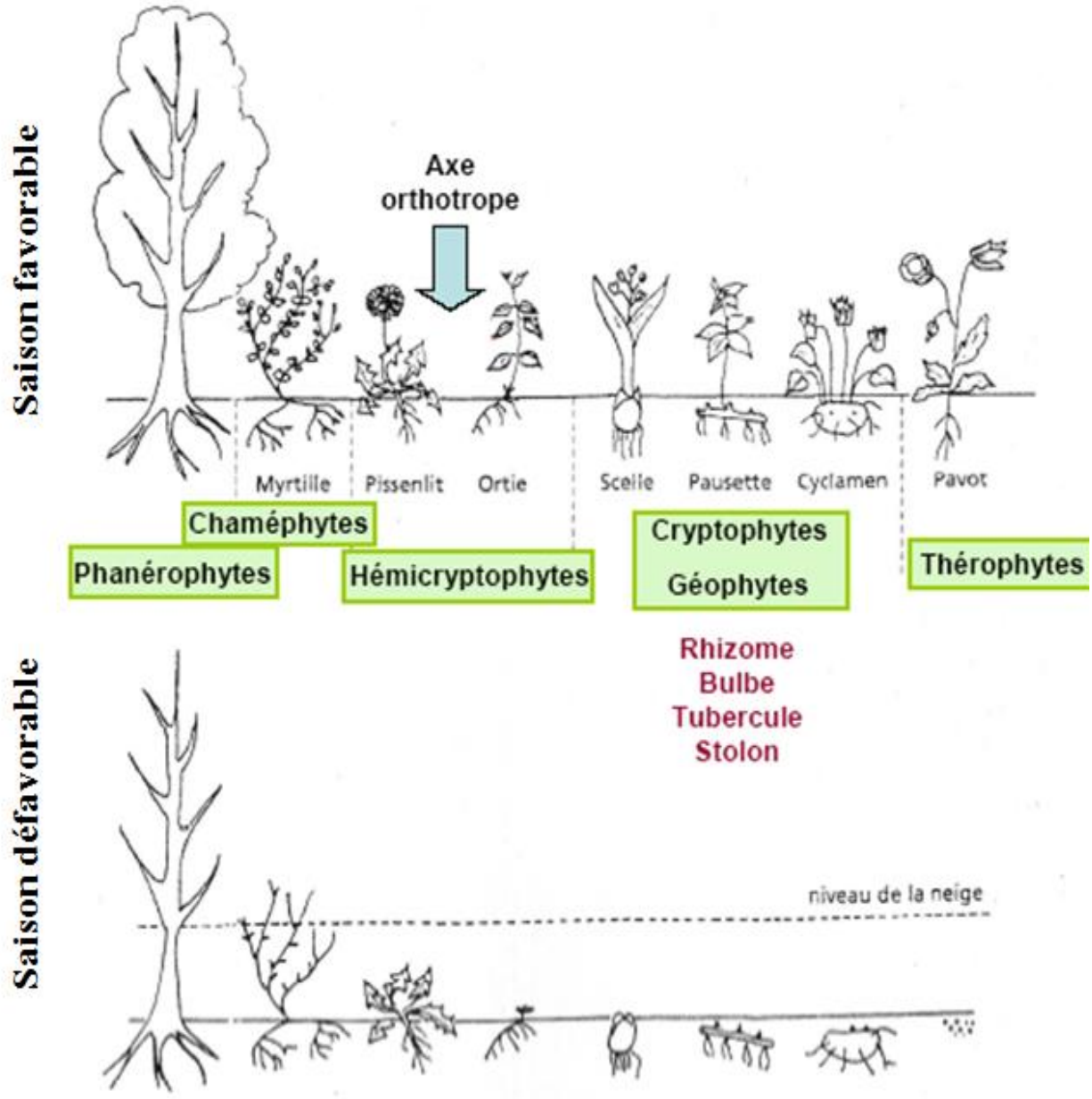


Figure I.2. Les différents types biologiques

Par le tableau I.1, nous avons essayé de récapituler les différents types biologiques existants.

Tableau I.1. Tableau récapitulatif de différents types biologiques

	Types biologiques	Caractères
Cormophytes terrestres	**Phanérophytes**	Plante ligneuse, bourgeons jusqu'à plus de 50 cm du sol. **Arbres, arbustes, arbrisseau, épiphytes.**
	Chaméphytes	Plante ligneuse, bourgeons entre 0 et 50 cm du sol **Arbres, arbustes nains rampants, sous arbrisseaux.**
	Hémicryptophytes	Pas de plante ligneuse, bourgeons au niveau du sol. **Herbacées bisannuelles et vivaces.**
	Cryptophytes (géophytes)	Pas de plante ligneuse, bourgeons sous la surface du sol. **Herbacées vivaces à bulbes, rhizomes, tubercules, ….**
	Thérophytes	Pas de plante ligneuse, pas de bourgeons hivernaux. **Herbacées annuelles.**
Cormophytes aquatiques	**Hydrohémicryptophytes**	Pas de plante ligneuse, bourgeons à la surface du substrat. **Herbacées vivaces aquatiques.**
	Hélophytes	Pas de plante ligneuse, bourgeons dans le substrat, tiges dépassant la surface de l'eau en période de végétation. **Herbacées vivaces aquatiques (Ex.: *Typha*).**
	Hydrogéophytes	Pas de plante ligneuse, bourgeons dans le substrat, tiges ne dépassant la surface de l'eau en période de végétation. **Herbacées vivaces aquatiques (Ex.: *Nymphea*).**
	Hydrothérophytes	Pas de plante ligneuse, pas de bourgeons hivernaux. **Herbacées vivaces aquatiques, nageâtes ou flottantes.**

I.1.3.2.3. Le spectre biologique

Le spectre biologique représente pour un groupement végétal donné la proportion des espèces suivant leur forme biologique : les Phanérophytes, arbres ou arbustes toujours bien visibles, les chaméphytes plus ou moins étalées sur le sol, les hémicryptophytes réduites pendant l'hiver à des bourgeons, les géophytes disparaissant sous terre pendant la mauvaise saison el les thérophytes ne subsistant que sous forme de graines.

Le spectre biologique est un spectre de diversité floristique qui ne dépend pas seulement du milieu mais aussi de l'histoire phylogénétique des taxa. Son seul intérêt

écologique est d'indiquer quels sont les types biologiques présents ou absents, c'est-à-dire quelle est sa composition qualitative.

L'analyse de la diversité biologique et phytogéographique a été facilitée par la réalisation de deux types de spectres : brut et pondéré.

I.1.3.2.3.1. Spectre biologique brut

Le spectre biologique brut est la richesse floristique d'une population. Il exprime le pourcentage du nombre des espèces appartenant aux divers types biologiques par rapport au nombre total des espèces de l'écosystème étudié.

Il s'exprime par la formule suivante:

$$SB = \frac{Fi}{N} \times 100$$

Où

- SB= Spectre brut d'une forme biologique données;
- Fi: Nombre de fois que les espèces d'une forme biologique données sont dans l'ensemble des relevés;
- N: Nombre total des espèces.

I.1.3.2.3.2. Spectre biologique net

Le spectre biologique net corrige le spectre biologique brut puisqu'il utilise les coefficients d'abondance-dominance (C.A.D.). On calcule la somme des C.A.D. pour chaque type biologique et par la suite on calcule les pourcentages des types biologiques à partir de la somme totale des C.A.D.

I.1.3.3. Formation végétale

I.1.3.3.1. Définition

La formation végétale est une notion importante puisqu'elle permet d'identifier la physionomie qui a un aspect de premier ordre pour comprendre le comportement et la dynamique des divers groupements végétaux.

Une formation végétale est un ensemble de végétaux, qui peuvent appartenir à des espèces différentes, mais qui présentent, pour la plupart, des caractères convergents dans leurs formes, et, parfois, dans leurs comportements. Elle est considérée comme un ensemble de végétaux formant une unité physionomique homogène. Cette analyse de la végétation sous l'angle physionomique et structural s'appuie sur des paramètres descriptifs précis. Il s'agit tout d'abord de la hauteur de la formation considérée qui peut être basse (une pelouse par exemple), moyenne (une garrigue) ou haute (une forêt). À l'intérieur de cette formation,

plusieurs niveaux ou strates peuvent être individualisés : strates herbacées, arbustives ou arborescentes. Cette structuration sera différente suivant qu'il s'agit d'espèces ligneuses (végétaux ligneux-bas, dont la hauteur est inférieure à 2 mètres ; végétaux ligneux-hauts, dont la hauteur est supérieure à 2 mètres) ou herbacées (les végétaux herbacés). À ces analyses de hauteur s'ajoutent des notions de taux de recouvrement (% d'espace occupé par une strate dans le sens horizontal) de densité, d'homogénéité permettant de différencier des formations ouvertes ou fermées, uniformes ou en mosaïque. Autrement, la formation végétale est basée sur la physionomie de la végétation exprimée qualitativement par une structure verticale (stratification) et quantitativement par une structure horizontale (recouvrement).

D'autres descriptifs viennent compléter ces caractères principaux : ils touchent parfois à la composition (feuillus ou conifères), au rythme de vie (caducifoliés ou sempervirents), voire à l'écologie (forêts sèches et forêts pluvieuses) etc. Devant cette multiplicité de paramètres, les noms usuels des formations végétales (pelouse, lande, prairie...) ont été complétés de qualificatifs permettant une meilleure individualisation (ex : forêt boréale de conifères).

Les espèces physionomiquement dominantes se regroupent en grands types de formations. Nous distinguerons les formations zonales qui sont en équilibre métastable en rapport avec les critères régionaux éco-climatiques et les formations azonales dont la genèse est étroitement conditionnée par les conditions écologiques locales, généralement pédologiques.

I.1.3.3. 2. Classification

I.1.3.3. 2.1. Formations végétales « pures »

On distingue les formations pures des formations complexes. Une formation sera dite **pure** lorsque les végétaux qui la constituent se rattachent massivement à une des trois formes: ligneux haut, ligneux bas, herbacés; on aura donc:

- Les **formations ligneuses hautes** dans lesquelles les ligneux hauts, donc de plus de deux mètres; ont un recouvrement global supérieur à 50 % ;

- **Les formations ligneuses basses** où les ligneux bas ont un recouvrement global supérieur à 10 % tandis que celui des ligneux hauts est inférieur à 25 % et celui des herbacés inférieurs à 10 % ;

- **Les formations herbacées** où les végétaux herbacés ont un couvert supérieur à 10 %, le recouvrement global des ligneux hauts étant inférieur à 25 % et celui des ligneux bas à 10 %.

Parmi les formations ligneuses hautes, les sous-types suivants peuvent être distingués:

- Les formations ligneuses hautes **denses** lorsque le recouvrement des ligneux hauts est supérieur à 90 %;

- Les formations ligneuses hautes **peu ouvertes** avec des recouvrements compris entre 75 et 90 % (Figure I.3.);

- Les formations ligneuses hautes **ouvertes** ou **assez claires** où le recouvrement des ligneux hauts est compris entre 50 et 75 % (Figure I.4.);

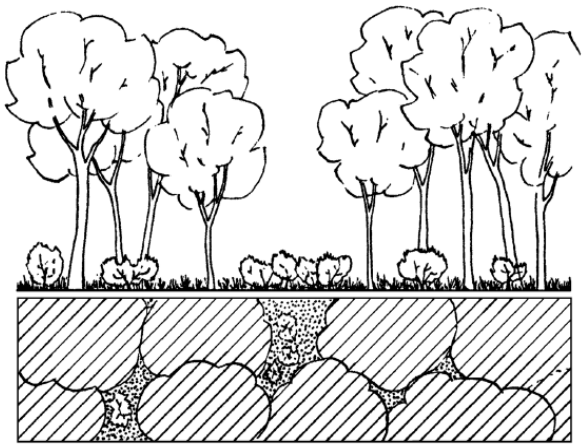


Figure I.3. Schéma des formations ligneuses hautes peu ouvertes.

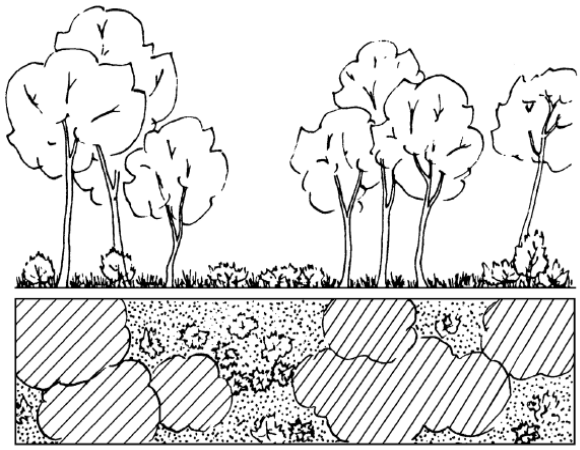


Figure I.4. Schéma des formations ligneuses hautes ouvertes.

- Les formations **ligneuses hautes très claires** sont un cas particulier où il y a entre 25 et 50 % de ligneux-hauts et moins de 10 % de ligneux bas et d'herbacés (Figure I.5.).

- Les formations à **végétation très claire ou nulle** comportent moins de 25 % de ligneux hauts, moins de 10 % de ligneux bas et moins de 10 % d'herbacés.

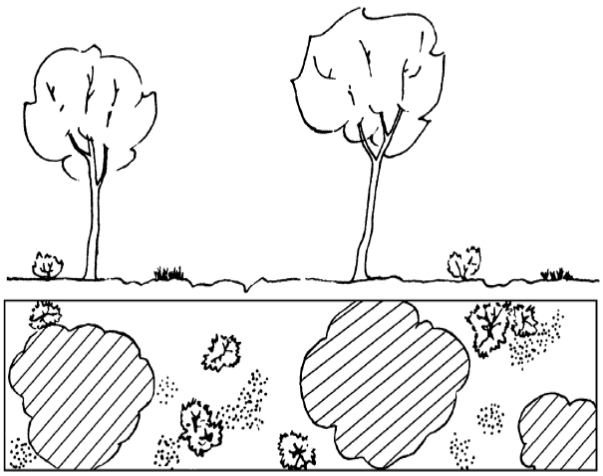


Figure I.5. Schéma des formations ligneuses basses : moins de 50% de ligneux hauts, plus de 10% de ligneux bas et moins de 10 % d'herbacées

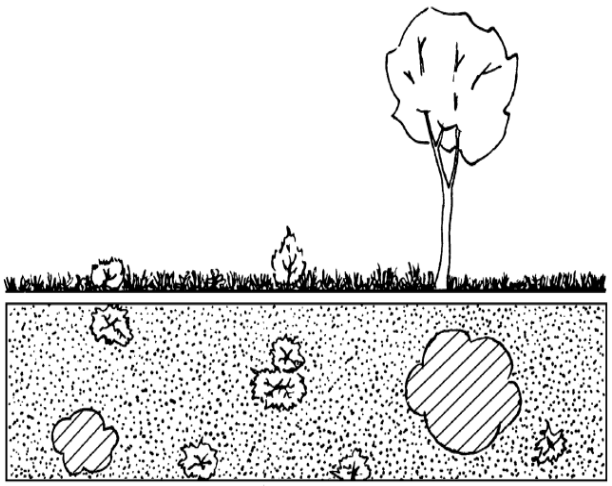


Figure I.6. Schéma des formations herbacées: moins de 25% de ligneux hauts, moins de 10% de ligneux bas et plus de 10 % d'herbacées

I.1.3.3.2.2. Formations végétales « complexes »

Une formation sera dite **complexe** lorsque les végétaux qui la constituent se rattachent à deux ou trois formes ; on aura:

- Les **formations ligneuses complexes** comportent de 25 à 50 % de ligneux hauts, de10 à 100 % de ligneux bas et moins de 10 % d'herbacés ; elles peuvent être ouvertes ou fermées selon le recouvrement global des ligneux (Figure I.7.);

- Les **formations complexes herbacés-ligneux bas** où les ligneux hauts ont un recouvrement inférieur à 25 % ; les herbacés et les ligneux bas ont un recouvrement compris entre 10 et 100 % (Figure I.8.);

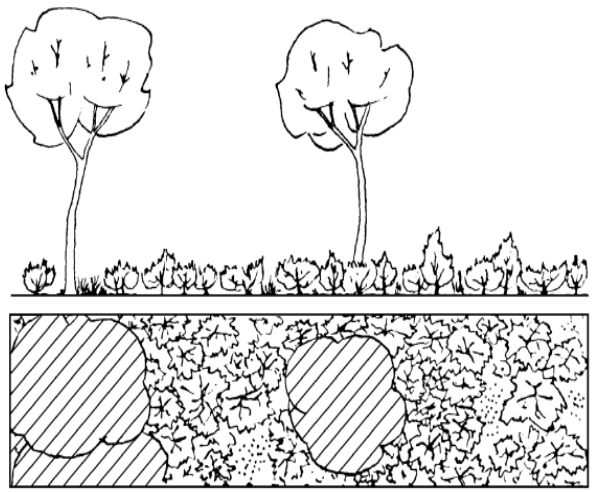


Figure I.7. Schéma des formations complexes ligneux hauts / ligneux bas.

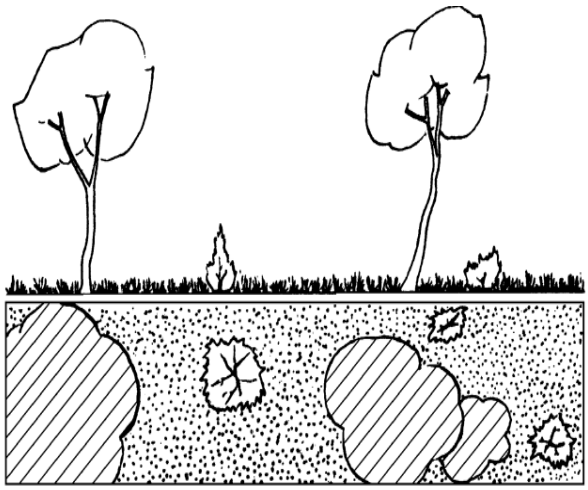


Figure I.8. Schéma des formations complexes ligneux hauts / herbacés.

- Les **formations complexes herbacés-ligneux hauts** où ces derniers ont un recouvrement compris entre 25 et 50 %, il y a moins de 10 % de ligneux bas et plus de 10 % d'herbacées (Figure I.9.);

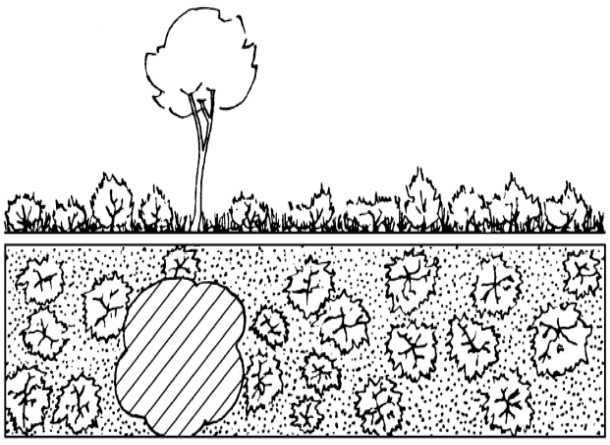


Figure I.9. Schéma des formations complexes ligneux bas / herbacés

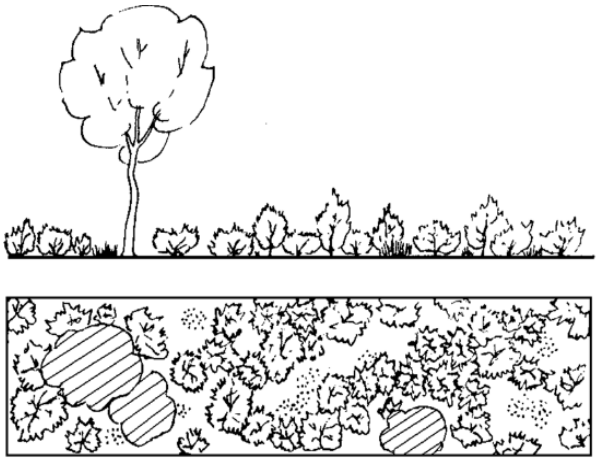


Figure I.10. Schéma des formations complexes ligneux hauts / ligneux bas / herbacés

- Les **formations complexes herbacées-ligneuses bas-ligneuses** hauts dans lesquelles le recouvrement des ligneux hauts est compris entre 25 et 50 %, ceux des ligneux bas et des herbacés étant supérieur à 10 % (Figure I.10.).

Les différentes formations sont ordonnées les unes par rapport aux autres sur le schéma de la figure suivante.

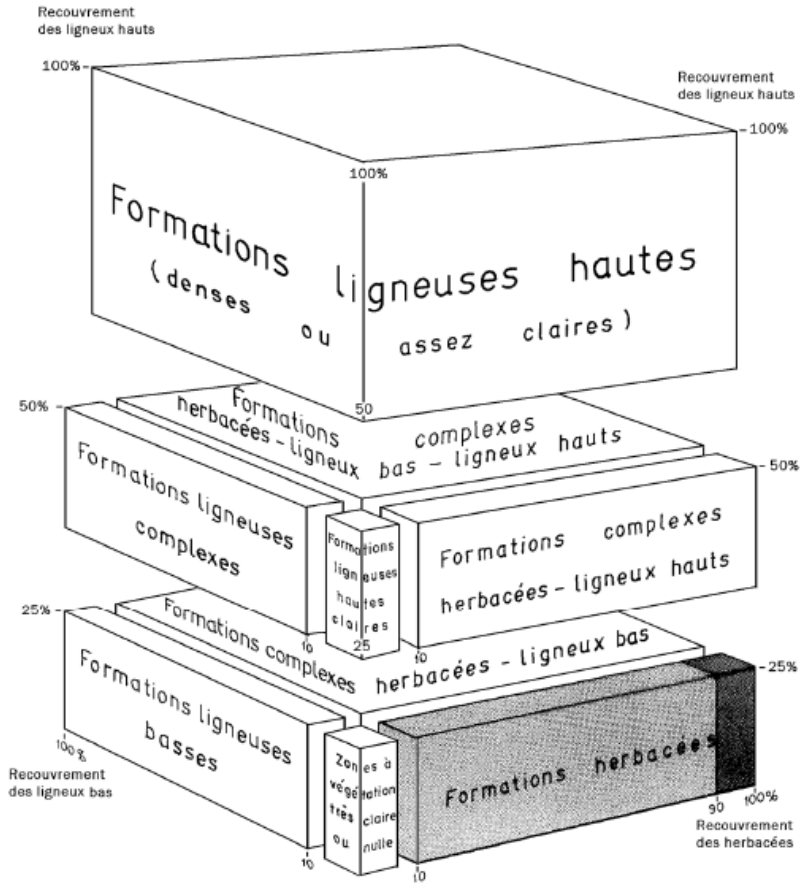


Figure I.11. Organisation tridimensionnelle des formations végétales

Le degré d'ouverture des trois strates ligneuses haute, basse et herbacée ; peut classer en référence à l'échelle suivante :

- **fermé** avec un recouvrement global supérieur à 90 %;
- **peu ouvert** pour des recouvrements compris entre 75 et 90 %;
- **semi-ouvert** pour des recouvrements compris entre 50 et 75 %;
- **ouvert** pour des recouvrements compris entre 25 et 50 %;
- **très ouvert** pour des recouvrements compris entre 10 et 25 %;
- **extrêmement ouvert** pour des recouvrements compris entre 0 et 10 %;
- **totalement ouvert** recouvrement global nul, la strate est absente.

I.1.3.3.3. Type de formations

Les spectres biologiques des communautés végétales, qui reflètes globalement ou de manière plus précise leur physionomie, mais aussi leur structure, servent de base à la reconnaissance des grands types de formations, classés d'après la prédominance d'un ou plusieurs types biologiques.

Les principaux types de végétation et leur classification sont basés sur des critères tels que la répartition horizontale, verticale et la densité des individus. Le tableau suivant présent les principales formations du globe avec leurs caractéristiques et leur déterminisme climatique.

Tableau I.2. Principales formations végétales

Type biologique ou groupe systématique dominant	Principales formations	Climat	Caractères généraux
Arbres (Phanérophytes de taille supérieure à 10 m)	Forêt feuillue caducifoliée	Tempéré ou tropical sec	Essences à feuilles caduques
	Forêt feuillue sempervirente	Equatorial ou subtropical humide	Essences à feuilles persistantes
	Forêt sclérophylle	Méditerranéen	Essences à feuilles sempervirentes petites et coriaces
	Forêt résineuse	Subpolaire ou subalpin	Essences à feuilles en forme d'aiguille, persistantes ou caduques
Arbustes (Phanérophytes de 2 à 10 m), Arbrisseaux (Nanophanéro-phytes de 25 cm à 2 m) Chaméphytes	Lande	Tempéré océanique	Formation dense, à base d'Ericacées ou de Légumineuses
	Garrigue	Méditerranéen	Végétation clairsemée, sclérophylle, sur terrain calcaire
	Maquis	Méditerranéen	Formation impénétrable, sclérophylle, sur terrain siliceux
Plantes herbacées (Hémicryptophytes principalement)	Prairie	Variable	Formation dense d'herbes mésophiles ou hygrophiles
	Pelouse	Variable	Formation dense d'herbes rases, denses ou clairsemées
	Steppe	Continental ou semi aride	Formation clairsemée de Graminées xérophiles
	Savane	Tropical	Formation dense de hautes herbes, en général entretenue par le feu
Cryptogames (Mousses et lichens)	Tourbière	Très humide	Sur sol organique saturé d'eau
	Toundra	Polaire et alpin	Souvent en mélange avec des arbrisseaux nains

I.2. Homogénéité et structuration

I.2.1. Définition de l'homogénéité

Depuis que les botanistes ont commencé à étudier l'ensemble de la végétation, et non plus seulement les espèces prises isolément, ils ont porté leur attention sur l'homogénéité et sur la structure du tapis végétale. L'homogénéité floristique d'une station est une des notions fondamentales qui préoccupent particulièrement les phytosociologues. Elle est estimée ou appréciée au moyen de tests appelés «tests d'homogénéité». Parmi ceux-ci, les plus couramment utilisés sont les suivants : «l'Histogramme des fréquences» de Raunkiaer, la «Courbe Aire-espèces» et «l'Aire minimale», les «Coefficients de similitude», etc.

Le tapis végétal a souvent un aspect en mosaïque constitué par la répétition de motifs structuraux liés à des variations concomitantes de composition floristique quantitative et qualitative en fonction des caractères écologiques. L'homogénéité du tapis végétal ne peut exister que si la mosaïque est répétitive. L'homogénéité est généralement une question d'échelle. Les parties de la mosaïque qui semblent homogènes à une certaine échelle se révèlent en général avoir elles aussi une structure complexe si l'on passe à une échelle plus fine. L'existence de ces structures emboîtées implique qu'il y a des discontinuités plus ou moins nettes dans le tapis végétal, donc des niveaux privilégiés pour l'analyse de la végétation".

L'homogénéité floristique de végétation permet de définir les groupements végétaux ou les phytocénoses. Elle peut être appréciée, d'abord qualitativement, à l'estime, puis quantitativement, il partir des relevés effectués. Cette homogénéité floristique, à échelle stationnelle, n'exclut pas la présence d'une micro-hétérogénéité structurelle liée à la sociabilité des espèces ou à une mosaïque écologique. C'est ainsi que Rameau reconnaît la nécessité d'un compromis entre une *micro-hétérogénéité* négligeable et une *macro-hétérogénéité* déterminante. Cette macro-hétérogénéité se manifeste toujours entre deux phytocénoses adjacentes, tandis que la micro-hétérogénéité, qui apparaît à l'intérieur d'une phytocénose, est assez souvent le fait d'une structure en mosaïque. Ceci est particulièrement visible dans le cas des groupements forestiers.

L'homogénéité de la vegetation est liée à la disposition des individus végétaux les uns par rapport aux autres. Cette répartition spatiale est le fondement de la structure de la vegetation. Caractériser cette structure, revient à déterminer la place occupée par chacun des individus de chacune des espèces présentes.

I.2.2. Elément structuraux

Les éléments structuraux sont les différentes unités floristiquement, écologiquement et physionomiquement différenciées, dont l'imbrication plus au moins régulière constitue une

communauté végétale caractérisée plus au moins précisément par sa physionomie et sa structure, ainsi que sa composition floristique et son écologie.

I.2.3. Structure de la végétation

Godron, utilise le terme de structure pour désigner " la répartition spatiale des individus végétaux de la station". Les modules des individus, les individus, les populations d'une communauté ne sont pas disposées au hasard dans l'espace. Ils occupent souvent une place précise qui traduit une organisation sociale des plantes. La structure de la communauté est donc une image de son fonctionnement, en particulier des rapports de compétition pour la lumière et les nutriments. L'agencement spatial des individus des différentes espèces peut-être envisagé d'une part, selon un plan horizontal (sociabilité), et d'autre part selon un plan vertical (stratification).

I.2.3.1. Structure verticale

La structure verticale résulte de la répartition dans le plan vertical des systèmes aériens mais aussi souterrains des espèces composantes de la communauté. La structure verticale prend en considération la hauteur des peuplements végétaux. Elle est caractérisée par des attributs structuraux tels que la densité des plantes appartenant aux différentes strates. Une strate est alors définie comme l'ensemble des individus végétaux appartenant à la même classe de hauteur.

Cette organisation, ou stratification, reflète dans une large mesure la compétition entre ces diverses espèces tant pour l'espace que pour les éléments nécessaires à leur développement.

I.2.3.1.1. Stratification

L'association végétale est stratifiée, c'est-à-dire composée de végétaux de différentes tailles parmi lesquels on peut reconnaître plusieurs niveaux ou strates.

La stratification aérienne repos sur la distinction de niveaux successifs de répartition ou strates regroupant les végétaux d'un même type biologique ou d'une même classe de hauteur. Le degré de stratification est donc très largement fonction du spectre biologique de la communauté. Certaines communautés sont **monostrates** (**Exp**: les **Pelouses** ou les **Prairies**), d'autre **pluristrate** (**Exp**: les **forêts**).

La structure végétale peut être classée selon quatre grands types de strates:

- **Strate I: Mousses, lichens et champignons;**
- **Strate II: Plantes herbacées;**
- **Strate III: Arbustives;**
- **Strate IV : Arborescente.**

- **La strate muscinale (0 à 5 cm)**

Elle est composée de bryophytes (mousses et hépatiques), de lichens et de diverses plantes à port nain. On retrouve aussi les lianes, lorsque celles-ci sont rampantes, ainsi que des champignons.

- **La strate herbacée (5 à 80 cm)**

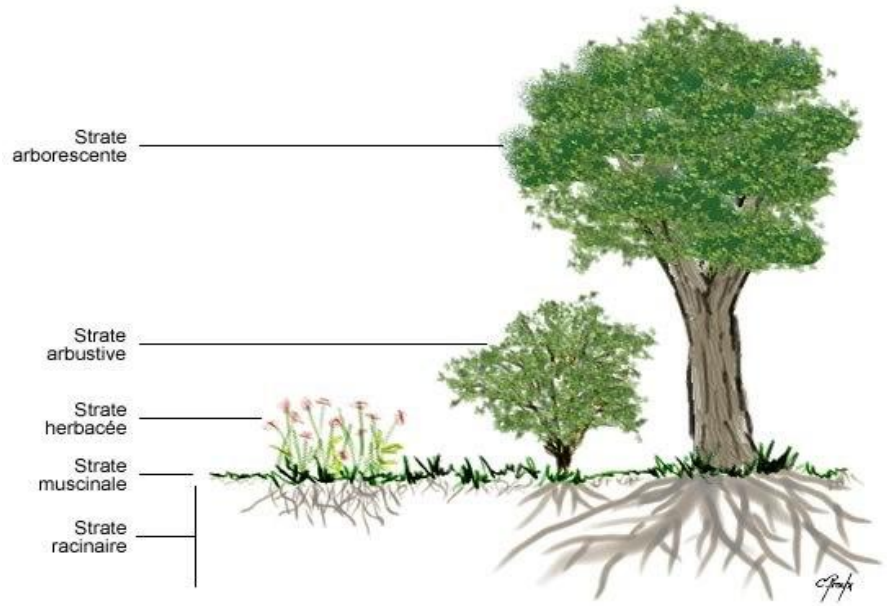
Elle est dominée par les végétaux herbacés (Exp: Poacées, cypéracées, plantes à fleurs, ptéridophytes,...), ainsi que par de petits ligneux **chaméphytes** (Exp: les bruyères, les airelles ou les myrtilles, les rhododendrons, le fragon faux-houx etc...). On retrouve dans cette strate une grande diversité de types biologiques : annuelles-thérophytes, bisannuelles, vivaces/géophytes (plantes à bulbes, tubercules, rhizomes), vivaces/hémicryptophytes (plantes à rosettes basales ou cespiteuses).

- **La strate arbustive (1 m à 8 m)**

Elle comprend soit les végétaux ligneux qui ne dépassent guère cette hauteur (houx, viornes, cornouillers, fusain d'Europe, poirier sauvage, buis, etc.), soit les jeunes arbres.

- **La strate arborée (au-delà de 8 m de hauteur)**

Les arbres adultes appartiennent à la strate arborescente ou arborée où l'on distingue alors clairement le tronc du houppier.



FigureI.12. Stratification verticale de la végétation

I.2.3.1.2. Natalité et mortalité

Le nombre d'individus naissant ou mourant dans la population pendant une unité de temps constitue le taux de natalité et le taux de mortalité. La différence entre les deux taux donne le taux de croissance de la population (s'exprime par la courbe de croissance).

I.2.3.1.3. Fluctuation des populations

La courbe de croissance d'une population passe par un niveau maximal, ensuite cette population peut évaluer en 4 directions:

- Se maintenir au même niveau;
- Augmentation lentement;
- Décliner;
- fluctuer.

I.2.3.2. Structure horizontale

La structure horizontale d'une communauté s'exprime l'agencement et la répartition des individus suivant le plan horizontal ; cette répartition se traduit principalement par la densité. La densité d'une population exprime le nombre d'individus présents par unité de surface ou de volume au moment considéré. Parmi les méthodes d'évaluation de densité, on distingue: l'abondance-dominance, la sociabilité, la fréquence et la distribution.

I.2.3.2.1. Abondance-dominance

C'est une expression de l'espace relatif occupé par l'ensemble des individus de chaque espèce, espace qui est déterminé à la fois par leur nombre et par leurs dimensions. L'idée qui se présente spontanément est d'évaluer séparément ces deux éléments.

i. Abondance

Elle exprime le nombre approximativement des individus de chaque espèce, entrant dans un relevé d'association, par unité de surface ou de volume. Elle exprime par une échelle de 5 classes:

- r : individus très rares et leur recouvrement est négligeable;
- + : individus rares et recouvrement très faible ;
- 1 : individus peu ou assez abondants, mais de recouvrement faible < 1/20 de la surface ;
- 2 : individus abondants ou très abondants, recouvrant 1/20 à ¼ de la surface ;
- 3 : nombre d'individus quelconque, recouvrant de ¼ à ½ de la surface ;
- 4 : nombre d'individus quelconque, recouvrant de ½ à ¾ de la surface ;
- 5 : nombre d'individus quelconque, recouvrant plus de ¾ de la surface.

ii. Dominance: degré de recouvrement

Elle est appréciée par le volume occupé ou par la surface couverte par l'ensemble des individus de l'espèce considérée dans la surface étudiée. Autrement dit c'est la projection

horizontale de l'appareil aérien de l'ensemble des individus de même espèce par rapport a la surface totale considérée.

Les phytosociologues estiment conjointement les 2 caractères abondance-dominance car ils sont très liés l'un au l'autre: Une espèce de petite taille devra être représenté par de nombreux individus pour avoir un certain degré de couverture. Une espèce de grande taille donnera le même degré de couverture avec un seul individu arborescent.

Donc la *dominance* concerne elle les relations existant entre ces individus et la dominance de certains par rapport aux autres. C'est pour cela qu'on parle de coefficients d'abondance-dominance car ceux-ci traitent ces deux aspects à la fois.

Échelle des coefficients d'abondance-dominance de Braun-Blanquet :

- **5**: recouvrement de l'espèce > 3/4 de la surface de référence (> 75 %) ;
- **4**: recouvrement de l'espèce entre 1/2 et 3/4 (50 à 75 % de la surface de référence) ;
- **3**: recouvrement de l'espèce entre 1/4 et 1/2 (25 à 50 % de la surface de référence) ;
- **2**: recouvrement de l'espèce entre 1/20 et 1/4 (5 à 25 % de la surface de référence) ;
- **1**: recouvrement de l'espèce < 1/20, ou individus dispersés à couvert jusqu'à 1/20 (5 %) ;
- **+**: peu d'individus, avec très faible recouvrement ;

Deux autres symboles sont parfois utilisés :

- **r** : espèce rare ;
- **i** : espèce représentée par un individu isolé.

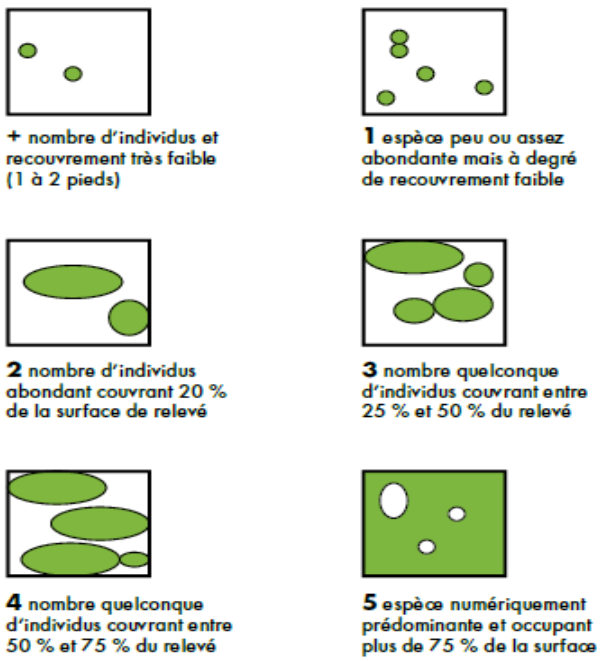


Figure I.13. Échelle d'abondance-dominance (Braun-Blanquet)

I.2.3.2.2. Sociabilité

Un coefficient de sociabilité est ajouté au coefficient d'abondance-dominance. Il sert a caractériser la disposition des espèces les uns par rapport aux autres.

- 5: Individus formant des peuplements denses
- 4: Individus formant de petites colonies
- 3: Individus formant des groupes
- 2: Individus formant de petits groupes
- 1: Individus isolés

C'est une nation assez facile à appliquer lorsqu'il s'agit de plantes de petites tailles à tiges simples. Pour les arbrisseaux et les arbres on tient compte de la ramification plus ou moins diffuse.

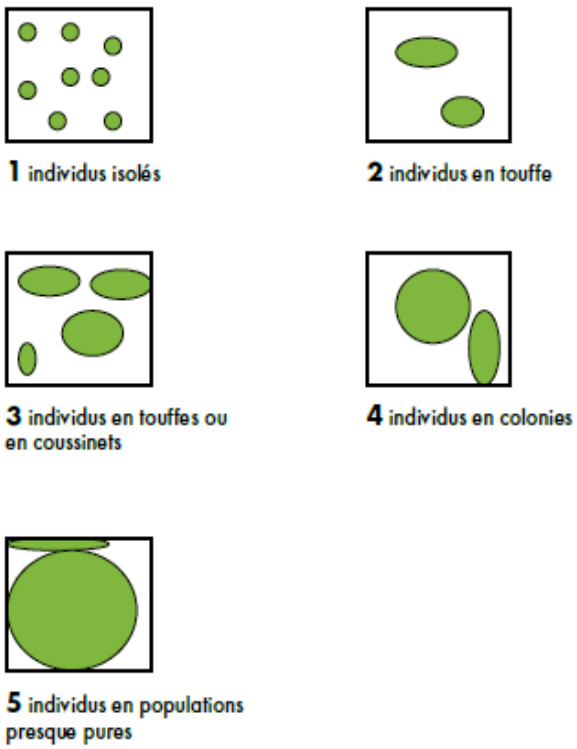


Figure I.14. Échelle de sociabilité (Braun-Blanquet)

I.2.3.2.3. Fréquence

La fréquence représente le rapport du nombre d'apparitions d'une espèce donnée **ni** au nombre total de relevés **N**. Elle est calculée par la formule suivante:

$$\boldsymbol{Fréquence = \frac{ni}{N} \times 100}$$

- **ni**: est le nombre de relevés contenant l'espèce i.
- **N**: est le nombre de relevés effectués.

En fonction de la valeur de F, Nous distinguons les catégories suivantes :

- **Accidentelle**: si Fi< 25%, espèce arrive par accident ou par hasard donc n'a aucun rôle dans le peuplement;
- **Accessoire**: si 25% ≤ Fi≤ 50%, espèce qui n'appartient pas au peuplement mais qui sert à son fonctionnement;
- **Régulière:** si 50% ≤ Fi≤ 75%;
- **Constante**: si 75% ≤ Fi≤ 100%;
- **Omniprésente**: si Fi= 100%.

Les espèces constantes et omniprésentes sont les plus dominantes qui ont de plus de nourriture et d'étendu plus vaste.

I.2.3.2.4. Distribution

Selon Dajoz, la distribution des individus d'une espèce dans son habitat nous renseigne sur l'homogénéité ou l'hétérogénéité dans leur répartition, les manifestations d'une tendance au regroupement est conséquence d'une exploitation sélective du milieu.

La répartition spatiotemporelle peut être évaluée selon la formule suivante:

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Xi - m)^2$$

- **Xi**: Est le nombre d'individus dans chaque prélèvement;
- **m**: la moyenne de l'ensemble des comptages effectués sur la parcelle pour un échantillon;
- **n** : nombre total d'individus dans chaque prélèvement.

La structure horizontale résulte donc de la combinaison des modes de distribution des différentes espèces de la communauté, que l'on peut globalement rapporter à trois grands types distincts.

i. Répartition régulière ou uniforme

On a une répartition régulière ou uniforme lorsque les individus sont situés à égale distance les uns des autres. Cette répartition régulière est rare en condition naturelles, sauf dans le car des communautés pauci-spécifique (à nombre d'espèce réduit), a forte dominance d'une espèce Elle est souvent perturbée par l'hétérogénéité du milieu.

ii. Répartition au hasard

La répartition au hasard correspond comme son nom l'indique à une distribution au hasard des individus. Comme la répartition régulière, elle est plutôt rare et se trouve chez les populations qui n'ont aucune tendance au regroupement et qui vivent dans des milieux homogènes.

iii. Répartition en agrégats ou contagieuse

Il y a répartition en agrégats lorsque les individus sont regroupés. C'est la répartition la plus fréquente.

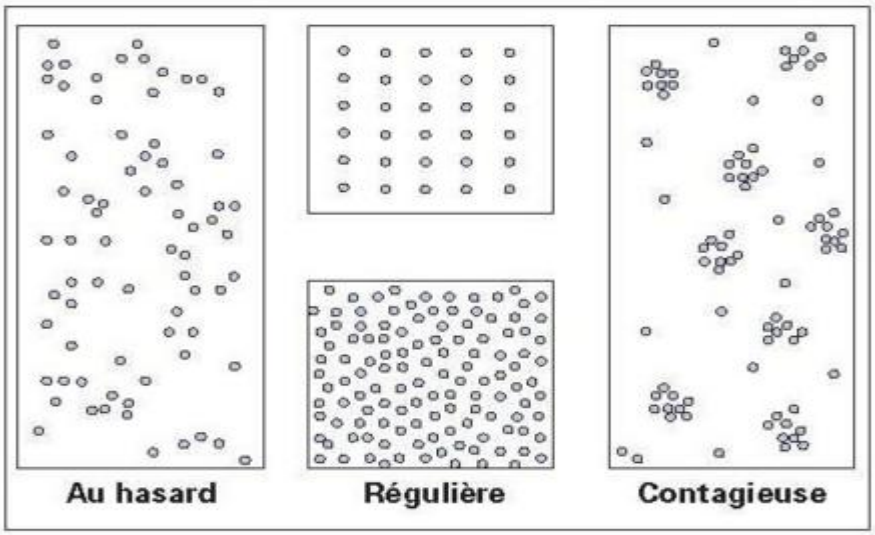


Figure I.15. Les différents modes de répartition spatiale des individus.
a) au hasard, b) régulière et c) contagieuse.

I.2.3.3. Zonation en altitude et Etage de végétation

Les plantes se répartissent naturellement en fonction de leurs exigences et leur sensibilité en matière de gelée, de sécheresse, de photopériodisme etc. de telle sorte chaque espèce végétale se localise entre les altitudes extrêmes qui correspondent aux limites de température compatibles avec sa physiologie.

L'altitude est un facteur écologique qui a des effets sur les communautés vivantes, surtout végétales, comparables à ceux induits par la latitude. La zonation de la biosphère en altitude est encore mieux définie que ses subdivisions en latitude (Figure I.16). Du fond des abysses océaniques au sommet des plus hautes montagnes, la biosphère présente une succession de milieux très différents.

Dans les régions montagneuses, la variable «altitude» est très importante puisqu'elle est à l'origine de la notion du gradient climatique, lui-même formé de deux composantes: une décroissance plus ou moins régulière de la température avec l'altitude, sauf dans le cas des

inversions thermiques et une variation des précipitations qui est une fonction croissante avec l'altitude, jusqu'à l'optimum pluviométrique. Ainsi il faut signaler que la vie végétale se réduit puis disparaît aux très hautes latitudes et à très haute altitudes.

I.2.3.3.1. Définition

La notion d'étagement est utilisée en montagnes pour rendre compte des discontinuités liées à l'altitude.

L'expression « étage de végétation » renvoie à l'échelonnement vertical sur les montagnes, d'unités de végétation répondant habituellement à une variation thermique du minima et de la température moyenne annuelle.

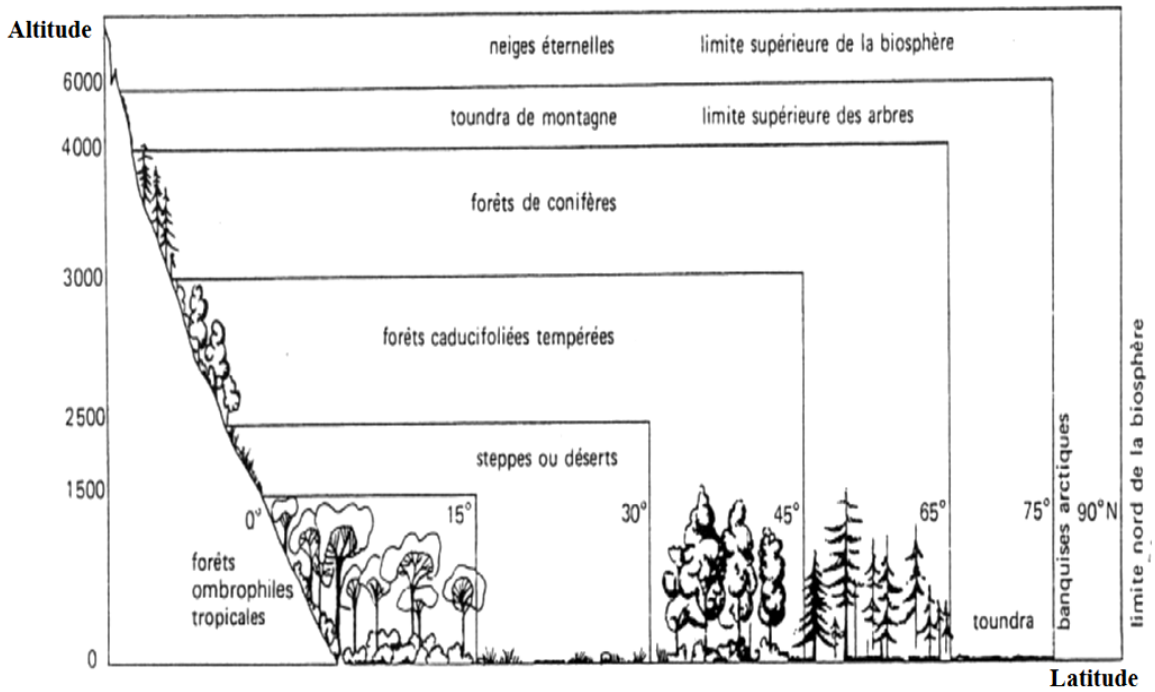


Figure I.16. Concordance entre la distribution en altitude et en latitude des biomes

Les changements de végétation qui se produisent en fonction de l'altitude conduisent à la notion de **zonation altitudinale** ou "**étages de végétation**" qui se traduit par "le changement profond dans les compositions et les structures des écosystèmes en fonction de l'altitude (en moyenne de 0 .55°C /100m)". La répartition des plantes est régie naturellement par leurs exigences et leur sensibilité en matière de gelée, de sécheresse, de photopériodisme etc...de telle sorte que chaque espèce végétale se localise entre les altitudes extrêmes qui correspondent aux limites de température compatibles avec sa physiologie. Il ne s'agit évidemment pas de limites linéaires rigides mais plutôt de bandes. En effet, les étages de végétation expriment bien la zonation altitudinale de la végétation en relation avec les niveaux bioclimatiques.

En 1908, Adamovic a précisé que les étages de végétation expriment la« répartition de la végétation sur le flanc des montagnes (qui) est l'expression biologique des conditions qui règnent localement sous l'influence de l'altitude ».

Pour leur part Flahault et Schrôter, définissent les étages de végétation comme les unités de végétation qui se superposent dans les montagnes.

Plus tard, en 1936, Emberger, distingua les deux expressions: (*i*) d'une part, l'étage de végétation indique simplement la succession altitudinale des ceintures de végétation ; dans ces conditions la notion d'étage est un concept spatial purement géométrique qui est lié à une tranche d'altitude et qui n'a qu'une valeur descriptive et régionale. (*ii*) D'autre part, l'étage bioclimatique est l'expression d'un climat ; dans ce cas, il a un sens général et réunit des groupements végétaux vivants dans des conditions de milieu sensiblement identiques; la notion d'étage est ici complètement dégagée de tout facteur altitudinal. Sa définition est uniquement climatique mais son expression est dans la végétation; il est la « réplique biologique du climat ».

En 1975, Ozenda a défini l'étage comme "un ensemble de groupements végétaux réunis par une affinité écologique dans une même tranche d'altitude", la température restant le facteur climatique prépondérant, même en climat méditerranéen où les paramètres du régime hydrique sont très importants. Cette définition thermique (et biologique) nécessite bien sûr des décalages altitudinaux des étages de végétation en relation avec la latitude des massifs considérés, décalage chiffré par Ozenda (1975) à 100 m par degré de latitude.

Chaque étage de végétation représente non seulement des intervalles thermiques mais encore un certain nombre de groupements végétaux échelonnés verticalement.

En outre, les seuils altitudinaux représentent des limites moyennes d'étages; en fait, des différences sont engendrées par la latitude, mais aussi par la différence d'exposition au rayonnement solaire et de l'orientation par rapport au vent humide. Par conséquent, la végétation serait le repère fidèle et derrière elle l'écologie; les étages de végétation ne sont que des ensembles structurés de groupements végétaux précis réunis par une affinité écologique (essentiellement thermique) dans une même tranche d'altitude. L'étage cesse d'être un simple concept physionomique ou géomorphologique lié à une tranche altitudinale donnée a priori, et acquiert au contraire un contenu biologique précis se présentant comme un complexe d'écosystèmes lié à des conditions mésologiques déterminées.

I.2.3.3.2. Etages de végétation de la région méditerranéenne

La synthèse des études phytosociologiques de l'ensemble des peuplements a permis de mieux préciser et approfondir les aspects de la zonation altitudinale de la végétation de la région méditerranéenne.

Cette région est subdivisée en plusieurs étages de végétation qui sont: thermo-méditerranéen, méso-méditerranéen, supra-méditerranéen et oroméditerranéen. Les formations au niveau de ces étages peuvent être forestières, pré-steppiques ou steppiques suivant les conditions écologiques du milieu.

- **Etage thermo-méditerranéen,** est l'étage qui correspond à la végétation la plus thermophile en zone méditerranéenne. Dans cet étage l'altitude est inférieure à 600m, il se développe aisément l'olivier sauvage, le caroubier, le laurier rose, le palmier nain, le thuya;

- **Etage méso-méditerranéen,** un étage qui s'insère entre le thermo-méditerranéen et le supra-méditerranéen dont l'altitude est comprise entre 600m et 1000m; il est moins étendu, moins diversifié que le thermo-méditerranéen, mais nettement plus forestier que lui. Cet étage est dominé par le chêne vert, le chêne kermes, l'arbousier, le ciste, le romarin, le chêne liège, la bruyère, le pin d'Alep;

- **Etage supra-méditerranéen,** l'altitude est supérieure à 1000m, il s'y développe le chêne vert, le chêne zeen, le chêne afares, le genevrier;

- **Etage oroméditerranéen**, l'altitude est supérieure à 1500m, on y trouve le cèdre et particulièrement des espèces endémiques tels que Pin Laricio en Mauritanie, le Sapin de Numidie en Algérie.

I.3. Milieu

Les associations végétales ne sont pas réparties au hasard et sont conditionnées par des facteurs édaphiques, climatiques et biotiques. Donc la position de chaque espèce dépend d'un ensemble de facteurs écologiques tels que la sécheresse, la nature du sol, l'humidité et la géomorphologie, influant directement sur la distribution des espèces végétales.

Parmi ces facteurs écologiques certains ont une importance et une activité prédominante, la distribution des individus, leur type biologique et les types de végétations, est conditionné essentiellement par l'activité des facteurs dominant.

Cependant au plan méthodologique, l'écologie ne traite que des cas très bien délimitées dans l'espace et dans les objectifs car une étude qui prend en compte l'ensemble des facteurs est inextricable.

Au plan méthodologique, l'écologie doit déterminer parmi tous les facteurs:

- Les plus importants ou les plus actifs;
- Donner une évaluation numérique de l'amplitude de variation du facteur ;

- Apprécie qualitativement et quantitativement la réaction des espèces soumises à ces facteurs.

Ces facteurs sont très nombreux, et difficile à séparer et à classer surtout quand leur action s'effectue indirectement.

Les effets de ces facteurs sur l'organisme et sur les fonctions de l'organisme révèle des mécanismes d'ordre éco-physiologique.

En écologie, on étudie la distribution des espèces par rapport à l'ensoleillement, en physiologie on étudie l'action de la chaleur sur l'activité chlorophyllienne, la différence fondamentale c'est que le physiologiste peut isoler l'action d'un facteur sur un organe de la plante après avoir stabilisé tous les autre facteurs, alors que l'écologue ne peut considérer que les effets simultanées de tous les facteurs qu'ils se présentent dans la nature et sur l'individus comme un tous et sur la communauté.

Le physiologiste obtient des résultats partielles mais précis alors que l'écologue obtient des résultats globale et plus diffus ou moins précis, les deux résultats se complètent.

Le milieu ne peut se définir en écologie que par rapport à une espèce ou à une communauté donnée et qu'il n'existe pas un milieu général mais un milieu particulier où se développe un matériel végétal et une communauté déterminée.

I.3.1. Nomenclature des facteurs écologique

Contrairement à la végétation, les facteurs de milieu qui sont très nombreux peuvent analyser avec une haute précision, ils sont classés pour réaliser des études écologiques descriptives selon les paramètres de structuration des conditions du milieu.

i. Facteurs climatiques

Ils sont des facteurs écologiques liés aux circonstances atmosphériques et météorologiques dans une région donnée. Le climat est principalement constitué des éléments suivants: la température, la luminosité, la pluviosité, le vent et l'humidité relative de l'air.

ii. Facteurs orotopographiques

Les Facteurs orotopographiques sont: la Géomorphologie, la topologie, l'exposition, l'altitude, la pente.

iii. Facteurs édaphiques

Les facteurs édaphiques qui concernent les caractères physico-chimiques des sols.

- **Caractéristiques physiques:** les caractéristiques physiques du sol sont: La **texture** et la **structure.**

- **Caractéristiques chimiques:** le sol a une composition chimique très variée. Parmi ces caractéristiques la nature de la roche mère, PH, teneur en carbone, nitrate, salinité…

iv. Facteurs biotiques

Ce sont des facteurs qui sont lies aux êtres vivants. Ils relèvent des actions et des interactions qui se produisent entre individus de la même espèce (intraspécifiques) ou entre individus d'espèces différentes (interspécifiques).

v. Facteurs liés à l'action de l'homme

Les facteurs liés à l'homme sont: les incendies, abattage des arbres, exploitation abusive, pollution.

A travers cette classification analytique, il est difficile de déceler des compensations de facteurs liés en général à une constante d'un état de facteurs indispensables. D'autre part, les classes de facteurs sont liées elles aussi à l'objectif du travail et dans ce découpage de facteurs, il faut considérer l'action des facteurs stationnels par rapport à celle des facteurs sectoriels, et à la limite des facteurs exogènes par rapport aux facteurs endogènes.

I.3.2. Plantes et milieu

L'existence du monde végétal est conditionnée par 3 agents :

- Le climat;
- Le sol;
- L'Homme qui a très largement dégradé et transformé le couvert végétal, principalement depuis le Néolithique.

I.3.2.1. Facteurs climatique

Le climat joue un rôle fondamental sur la biologie des plantes et, par voie de conséquences sur leur répartition à la surface de la terre.

I.3.2.1.1. Lumière

La lumière est un facteur écologique indispensable au monde vivant, parce qu'elle lui apporte toute l'énergie qu'il utilise. Les plantes vertes sont les seules capables, grâce à la lumière solaire et à la chlorophylle de leurs cellules, d'utiliser les éléments minéraux de

l'atmosphère (CO2 et eau) pour fabriquer une partie de leur propre substance qu'elles transformées en énergie chimique.

L'intensité lumineuse détermine l'activité photosynthétique. La durée d'éclairement ou photopériode conditionne la croissance des plantes ainsi que leur époque de la chute des feuilles comme l'époque de floraison. La photopériode est l'alternance d'une période de nuit (scotophase) et d'une période de jour (photophase). Elle dépend de la latitude et de la saison. L'intensité lumineuse varie selon la latitude et la saison.

Différentes adaptations à l'éclairement existent dans le monde végétal. On distingue des espèces héliophiles (ex: chêne pédonculé) et des espèces sciaphiles (ex: hêtre). Des adaptations physiologiques et morphologiques permettent aux plantes de compenser un moindre apport de lumière et de s'adapter à un excès.

I.3.2.1.2. Température

La température est un facteur déterminant pour l'existence des plantes. Précisons qu'il n'y a pas que la température de l'air qui compte mais aussi la température du sol. La température conditionne la **répartition** de la totalité des espèces. Ce paramètre contrôle directement la respiration, la croissance, la photosynthèse, les activités locomotrices,...

Les changements de températures vont modifier la répartition des aires favorables pour chaque type de végétaux. Cela provoquera donc une modification des aires de répartition des espèces et même une disparition de certaines espèces si ces dernières n'ont pas le temps de migrer.

I.3.2.1.3. Pluviométrie et hygrométrie

La pluviométrie est également un facteur d'importance capitale. La quantité moyenne annuelle des précipitations détermine grossièrement les types de végétation. Donc les quantités d'eau nécessaires à une plante varient considérablement selon les espèces. Les espèces végétales présentent des adaptations physiologiques et morphologiques qui leur permettent de s'accommoder soit du manque d'eau soit de l'excès d'eau.

Une variation des précipitations peut faire passer une région d'un type de végétation à un autre et donc avoir des conséquences catastrophiques sur la végétation, cette dernière n'ayant pas eu le temps de migrer. Par contre, une variation de quelques degrés de température ne permet en général pas de changer de type de végétation. Cela signifie que les variations des précipitations peuvent avoir un effet plus catastrophique que le réchauffement. Cela rend encore plus difficile les prévisions sur les végétaux étant données que les prévisions au sujet des précipitations sont beaucoup plus incertaines que celles des températures.

I.3.2.2. Facteurs édaphique

Les formations végétales ne se sont pas disposées au hasard à la surface du globe. On constate que les conditions édaphiques et climatiques peuvent être reliées, avec plus ou moins de justesse, au déterminisme de la répartition des principales formations végétales.

Moins importants que les facteurs climatiques, les facteurs édaphiques comprennent toutes les propriétés physiques et chimiques du sol qui ont une action écologique sur les êtres vivants. Bien entendu ils seront surtout importants pour ceux dont les rapports avec le sol sont étroits, c'est-à-dire les organismes terrestres et particulièrement ceux qui vivent dans la terre toute leur vie ou une partie seulement. Les plantes, qui restent toute leur vie là où elles ont poussé et dont une partie au moins s'enfonce dans le sol, en seront particulièrement dépendantes.

Les principaux caractères du sol qui peuvent retentir sur la vie des organismes sont sa structure physique, c'est-à-dire sa pente, sa profondeur et sa granulométrie ; sa composition chimique et celle des substances qui y circulent : les gaz, l'eau, les substances minérales et enfin les matières organiques

I.3.2.4. Facteurs biotiques

La faune est étroitement associée à la végétation dont elle dépend, puisque les plantes sont les seules capables de créer la matière vivante aux dépends des minéraux. Il est inutile d'insister sur le rôle des vers de terre ou des animaux fouisseurs dans la trituration et l'aération du sol. De même la fécondation de certaines fleurs ne peut s'effectuer qu'avec l'intervention d'insectes, d'oiseaux, parfois même de chauves-souris ou d'escargot. Inversement les insectes ont parfois une influence néfaste sur la végétation : la prolifération des chenilles dans certaines forêts de conifères peut provoquer de gros dégâts. De même l'action des animaux supérieurs est susceptible de transformer profondément la végétation d'une région.

I.3.2.5. L'action destructrice de l'homme

La répartition des formations végétales a été complètement bouleversée par l'action humaine. Le moyen le plus rapide que l'homme ait pour détruire la végétation naturelle est de la brûler.

Chapitre II. Echantillonnage

Il est généralement impossible de mettre la main sur l'ensemble des individus d'une population (nombre des arbres d'une forêt, nombre des insectes dans d'un champ des agrumes…..).On ne mesure donc pas « tout » qui peut être un système biologique, mais un fragment de l'ensemble (Échantillon), prélevé pour juger de quelques propriétés de ce « tout »

d'où la nécessité de l'échantillonnage. Autrement dit l'échantillonnage et les résultats de l'échantillon peuvent être utilisés pour estimer certaines caractéristiques de la population. L'échantillonnage donc est la procédure par laquelle les échantillons (est un fragment d'un ensemble prélevé pour juger de cet ensemble) sont prélevés. Le nombre d'échantillons peut être défini dans le temps et dans l'espace (des relevés peu fréquents (annuels par exemple) mais sur un nombre important de placettes, un certain nombre de relevés réguliers (un par semaine par exemple) sur peu de stations). Dans tous les cas, le nombre et la répartition des stations à observer doivent être fixés dans le cadre d'un plan d'échantillonnage.

Le choix du plan d'échantillonnage consiste à choisir de quelle manière les données seront recueillies sur le terrain (en certains endroits choisis au hasard, dans tous les habitats fréquentés par l'espèce visée, ….) donc choisir une méthode pour localiser les échantillons. Le plan d'échantillonnage donc est conditionné par le choix du problème et la façon de le poser. **Il doit être adapté à tester l'hypothèse que l'on a fait, à une échelle spatiale et temporelle donnée, sur la structure ou la dynamique du modèle biologique étudiée.** Le choix du mode d'échantillonnage dépend de ce que l'on recherche. Il est impératif de prendre le temps de planifier son échantillonnage. Chaque méthode possède ses propres caractéristiques techniques de mise en place et d'analyse des résultats, ces avantages et ces inconvénients. Il est intéressant de signaler aussi que lorsque l'on étudie un caractère sur plusieurs échantillons de même taille d'une même population, on peut observer que les résultats ne sont pas identiques selon les échantillons; ce phénomène s'appelle fluctuation d'échantillonnage.

Il importe donc, au préalable à toute étude, de définir clairement la problématique qui conditionnera:

- la définition d'un plan d'échantillonnage qui sera réalisé selon différentes variantes en fonction des contraintes techniques, scientifiques ou temporelles rencontrées ;
- les mesures à réaliser (densité, poids, taille, etc.), selon les choix méthodologiques adoptés, afin de garantir la fiabilité de l'interprétation statistique des données obtenues ;
- l'interprétation statistique des résultats. Il est à rappeler que la statistique est non paramétrique ou paramétrique.

On résume que l'échantillonnage est **: action d'échantillonner, résultat de cette action, ensemble d'exemplaires.**

- **Pourquoi échantillonner?**

- Impossibilité (dans la plupart des cas) d'accéder à la totalité des individus qui constituent la population étudiée;
- Recenser toute la population coûte trop cher et/ou prend trop de temps;
- Assurer un meilleur contrôle des opérations et une surveillance plus rigoureuse;
- Accélérer la cueillette et le traitement des données;
- A long terme, réduire le fardeau des informateurs.

II.1. Notions de base et terminologie

II.1.1. Echantillonnage

DEF. 1: L'échantillonnage est un processus au cours duquel on sélectionne un groupe d'individu ou une portion de la population pour représenter la population cible.

DEF. 2: La théorie de l'échantillonnage offre aux écologues un cadre théorique permettant de sélectionner un échantillon représentatif puis d'estimer des paramètres (ex. moyenne, variance) sur la variable biologique étudiée.

II.1.2. Elément ou unité d'échantillonnage

DEF. 1: Elément ou unité d'échantillonnage est l'élément de base d'un échantillonnage, sur lequel on mesure des caractéristiques (variables): mensurations, nombres d'individus de différentes espèces, caractéristiques physico-chimiques… etc.

DEF. 2: Elément ou unité d'échantillonnage est une entité concrète, comme un individu, ou abstraite, comme une association végétale, une relation comportementale, etc., sur laquelle on mesure ou on observe les variables propres.

II.1.3. Échantillon

DEF. 1: Un échantillon est un fragment d'un ensemble prélevé pour juger de cet ensemble. Fraction de la population statistique sur laquelle des mesures sont faites pour connaître les propriétés de cette population**.** L'échantillon est l'ensemble fini d'unités statistiques d'une population sélectionnées suivant une méthode appropriée et explicite. On appelle taille de l'échantillon le nombre d'unités statistiques qui composent l'échantillon.

DEF. 2: Selon Gumuchian et Marois, un échantillon est un groupe relativement petit et choisi scientifiquement de manière à représenter le plus fidèlement possible une population, Ainsi, au lieu d'examiner l'ensemble de la population, on étudie une partie ou un sous-ensemble de cette population qui est représentatif et à partir duquel on peut tirer des conclusions pour l'ensemble de cette population.

DEF. 3: D'après Durand, un échantillon est constitué dès que l'on sélectionne un nombre restreint d'unités à partir d'une population d'unités.

DEF. 4: Un échantillon est une collection d'éléments prélevés dans la population statistique selon un processus aléatoire ou une méthode dite à choix résonné.

II.1.4. Qu'est-ce qu'un bon échantillon?

Un bon échantillon est un échantillon qui représente le plus fidèlement possible la population retenue. Statistiquement, c'est un échantillon ayant le **niveau de confiance** le plus élevé et **l'intervalle de confiance** le plus petit.

C'est à l'aide de techniques ou de procédures d'échantillonnage que l'on peut construire un échantillon. Il existe différentes techniques d'échantillonnage, mais toutes ne sont pas nécessairement efficaces et précises. Trois grandes catégories de technique d'échantillonnage peuvent être reconnues:

• les procédures d'échantillonnage non-probabilistes sont basées sur le principe d'un choix non-aléatoire. **De ce fait, il n'est pas possible de constituer un échantillon représentatif de la population car on ne peut estimer la représentativité de l'échantillon**.

• les procédures d'échantillonnage probabilistes impliquent que les sujets ou les objets ont une probabilité connue et non nulle d'être inclus dans l'échantillon. **On peut dans ce cas estimer la représentativité de l'échantillon** i.e. mesurer l'écart entre l'échantillon et la population. Ce type est plus rigoureux et plus fiable car il permet l'inférence statistique.

• les procédures d'échantillonnage spatial probabilistes se rapprochent et même ressemblent beaucoup aux méthodes d'échantillonnage probabilistes. La seule différence réside dans une stratégie orientée vers la dimension spatiale.

II.1.5. Unité (ou individu) statistique

Les individus statistiques ou unités statistiques sont les éléments de la population statistique. Unité statistique est toute entité de la population cible ou de la population échantillonnée pouvant être soumise à observation.

II.1.6. Population

Une population est définie en statistique comme l'ensemble des observations concernant un caractère étudié. Une population peut être finie ou infinie. Elle peut être constituée d'un nombre d'individus très élevé.

II.1.6.1. Population cible

DEF. 1: La population cible est l'ensemble des éléments visés, en principe, par l'échantillonnage. Elle définie aussi comme l'ensemble exhaustif d'entités que l'on désire étudier, identifiables sans ambiguïté. On distingue deux types de populations : les populations discrètes (les éléments peuvent être énumérés), finies ou infinies, et les populations continues (par ex, une surface ou un volume bien délimité).

DEF. 2: Est l'ensemble pour lequel on veut recueillir des informations et sur lequel doivent porter les conclusions de l'´etude. Elle peut être distincte de la population statistique, en particulier quand ses éléments ne peuvent être tous répertoriés ou sont soumis à des contraintes liées `a l'´etude menée.

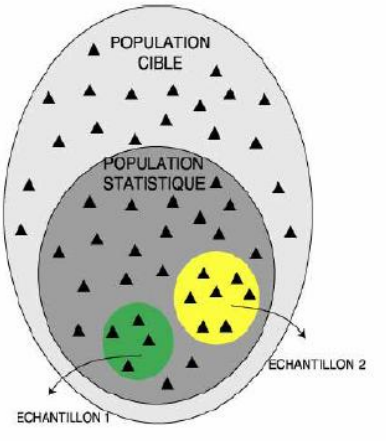


Figure II. 1 : Populations et échantillons

II.1.6.2. Population statistique

DEF. 1: La population statistique a été définie par Scherrer comme étant une collection d'éléments possédant au moins une caractéristique commune et exclusive, permettant de l'identifier et de la distinguer sans ambiguïté de toute autre. Un échantillon est un sous-ensemble extrait de cet ensemble plus vaste qu'est la population statistique, en tenant pour acquise l'applicabilité de certaines lois de probabilité.

DEF. 2: Est l'ensemble sur lequel des méthodes et techniques de présentation, de description et d'inférence statistique sont appliquées. Il ne s'agit donc pas forcément d'une population au sens biologique du terme.

Tableau 3: Exemples de population statistique, cible et caractère étudié.

	Population statistique	Unité statistique	Population cible	Caractère étudié	Paramètre à estimer
1	Les arbres d'une forêt	Arbre de la forêt	Ensemble des arbres de cette forêt	Présence-absence d'une maladie	Proportion d'arbres malades dans la forêt
2	Les parcelles obtenues par quadrillage d'un champ de tournesol	Parcelle	Ensemble des plantes de tournesol du champ	Nombre de plantes crispées (action du puceron du tournesol)	Nombre moyen de plantes crispées dans le champ

II.1.7. Choisir le plan d'échantillonnage

Choisir le plan d'échantillonnage consiste à choisir de quelle manière les données seront recueillies sur le terrain (en certains endroits choisis au hasard, dans tous les habitats fréquentés par l'espèce visée…) donc choisir une méthode pour localiser les échantillons. Il conditionne aussi le mode de traitement des données et donc les résultats. Les modalités de l'échantillonnage sont souvent déjà incluses dans les protocoles standards.

Par exemple : écouter les oiseaux en parcourant un transect de 3 km à vitesse constante avec la méthode des IKA.

Il intéressant de signaler que:

- Un plan d'échantillonnage a pour but de définir les conditions de prise des données en fonction du but de l'étude, tout en s'assurant de la **représentativité de l'échantillon;**
- Un échantillon représentatif reflète **fidèlement la composition et la complexité** de la population statistique. Il comporte **toujours** un élément **de hasard** (aléatoire).

Selon le but visé et les contraintes rencontrées, plusieurs plans d'échantillonnage sont disponibles et répondent à des besoins particuliers. Les trois principaux types sont l'échantillonnage aléatoire simple (au hasard), l'échantillonnage systématique et l'échantillonnage stratifié. Mais il en existe d'autres : à probabilités inégales de sélection des unités.

II.1.8. Définir le nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons peut être défini dans le temps et dans l'espace:

- Des relevés peu fréquents (annuels par exemple) mais sur un nombre important de placettes,
- Un certain nombre de relevés réguliers (un par semaine par exemple) sur peu de stations.

Dans tous les cas, le nombre et la répartition des stations à observer doivent être fixés dans le cadre d'un plan d'échantillonnage.

II.2. Principes généraux

II.2.1. Classification des descripteurs

II.2.1.1. Définition des descripteurs (variables)

Les variables que l'on choisit d'étudier sont généralement appelées descripteurs écologiques; mais il est très courant en écologie statistique de conserver le terme variable.

DEF.1: Une variable est toute caractéristique mesurable ou observable sur un élément d'échantillonnage (*var. propre*) ou sur son environnement (*var. associée*) = **Descripteur**, caractère, attribut, observation, trait, profil (en géophysique), item (dans les questionnaires de psychologie), stimulus (en étude du comportement).

DEF.2: Un descripteur végétal est une caractéristique identifiable et quantifiable d'une espèce. Les descripteurs sont utilisés dans la caractérisation et dans l'évaluation des populations pour faciliter leur différenciation et rendre facile la classification, le stockage, la récupération et l'utilisation de données.

DEF.3: Est une caractéristique mesurée ou observée sur chacun des éléments de l'échantillon ou sur des entités prédéfinies qui se rattachent aux unités d'échantillonnage. En effet, il peut s'agir d'un attribut de l'élément comme la taille, le poids d'un animal, on parlera alors de variables propres. S'il s'agit d'une composante particulière de son environnement comme la quantité de nourriture disponible, la température ambiante, etc., on parlera alors de variable associée, car elle n'est pas mesurée sur l'élément proprement dit.

Descripteurs ou indicateurs = indice représentatif d'un impact ou d'un état de l'environnement résultant soit d'une activité humaine, soit de l'évolution « naturelle » de l'environnement. Autrement dit, un indicateur est un paramètre, ou une valeur calculée à partir d'un ensemble de paramètres, qui fournit des informations sur un phénomène ou sur son état. L'indicateur a une signification dépassant celle directement liée à la valeur paramétrique.

II.2.1.2. Classification

Les variables pouvant intervenir dans une description de structure ou de fonctionnement d'un objet étudié sont très nombreuses. Ils peuvent être classés en différentes catégories:

II.2.1.2.1. Variable quantitative

C'est un caractère auquel on peut associer un nombre c'est-à-dire, que l'on peut "mesurer" (grandeur mesurable). On distingue alors deux types de descripteur quantitatif:

- **Variable discrète ou discontinue:** c'est un caractère quantitatif**, un tel caractère ne prend** qu'un nombre fini de valeurs (**valeur entière** dénombrable non négatives et sans aucune valeur intermédiaire). Les différentes situations où peuvent se trouver les éléments (observations, mesures, valeurs,…) sont des nombres isolés dont la liste peut être établie a priori (**Exp**.: nombre de pétales par fleur…).

- **Variable continue:** c'est un caractère quantitatif, un tel caractère peut, théoriquement, prendre toutes les valeurs d'un intervalle de l'ensemble des nombres réels. Toutes les valeurs ne sont pas dénombrables et ne peuvent pas être établi a priori. Ses valeurs sont alors

regroupées en classes (**Exp.:** la hauteur d'un arbre, le poids d'un micromammifère, surface, température…).

II.2.1.2.2. Variable qualitative

C'est un caractère dont les modalités s'expriment par des qualités et non plus par des valeurs numériques (pas mesurables).Dans ce type de variable les modalités ne sont pas hiérarchisées (Non ordonnés ou **nominale)** (**Exp.:** couleur, type de sol …).

II.2.1.2.3. Variable semi-quantitative (ou qualitative ordonnée)

Une variable mesurée sous forme quantitative peut toujours être ultérieurement transformée en variable qualitative en regroupant en classes les valeurs qu'elle peut prendre: on peut mesurer la taille et ventiler ensuite les sujets en petits, moyens et grands en fixant des seuils. On appelle de telles variables semi-quantitatives (ou qualitatives ordonnées puisqu'il existe une relation d'ordre entre les différentes modalités) (**Exp.:** code de dominance d'une espèce (r + 1 2 3 4 5)).

II.2.1.2.4. Variable complexes ou synthétiques

Les descripteurs simples ou ordinaires (quantitatifs et qualitatifs) caractérisent par la spécification d'une modalité. Les descripteurs complexes permettent de rendre compte de plusieurs observations simples dans le même plan d'échantillonnage. Ils synthétisent ou résument plusieurs observations (**Exp.:** Indice de diversité des espèces, fréquence relative d'une espèce).

II.2.2. Choix de descripteurs

Les descripteurs utilisés en écologie sont extrêmement divers. Le choix des descripteurs dépend du type du modèle descriptif ou explicatif attendu en fin d'analyse, c'est à dire, du pré-modèle. Quelques catégories de descripteurs sont les suivants:

- **Descripteur d'occupation de l'espace et du temps**

Ils peuvent être qualitatifs (présence ou absence d'un taxon et indication du type d'occupation du milieu: espèce endogée, épiphyte…etc.) ; Semi-quantitatifs (Abondance/dominance) ou quantitatifs (biomasses).

- **Descripteur structuraux**

Outre la structure spatio-temporelle et les structures démographiques, on pourra étudier des structures liées à la répartition de la biomasse en espèces distinctes (distribution des individus par espèces, diversité spécifique), des structures génétiques, des structures trophiques… etc.

- **Descripteurs biométriques et démographiques**

Ils sont nécessaires à l'application des modèles dynamiques de populations.

- **Descripteurs systématiques**

Ils répondent aux besoins de l'application d'un modèle précis d'écosystème. Les plus fréquents de ces modèles sont ceux qui rendent compte de la dynamique d'une biomasse d'une espèce, ou d'un élément chimique.

II.2.3. Échelle d'observation

Après le choix des descripteurs, on choisit l'échelle d'observation. Les écosystèmes sont structurés dans l'espace et dans le temps. La définition de l'échelle, c'est d'envisager soit une souche d'arbre, soit une forêt, soit une région et étudier leurs variations sur une journée, une année ou plusieurs années.

D'un point de vue pratique, la définition d'une échelle d'observation comporte deux éléments distincts : l'amplitude du domaine échantillonné et la densité des observations sur e domaine. Cela revient, en fait, à définir pour chaque plan d'échantillonnage deux échelles : l'une définissant la taille de l'objet analysé, l'autre l'échelle de variations observées à l'intérieur de l'objet.

Exp : On étudie un cycle annuel au moyen d'échantillonnages mensuels, hebdomadaire ou journalier, ou bien le sal d'une savane par des prélèvements tous les kms, tous les 10 mètres, …etc.

II.3. Types d'échantillonnages

Deux types d'échantillons peuvent être distingués: les échantillons non-probabilistes et les échantillons probabilistes.

Dans **une stratégie probabiliste**, toutes les unités sont choisis selon une procédure où la sélection est aléatoire, elles ont donc une probabilité non nulle et connue d'être échantillonnées, ce qui conduit à des estimations non biaisées des paramètres recherchés (ex. moyenne, variance).

Au contraire dans **les stratégies non probabilistes** les objets sont choisis selon une procédure pour laquelle la sélection n'est pas aléatoire. Ce type d'échantillon porte donc des biais inconnus pouvant fausser les patrons mis en évidence.

L'échantillonnage probabiliste est plus complexe, demande davantage de temps et coûte habituellement plus cher que l'échantillonnage non probabiliste.

II.3.1. Échantillonnage non probabilistes ou subjectif

L'échantillonnage subjectif est probablement le plus utilisé, en phytosociologie, car **le plus simple et la plus intuitive d'échantillonnage**. L'opérateur ne dispose généralement que

d'un minimum d'informations sur le terrain. Sur la zone d'étude, il prospecte les différentes communautés en présence, **choisit les plus représentatives et les plus homogènes et y implante ses relevés**. Le choix est fait sur la base de l'expérience de l'opérateur et il est possible que deux opérateurs différents arrivent donc à des résultats divergents. Cet échantillonnage, dont une grande part relève des connaissances et de l'expérience du thématicien, est donc subjectif. La pratique montre cependant que des opérateurs aguerris obtiennent sensiblement les mêmes résultats car **l'échantillonnage subjectif n'est pas aléatoire et obéit à une méthodologie de travail reconnue.** En outre, une fois les relevés réalisés, il est possible de procéder aux vérifications d'usage concernant par exemple l'homogénéité (courbe aire-espèces). Cet échantillonnage est donc souvent pratiqué en l'absence de données de terrain afin d'avoir une idée préliminaire. Cependant, il n'est pas suffisant et doit être ensuite complété par une stratification rigoureuse. **Ce type de méthode est donc à éviter**.

II.3.2. Échantillonnage probabiliste

L'échantillonnage probabiliste, comprend la sélection d'unités dans une population selon le principe du choix aléatoire ou au hasard. Un échantillon probabiliste peut être sélectionné de plusieurs façons différentes.

II.3.2.1. Échantillonnage stratifié

Il est particulièrement utilisé quand:

- **l'aire étudiée est hétérogène;**
- **la population statistique est fortement hétérogène pour un descripteur donné.**

Ce type d'échantillonnage présente deux intérêts :

- **il permet d'améliorer la précision des estimations de l'abondance par strate mais aussi globalement;**
- **il permet de faire varier l'effort de terrain selon les strates.**

II.3.2.1.1. Définition

Le principe de l'échantillonnage stratifié est simple et classique en théorie de l'échantillonnage. Il consiste à découper l'espace, à échantillonner, en unités (ou strates), successives, homogènes vis-à-vis de quelques paramètres de sorte à y minimiser l'hétérogénéité puis à extraire des échantillons séparés de chaque strate (Figure II.2).

Autrement, est une technique qui consiste à subdiviser une population cible hétérogène en sous-populations ou «strates» plus homogènes, mutuellement exclusives et collectivement exhaustives. La population hétérogène d'effectif N est ainsi découpée en k strates plus homogènes d'effectif Nh de telle sorte que N=N1+N2+…+Nh+…+Nk. Un échantillon, d'effectif ni, est par la suite, prélevé indépendamment au sein de chacune des strates en

appliquant un plan d'échantillonnage au choix de l'utilisateur le plus souvent un échantillonnage aléatoire.

Pour réaliser la stratification de l'échantillonnage, il est indispensable de disposer de toutes les informations majeures permettant de caractériser les milieux : la géomorphologie, la pédologie, l'hydrographie, la climatologie, la socio-économie (localisation des centres d'activités humaines…), les formations végétales, les états de surface du sol…. La stratification peut entraîner des gains de précision appréciables, elle facilite en outre les opérations de collecte des données et fournit des informations pour différentes parties de la population.

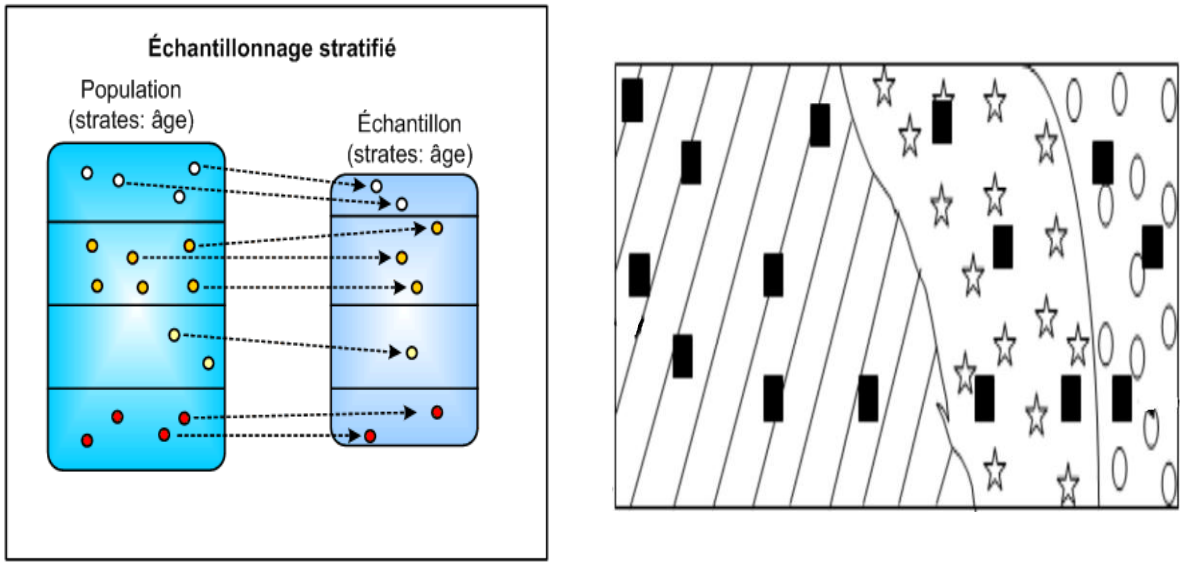


Figure II.2. Dispositif d'échantillonnage stratifié.

- Le **premier niveau d'échantillonnage** se fait à l'échelle du paysage de l'observatoire.
- Tandis que le deuxième niveau, il s'agit de choisir, au sein de chaque unité homogène, un nombre pertinent de sites sur lesquels seront positionnés les stations permanentes. **Une strate homogène vis-à-vis d'un premier facteur sera donc ensuite subdivisée en tenant compte d'un deuxième facteur et ainsi de suite.**

Le **nombre et la répartition** des relevés doit aussi être réfléchi afin d'éviter deux principaux écueils à savoir de :

- Effectuer des relevés inutiles à cause d'une surreprésentation de certaines strates,
- Privilégier outre mesure les milieux les plus fréquents en ignorant certains milieux moins étendus mais très significatifs sur le plan écologique.

II.3.2.1.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages

Il est parfois difficile en écologie d'effectuer un échantillonnage aléatoire stratifier qui se conforme à la définition. En effet, pour qu'aucune erreur systématique ne s'introduise dans il faut suivi les étapes suivants:

(a) Diviser la population en strates.

(b) Dresser la liste la plus complète possible (base de sondage) constituant chacune des strates.
(c) Pour chaque strate, choisir de façon aléatoire simple un nombre d'unités statistiques pour constituer l'échantillon de telle sorte que le pourcentage d'unités dans chacune des strates de l'échantillon soit le plus près possible du pourcentage d'unités dans chacune des strates de la population.

Exemple: imaginons que nous avons 5 types de steppes (donc 5 strates différentes), que chaque type de steppes est caractérisée par 3 stades de dégradation (3 faciès), nous devons donc suivre 5*3 = 15 situations écologiques différentes (15 strates).
Et pour faire des statistiques, il faut au minimum que chaque situation soit répétée 5 fois donc 15*5 = 75 stations au minimum. Le nombre de stations de surveillance écologique correspond donc au nombre total de répétitions

II.3.2.1.3. Avantages et inconvénients

- **Avantage**

- Échantillonnage probabiliste : traitements statistiques possibles ;
- L'effort de l'échantillonnage est constant du début à la fin ;
- La subdivision d'une unité hétérogène très complexe pour étudier en unité homogène facile à étudier ;
- Toutes les unités de la station sont échantillonnées;
- Stratégie très efficace lorsque l'objectif est bien précis et pour limiter les coûts ;
- Adapté à l'étude de l'effet d'un ou plusieurs facteurs car permet de maîtriser les facteurs influents et non désirés si nécessaire.

- **Inconvénients**

- C'est une méthode difficile à appliquer sur le terrain ;
- Nécessite une bonne connaissance préalable sur la ou les variables sujettes à l'échantillonnage;
- Difficulté d'accès à certaines strates;
- Il y a des unités sur-échantillonnées par rapport aux autres;
- -Devient rapidement complexe et coûteux si l'on cherche à répondre à plusieurs questions en même temps;
- -Stratégie peu efficace lorsque les objectifs sont multiples.

II.3.2.2. Échantillonnage aléatoire

II.3.2.2.1. Définition

L'échantillonnage aléatoire simple est une méthode qui consiste à prélever au hasard et de façon indépendante «n» unités d'échantillonnage d'une population statistique de «N» éléments. Les échantillons sont répartis au hasard. Chaque point dans l'espace étudié a donc une chance égale d'être échantillonné (Figure II.3).

L'EAS est une méthode de sélection en une étape qui garantit que chaque échantillon possible de taille *n* a une chance égale d'être sélectionné. Chaque unité de l'échantillon a donc la même probabilité d'inclusion. Cette probabilité, π, est égale à n/N, où N est le nombre d'unités dans la population.

Le principe donc consiste à répartir les échantillons au hasard sans aucun parti pris ou choix de la part du thématicien, de telle sorte que les points échantillons aient la même chance d'être retenus.

L'échantillonnage peut être fait avec ou sans remise. L'échantillonnage avec remise permet à une unité d'être sélectionnée plus d'une fois. L'échantillonnage sans remise signifie que lorsqu'une unité a été sélectionnée, elle ne peut l'être de nouveau. L'échantillonnage sans remise donne généralement des résultats plus précis et est plus pratique du point de vue opérationnel.

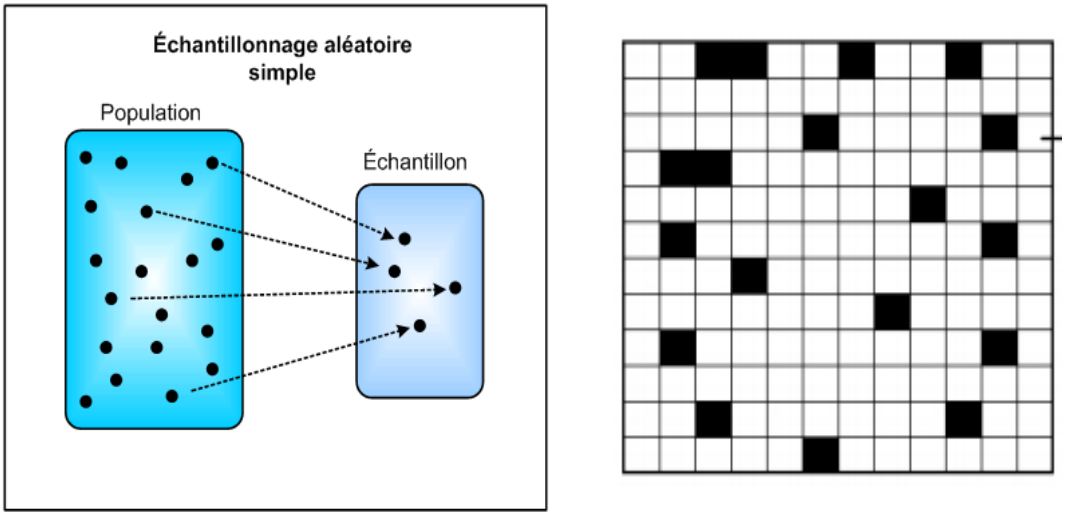


Figure II.3. Dispositif d'échantillonnage aléatoire.

II.3.2.2.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages

Pour prélever un échantillon aléatoire et simple il faut:

(a) Dresser la liste complète et sans répétition des éléments de la population;

(b)Numéroter les unités statistiques de 1 à N;
(c)Tirer au hasard des unités statistiques de la population qui feront partie de l'échantillon;
(d)Il faut tirer un nombre d'unités statistiques égal à la taille de l'échantillon.

- **Comment utiliser une table de nombres aléatoires ?**

La répartition aléatoire sur une surface d'étude qui peut comporter plusieurs milliers d'hectares ne peut pas, en pratique, être réductible à un simple jet aléatoire de pierres ou de cercles, avec par exemple les yeux bandés ou derrière le dos tels que préconisés par certains auteurs. En effet, ces jets ne dépassent tout au plus quelques dizaines de mètres, à comparer aux strates délimitées qui peuvent s'étaler sur des dizaines de kilomètres.

En réalité, l'échantillonnage au hasard nécessite l'utilisation d'une image géo référencée associée à **une table des nombres au hasard**.

Il est intéressant de savoir utiliser une table de nombres au hasard.
Le principe est assez simple, il faut choisir au hasard une ligne et une colonne, choisir un sens donné de lecture et le format des données qui correspondent le mieux au système de cordonnées retenu. Il existe en effet plusieurs tables :

• Table de TIPPETT, 1927• C'est la table la plus ancienne ; elle est constituée de 10400 nombres de 4 chiffres.
• Table de FISHER et YATES, 1943 Cette table est constituée de 7500 nombres de deux chiffres.
• Table de la RAND CORPORATION, 1955 Cette table est composée de 1 000000 chiffres.
• Table de KENDALL et B.B. SMITH, 1939. 1000 chiffres regroupés par deux ou quatre.

Exemple :

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	13407	62899	78937	90525	25033	56358	78902	47008	72488	57949
	50230	63237	94083	93634	71652	2656	57532	60307	91619	48916
	84980	62458	09703	78397	66179	46982	67619	39254	90763	74056
	22116	33646	17545	31321	65772	86506	09811	82848	92211	51178
5	68645	15068	56898	84021	40115	27524	42221	88293	67592	06430
	26518	39122	96561	56004	50260	68648	85596	83979	09041	62350
	36493	41666	27871	71329	69212	57932	65281	57233	07732	58439
	77402	12994	59892	85581	70823	53338	34405	67080	16568	00854
	83679	97154	40341	84741	8967	73287	94952	59008	95774	44927
10	71802	39356	02981	89107	79788	51330	37129	31898	34011	43304

1° - On veut prélever, de façon aléatoire, 8 individus dans une population de 850 individus.
Il s'agit donc ici de 8 tirages successifs au hasard et sans remise.
La première opération consiste à numéroter les 850 individus de 1 à 850.
Ensuite, on prend une table de nombres au hasard et on décide de la façon de l'utiliser.
Par exemple :
• On part de la ligne 10 et de la colonne 6 (point d'entrée dans la table).

• On va de la gauche vers la droite.
• On prend les chiffres par «paquets» de 3.
Dans la table, on lit les nombres suivants : 393, 560, 298, 189, 107, 797, 885,133, 037, 129, 318, 983...
On ne retient dans cette liste que les 8 premiers nombres inférieurs ou égaux à 850.
Les 8 individus constituant l'échantillon sont donc les individus respectivement numérotés : **393, 560, 298, 189, 107, 797, 133 et 037.**
En effet, le nombre 885 n'est pas retenu, car il ne correspond à aucun individu.

II.3.2.2.3. Avantages et inconvénients

- **Avantage**

  - Il est connu et accepté universellement;
  - Echantillonnage probabiliste, non subjectif, permettant l'application de tous les tests statistiques;
  - Les estimateurs ne sont pas biaisés;
  - Aucune information préalable n'est nécessaire sur l'objet lui-même (études antérieures);
  - Facilité et rapidité d'exécution;
  - Chaque élément possède la même probabilité d'être échantillonné.

- **Inconvénients**

  - Travail de terrain inorganisé;
  - Problème de passage de l'échelle cartographique au terrain;
  - Difficulté de matérialisation des stations retenues sur le terrain qui peuvent tomber sur des sommets, des affleurements etc;
  - Possible hétérogénéité des échantillons vis-à-vis des conditions écologiques, floristiques, structurales (zone de transition);
  - Ne profite pas des expériences apportées par des études antérieures;
  - Ne fait pas ressortir **les gradients de variation** à l'intérieur de l'objet, ne fait pas ressortir les relations d'ordre;
  - Trop d'échantillons dans les surfaces étendues, et pas assez dans les surfaces réduites, même quand elles sont intéressantes pour l'écologue;
  - Procédé qui ne régule pas l'échantillonnage en fonction des éléments privilégies, commodes, économiques et de l'importance ou du poids des éléments à échantillonner.

II.3.2.3. Échantillonnage systématique

L'échantillonnage systématique est un échantillonnage largement usité, mais il présente plusieurs variantes dont les appellations souvent proches sont source de confusions.

Ce type d'échantillonnage est efficace pour s'assurer d'une bonne couverture de la base d'échantillonnage

II.3.2.3.1. Définition

L'échantillonnage systématique est une technique qui consiste à **prélever des unités d'échantillonnage situées à intervalles égaux**. **Le choix du premier individu détermine la composition de tout l'échantillon.**

Si on connaît l'effectif total de la population **N** et qu'on souhaite prélever un échantillon d'effectif **n**, l'intervalle entre deux unités successives à sélectionner est donné par:

P=N/n

Connaissant k, on choisit le plus souvent, pour débuter, un nombre aléatoire, i, compris entre 1 et p. le rang des unités sélectionnées est alors i, i+p, i+2p, i+3p, …

L'échantillonnage systématique est facile à préparer et, en général facile à exécuter, il réduit le temps consacré à la localisation des unités sélectionnées. L'échantillonnage systématique consiste donc à répartir des échantillons selon une maille répétitive et régulière le long d'une droite ou d'une ligne. Les échantillons peuvent se présenter sous forme de placettes qui peuvent être des **surfaces**, de relevés le long de **lignes** ou de **points**.

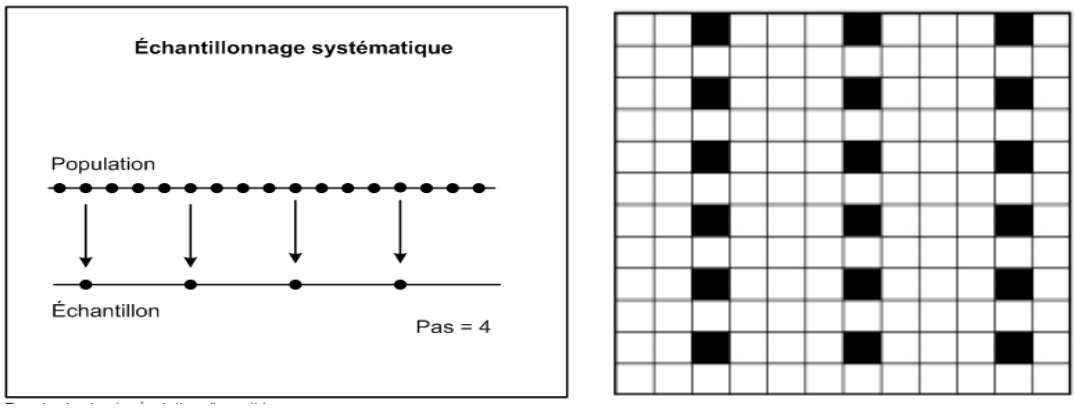


Figure II.4. Dispositif d'échantillonnage systématique.

a. Surfaces

Les surfaces se présentent le plus souvent sous forme de carrés et rectangles, plus rarement de cercles. Les rectangles ou les longues bandes minces seraient plus représentatifs du milieu qu'un carré (Figure II.5.). Le cercle au contraire serait a priori la forme la plus intéressante car présentant l'effet de bordure le plus faible. Pourtant, très souvent en écologie; c'est le carré qui est le plus souvent utilisé dans la méthode de points quadrats, probablement pour des raisons pratiques car le thématicien peut diviser la placette en un carroyage et donc

en format matriciel plus facile à gérer sur le terrain pour positionner le détail des mesures. Les dimensions de ces surfaces sont variables.

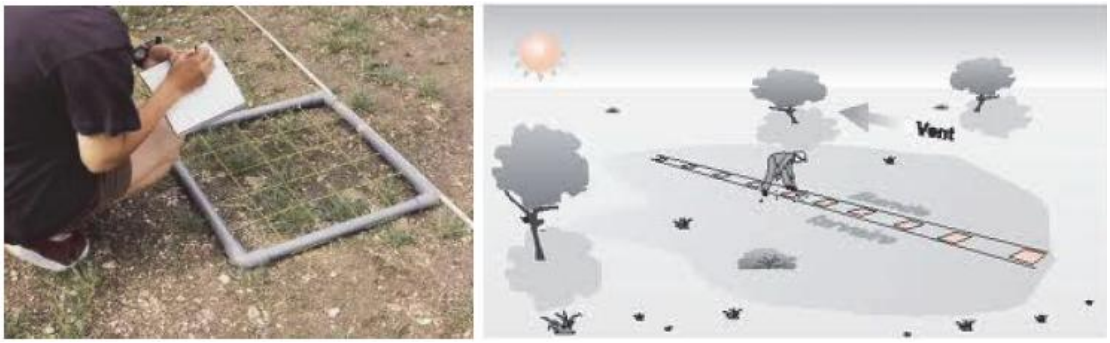


Figure II.5. Placettes sous forme de surfaces

Il y a plusieurs méthodes ou le point de mesure est une surface:

- **Méthode des poignées ou Méthode De Vries:** Se caractérise par une intensité d'échantillonnage élevée avec la prise de poignées le long d'un transect (Figure II.6.). Pour chaque poignée, une note d'abondance est donnée subjectivement aux espèces qui semblent le plus contribuer au couvert végétal. Utilisée pour l'étude des pâturages.

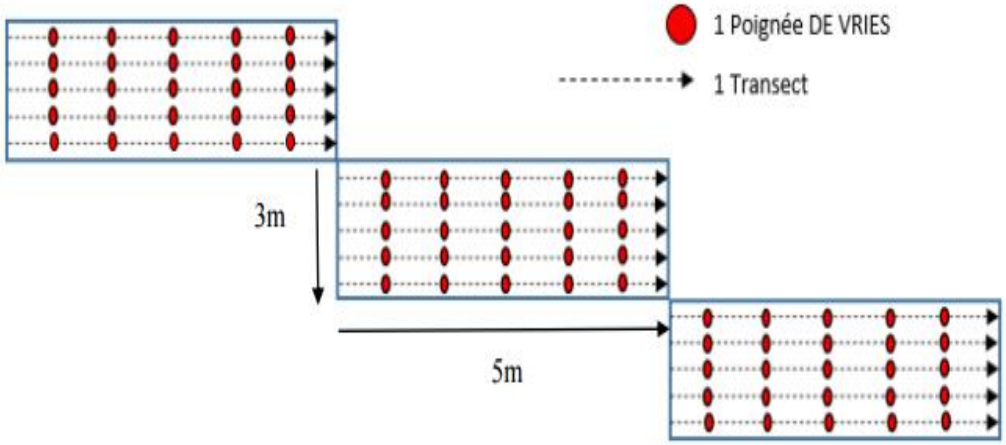


Figure II.6. Méthode de poignée

- **Méthode Botanal:** Il s'agit d'une méthode d'estimation visuelle de la productivité et de la composition des prairies en termes d'abondances relatives en biomasse sèche. Tothill *et al*, utilisent plutôt des cadres de 0,2 m^2 avec une intensité d'échantillonnage plus modérée (12 à 15). Pour chaque cadre, la notation de l'abondance se fait par une estimation subjective de l'abondance des espèces.

b. Lignes

Elles sont assez peu utilisées. Elles sont matérialisées par des rubans mètres ou décamètres étroits tendus. Le principe est de calculer la longueur de la végétation projetée sur les lignes ou rubans mètres.

- **Méthodes linéaires:** le principe est très voisin de celui de la méthode **De Vries**, mais ici on cherche à suivre les variations de la végétation en revenant exactement aux mêmes points à intervalles plus ou moins longs. Pour cela on utilise comme unité d'échantillonnage une bague de 2,5 cm de diamètre fixée à l'extrémité d'une tige métallique (Figure II.7.a). les points d'échantillonnage sont situés le long d'une ligne matérialisée par un ruban métallique tendu entre des supports au moyen de pinces (Figure II.7 .b). Le repérage est obtenu à l'aide de trois piquets corniers, sur lesquels on trace un trait de repère au niveau de passage du ruban. on note enfin les cotes sur le ruban au point de contact avec les cornières. En opérant avec soin, il est possible de replacer le ruban pratiquement dans la même position à chaque lecture. Le principe donc est, à savoir mesurer la longueur de végétation interceptée, les différences portent sur le mode de discrimination des strates et la façon de calculer le sol nu. Pour Anderson, seule compte la végétation en contact avec la ligne et le sol nu correspond à l'absence de végétation sur plus d'1 (un) cm.

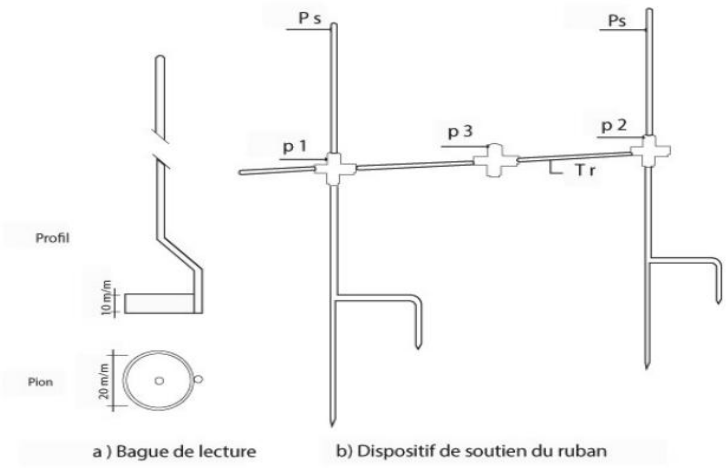


Figure. II. 7. Appareillage pour la méthode linéaire

Canfield, utilise des lignes «intercepts» et différencie entre les herbacées qu'il mesure au ras du sol et les chaméphytes (petits ligneux) dont il considère la couronne. Parker et Savage utilisent des bandes plus ou moins étroites selon la nature herbacée (0.5 cm) ou ligneuse (10 cm) de la végétation. Ces longueurs se prêtent difficilement aux calculs statistiques et aux relations d'ordre à la différence des points (Figure II.8).

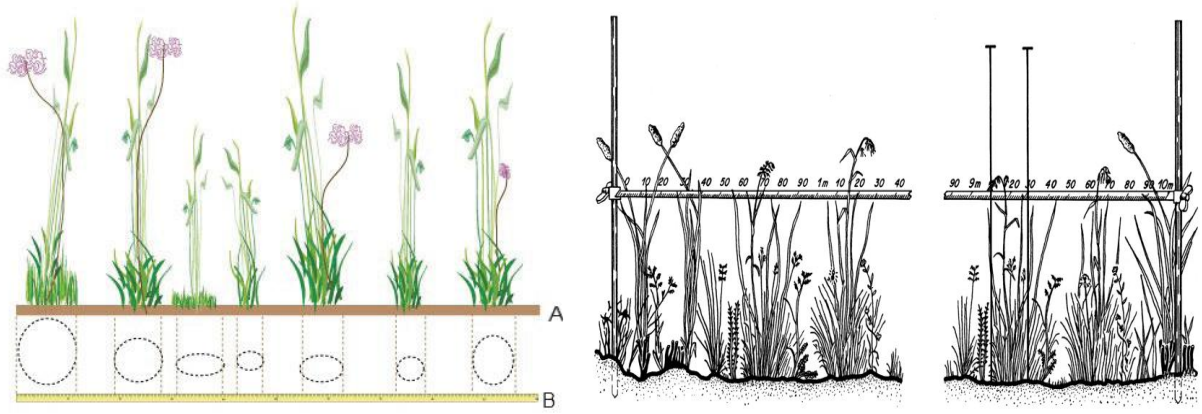


Figure II.8. Mesure du recouvrement linéaire

A. Portion de ligne montrant la position du ruban par rapport à la végétation; **B.** Vue en projection horizontale de la ligne.

c. Points

Des études théoriques ont montré que l'échantillonnage sur des placettes surfaciques présente des biais sur le plan statistique. Il serait ainsi plus judicieux de multiplier le nombre de placettes, de sorte à réduire la surface d'échantillonnage, jusqu'à annuler celle-ci et arriver à une surface ponctuelle. A l'aide d'une aiguille, l'observateur indique toutes les espèces qui entrent en contact avec elle, jusqu'à ce que celles-ci touchent le sol. Les aiguilles sont descendues verticalement dans la masse végétale. Wilson a développé une méthode légèrement différente, où l'aiguille est enfoncée à l'oblique dans la végétation mais l'intérêt de cette approche est controversé.

- **Points quadrats:** L'objectif est de quantifier les divers éléments de la structure d'une flore, d'une végétation ou encore d'un milieu. La méthode consistait en l'assemblage de dix aiguilles alignées. Les placettes à points ont d'abord été échantillonnées sous forme d'un cadre rigide comportant 10 aiguilles qu'on déplace de proche en proche. Pour ce faire, il faudrait agir sur la maille de la ligne ou la distance entre les aiguilles. Il s'agit de comptabiliser les points de végétation le long d'une ligne graduée selon une maille régulière. Elle permet de transposer sur une dimension toutes les mesures réalisées sur une surface et de déterminer les paramètres quantitatifs tels que le recouvrement, la fréquence, la densité et la contribution des espèces au tapis végétal. Cette méthode s'est avérée efficace pour la réalisation du suivi de la couverture végétale.

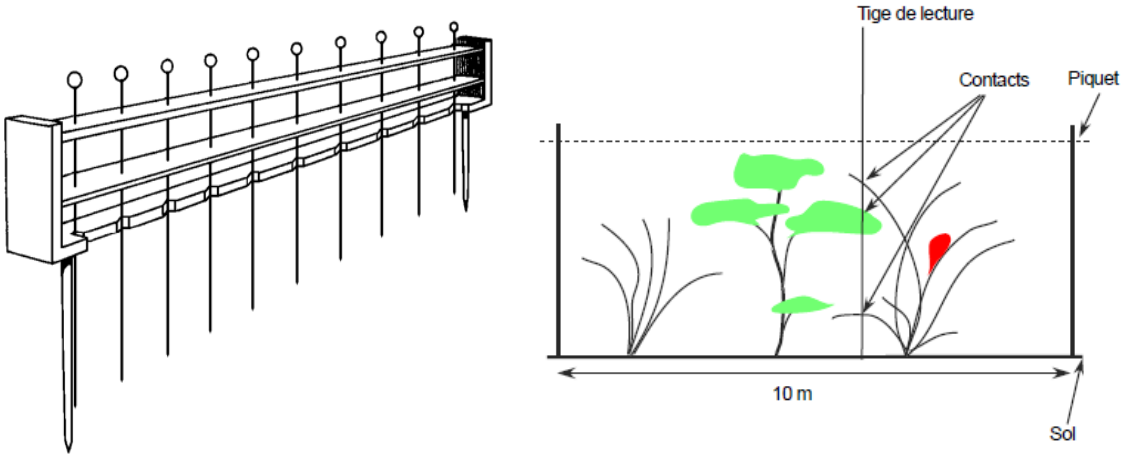


Figure II.9. Le système de points-quadrats

- **Points alignés:** Dans ce dispositif, la ligne est pourvue d'une maille régulière. On fait coulisser une aiguille verticalement le long de la ligne, sans bâti (à la différence des points quadrats) et y on compte les contacts. Pour les strates ligneuses discontinues, la méthode utilisée est celle de la 'jauge de Cooper'. La jauge a la forme générale d'un T dont les deux pièces ont précisément 10 et 70,7 cm de longueur pour le 'bras' et la 'jambe'. L'extrémité de la 'jambe' opposée au 'bras' porte soit un œilleton de visée (plaque métallique percée), soit une mire (Figure II.10). En un point de la station d'étude, l'observateur porte la jauge à son œil et note le nombre et la nature des espèces dont la hauteur dépasse la longueur du 'bras'. Il

tourne sur lui même pour balayer tout le pourtour et recommence l'opération à différents endroits de la station. Cette opération est répétée 10 fois au minimum par station .

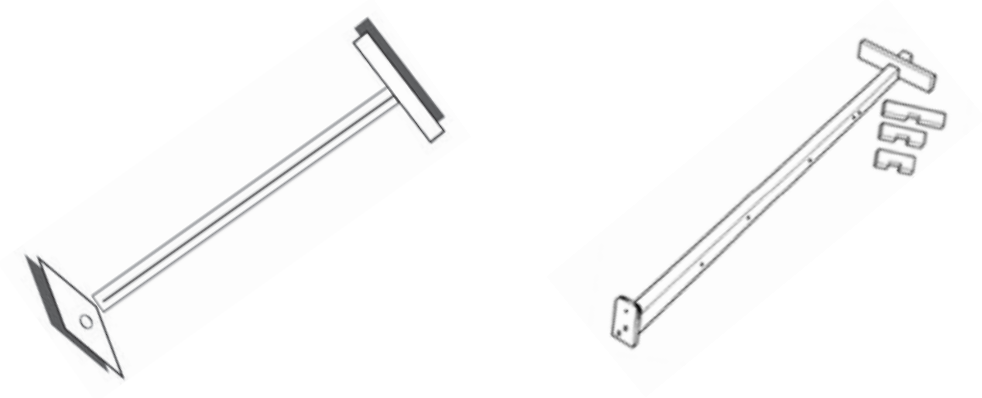


Figure II.10. Jauge de Cooper

- **Roue :** une variante de la méthode des points alignés, est l'utilisation d'une roue sans jante, munie de rayons qu'ils laissent rouler dans la végétation. Ces auteurs montrent que si l'espacement est suffisamment grand, ceci permet d'approcher une répartition au hasard. Pour faire des mesures avec ce matériel, il faut trois opérateurs, le premier, aux poignées de la machine, en assure la progression et l'arrête lorsqu'une de ses pointes touche le sol. Les deux autres opérateurs se consacrent chacun à une roue et notent si la pointe au contact touche du sol nu, ou une espèce, qu'il faut alors déterminer ; il note aussi la ou les espèces qui se trouvent à la verticale du contact. Pour certains observateurs, un contact est noté aussi si la roue touche un organe végétal aérien avant contact avec le sol, pour d'autres non (Figure II.11).



Figure II.11. La roue à pointes

II.3.2.3.2. Protocole de sélection des unités d'échantillonnages

Pour prélever un échantillon aléatoire et systématique il faut:

(a) Numéroter les unités statistiques de 1 à N;
(b) choisir l'effectif n de l'échantillon;
(c) Calculer l'intervalle de sélection que l'on appelle aussi le pas, la période ou l'équidistance (P=N/n);

(d)Tirer au hasard une unité statistique de la population qui fera partie de l'échantillon;
(e)Tirer les autres unités en appliquant le pas; celles-ci feront également partie de l'échantillon.

II.3.2.3.3. Avantages et inconvénients

- **Avantage**

- L'échantillonnage systématique s'avère beaucoup plus commode à préparer et à exécuter que l'E.A.S.
- Rapidité d'exécution sur le terrain;
- Localisation et délimitation des échantillons grandement facilitée;
- Répartition régulière des unités d'échantillonnage sur toute la surface d'étude et facilité qui en découle pour le repérage et le déplacement;
- Repérage permanent des lignes: permet d'obtenir dans des conditions favorable, des données précises sur l'évolution de la végétation;
- permet de mettre en évidence visuellement, sur des graphiques ou statistiquement, la variabilité de la végétation dans l'espace et de mesurer l'échelle des agrégats structuraux;
- Permet de faire ressortir des gradients (Exp.: gradient altitudinal, gradient nord-sud, etc.);
- Permet les études de biomasse.

- **Inconvénients**

- Effort de trouver rapidement, sur le support cartographique, le meilleur transect: travail de long haleine;
- Difficulté de passage de la carte au terrain pour l'exécution du transect;
- Nécessité d'un matériel adéquat: piquets, corde, aiguilles.

II.3.2.4. Analyse exhaustive

Dans l'analyse exhaustive, l'utilisation même du mot 'échantillonnage' peut poser problème. En effet, il ne s'agit plus d'analyser une partie de la population afin de généraliser les propriétés de l'échantillon à l'ensemble de celle-ci, mais au contraire, d'en expérimenter l'intégralité afin d'étudier l'homogénéité, la structure et même l'aire minimale des échantillons puis de les valider, c'est-à-dire vérifier si elles sont conformes au modèle théorique proposé. Plusieurs techniques sont utilisables dans ce but:

a- ***Les grilles ou bandes de placettes contiguë***:. Il s'agit de placer plusieurs lignes contenant n carrés ou rectangles contigus au nombre de 2^n pour permettre les regroupements de placettes et faciliter l'interprétation statistique.

b. ***Les lignes de segments contigus***: Godron utilise une méthode s'inspirant des points alignés. Il place des segments contigus et y note la présence des espèces, ce qui permet d'aboutir à des fréquences.

c. ***L'ordination des individus le long d'une ligne ou d'une bande***: Cette méthode permet de déceler des relations d'ordre et de calculer notamment des densités linéaires ou par unité de surface.

Ayant une pratique similaire à l'échantillonnage systématique, l'analyse exhaustive pourrait souffrir des mêmes contraintes que celui-ci, à savoir la non indépendance (ou liaison) des mesures et l'absence de répartition aléatoire des échantillons. Mais un grand nombre de placettes permettrait un relatif affranchissement de ces contraintes.

II.3.2.5. Échantillonnage progressif

L'échantillonnage progressif a souvent été utilisé dans la phase préliminaire des travaux puisqu'il s'est souvent avéré que l'échantillonnage était incomplet et qu'il fallait le compléter par des campagnes ultérieures.

II.3.2.6. Échantillonnage mixte

L'expérience montre qu'en pratique l'opérateur commence souvent par réaliser soit un échantillonnage subjectif, quand il manque d'informations, soit un échantillonnage stratifié en cas de disponibilité des sources d'informations. Si la zone retenue est considérée comme homogène, il peut alors utiliser la table des nombres au hasard pour choisir l'implantation de son relevé. Il peut ensuite être amené à réaliser des mesures quantitatives comme l'évaluation de la phytomasse ou l'estimation des recouvrements en éléments de la surface du sol. Dans ce cas, l'utilisation des lignes relèverait d'un échantillonnage systématique. L'opérateur peut donc faire appel à plusieurs types d'échantillonnage mobilisant ainsi toutes les sources d'information. L'échantillonnage mixte est très efficace car complet ; il est celui le plus utilisé dans les études de l'évaluation des ressources naturelles et du suivi de la dynamique de la végétation.

II.3.3. Différentes techniques de relevés

II.3.3.1. Aire minimale

La notion de relation aire-espèce permet de contrôler la représentativité d'une végétation. Elle est en effet fondée sur la probabilité de la présence d'une espèce dans une portion de l'étendue étudiée. De ce fait la surface considérée comme représentative constitue un modèle adapté au type de végétation, étudié dans la mesure où il tient compte de la fréquence de chacune des espèces présentes. L'aire minima représente la surface minimum dans laquelle on retrouve le maximum d'espèces présentes dans la station d'étude.

Dajoz, définit l'aire minimale comme la plus petite surface nécessaire pour que toutes les espèces soient représentées. L'aire minimale est déterminée en augmentant la surface de l'aire d'échantillonnage jusqu'à ce que le nombre d'espèces relevées n'augment plus.

- **But**: savoir sur quelle surface effectuer l'inventaire pour que celui-ci soit représentatif de la formation végétale. Cette méthode peut être appliquée sur tout type de milieu, forêt, dune, prairie... Ce milieu doit être relativement homogène pour avoir une bonne appréciation.

- **Protocole de sélection**

(1) Délimiter une surface de 0,5m×0,5m=0,25m^2 (surface 1) avec une ficelle ou un ruban de chantier ;
(2) Prélever un individu de chacune des espèces présentes au sein de cette surface et le coller sur le cahier ;
(3) Délimiter une surface identique à la première (surface 2). La surface totale (surface 1+2) est alors doublée (0.5m^2) ;
(4) Prélever un individu de chacune des nouvelles espèces repérées au sein de la surface 2 et le coller sur le cahier ;
(5) Délimiter successivement de nouvelles surfaces en doublant à chaque fois la superficie (surface 3 de 1 m^2, puis surface 4 de 2 m^2, puis surface 5 de 4 m^2, puis surface 6 de 8 m^2). Si en double la surface, le nombre d'espèces nouvelles n'augmente plus, l'aire minimale est atteinte;
(6) Une fois l'aire minimale atteinte, comptabiliser le nombre total d'individus différents récoltés: c'est l'estimation de biodiversité spécifique ou richesse spécifique du milieu;
(7) Identifier la famille de chaque individu récolté grâce à des guides, clés ou collection de référence;
(8) Compléter le tableau de relevé.
(9) Tracer la courbe

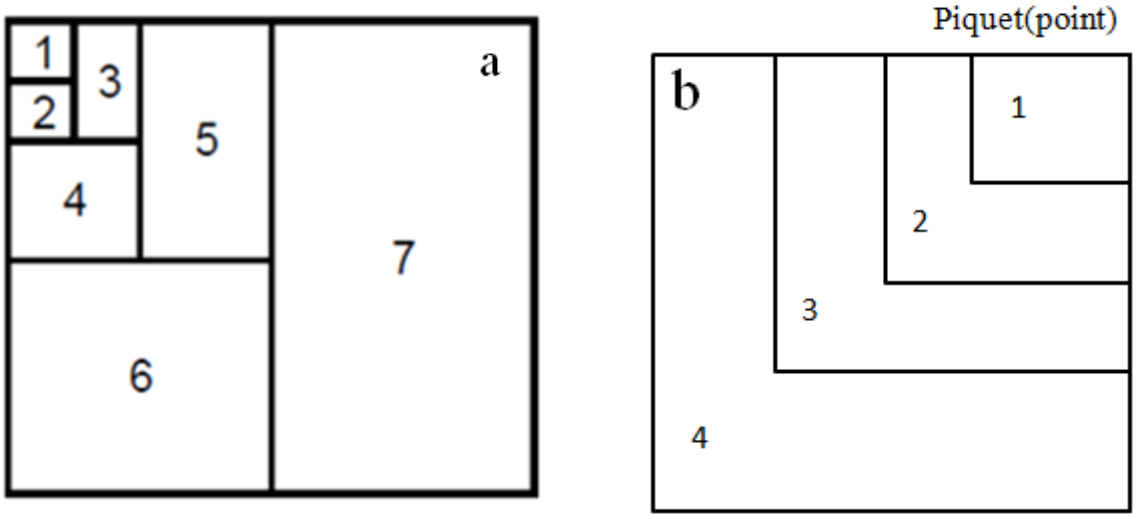


Figure II.12. Dispositif de l'aire minimale
a: Système de surfaces emboîtées ; b : Technique des accroissements progressifs

Tableau 1 : Aire minimale et nombre d'espèces récoltées dans chaque milieu

	Milieu ouvert	**Milieu fermé**
Surface de l'aire minimale (m^2)		
	Nombre d'espèces	
Nom des familles de plantes récoltées		

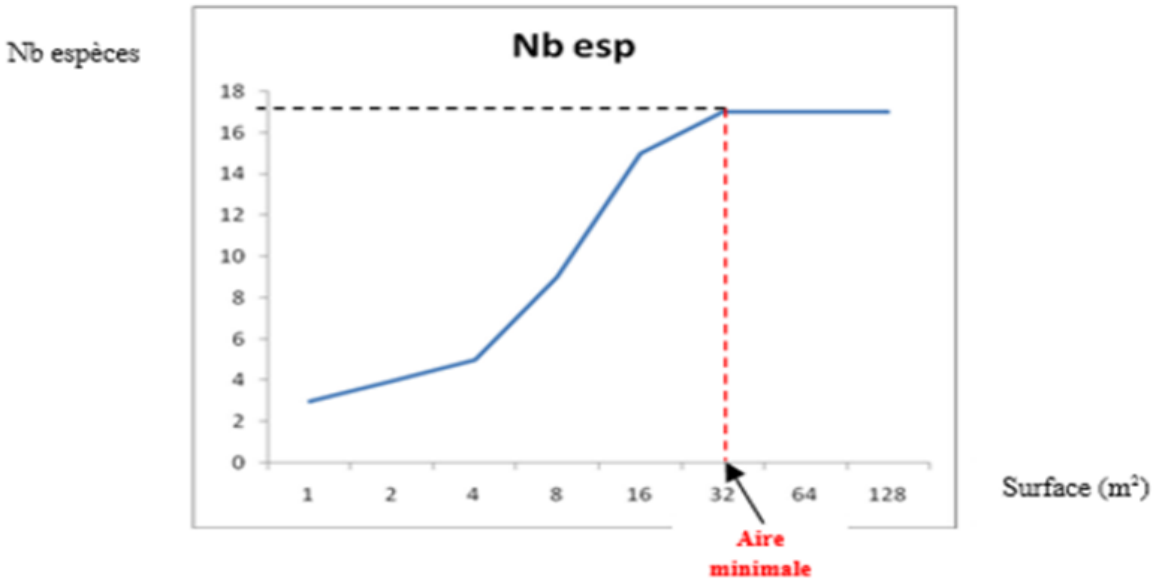


Figure II.13. Courbe de variation du nombre d'espèces en fonction de la surface

II.3.3.2. Transects

Le transect écologique est une méthode botanique qui consiste à déterminer dans la végétation (herbacées ou arbustives et de type boisement), le long d'une coupe plus ou moins linéaire réalisée dans un complexe géomorphologique, des groupes écologiques ou éco-sociologiques. Les individus sont comptés le long d'une ligne jusqu'à une limite de détectabilité. Cette limite de détectabilité peut être définie statistiquement.

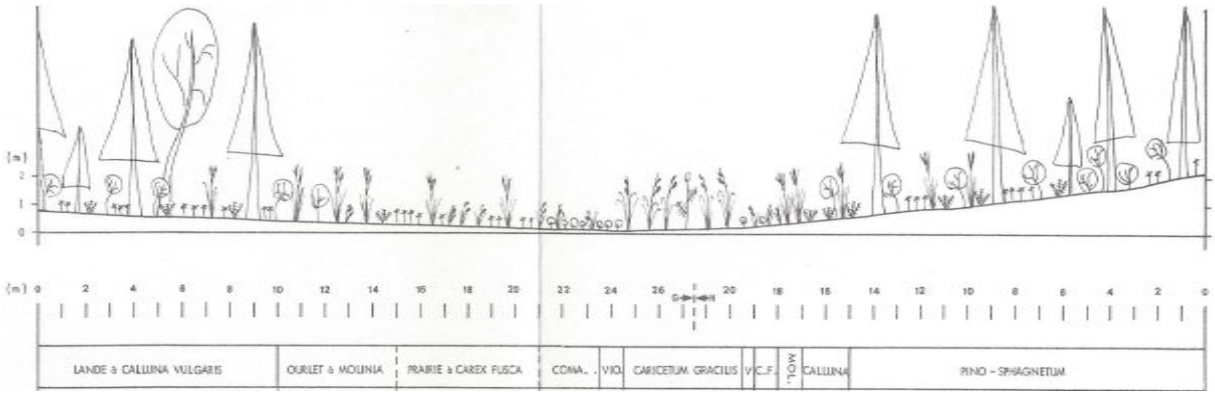


Figure II.14. Transects de végétation

- **Type de transect**

- **Bande transect**; on assume que tous les objets de la bande de longueur L et de largeur (w) sont vus et comptés ; ce qui est un cas rare et spécial dans distance sampling.

- **Ligne transect:** cette technique dérive de bande transect avec la seule exception qu'une bande étroite le long de la ligne médiane (ligne transect) est prospectée et seulement les objets dans cette zone étroite sont détectés. Dans la pratique des inventaires plusieurs lignes sont placées selon un dispositif expérimental défini ; dans ce cas la longueur totale (L) parcourue lors de l'inventaire est la somme des longueurs li des différents transects, L= li, avec i= 1, 2, …..k.

- **Point transect**: Point transect peut être considéré comme la ligne transect sans longueur (ie L=0) ou comme un point. Cette méthode est une extrapolation de la méthode radiale (circulaire) d'échantillonnage. Cependant si dans la méthode radiale les objets sont comptés dans une aire de w2, dans point transect c'est par contre la zone autour du point choisi qui est pleinement investiguée.

- **Objectif :** recenser la biodiversité végétale et estimer la densité/fréquence de chaque espèce.

- **Protocole de sélection**

Le principe de base est de noter les espèces et le nombre d'individus de chacune d'elles qui touchent une ligne droite matérialisée dans le milieu. On peut éventuellement élargir aux 5-10cm de chaque côté de la ligne.

La longueur de la ligne dépend du type de végétation : pour étudier les arbres d'un boisement, la longueur devra être importante (plus de 50m) ; au contraire dans un milieu herbacé dense, 2m peuvent suffire par transect. On peut envisager plusieurs variantes :

- Une ficelle tendue entre deux piquets à ras du sol;
- Une ficelle tendue avec des marques de couleur à intervalles réguliers (tous les 10cms ou tous les m selon la longueur) : on note les plantes présentes à chaque point coloré;
- Une longue ficelle tendue à ras du sol et le long de cette ligne, à intervalles réguliers, on dépose une baguette de 2m et on note toutes les plantes le long de celle-ci;
- La baguette seule jetée au hasard dans le milieu et on note le long à chaque fois.

Le nombre et la position des relevés différents dans un même milieu doivent se faire selon un plan d'échantillonnage adapté au milieu (densité de la végétation, homogénéité, précision recherchée).

Une variante s'applique à l'étude d'un gradient écologique le long d'une ligne ; par exemple, comparer un bas de pente avec le haut.

- **Avantages et inconvénient**

- **Avantages**

- Pratique et facile à mettre en œuvre ;
- Plus pratique et plus efficace que les quadrats pour une végétation haute ou très clairsemée.

- **Inconvénients**

- Dans une végétation herbacée dense, il peut être très difficile de dénombrer les individus qui touchent la ligne (individus emmêlés, couchés, …).

II.3.3.3. Quadrats

Le quadrat est un carré ou rectangle, ou forme à quatre côtés, de surface fixée à l'avance. Il est, soit en métal, en bois ou en plastique, et est utilisé dans l'écologie et la géographie pour isoler un échantillon.

Le **quadrat** est adapté à l'échantillonnage des plantes généralement Plantes herbacées Milieu herbacé bas prairie basse et pelouse, des animaux lents, les myriapodes comme les mille-pattes, les insectes et certains organismes aquatiques.

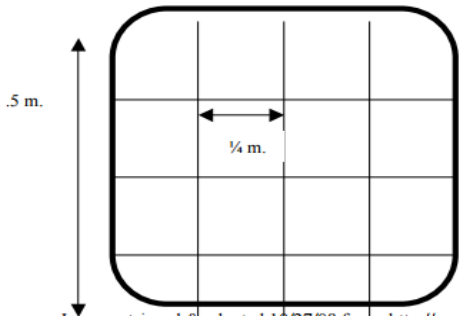


Figure II.13. Dispositif d'un quadrat

- **Objectif** : recenser la biodiversité végétale et estimer l'abondance de chaque espèce.

- **Protocole de sélection**

(1) Installer le carré dans le milieu étudié (on peut aussi utiliser un cercle de l'ordre du m2 pourvu que tous les relevés soient faits de la même manière);

(2) Identifier toutes les espèces présentes dans le carré : prélever un échantillon par espèce non identifiée et lui attribuer un numéro transitoire;

(3) Compter le nombre d'individus de chaque espèce ; pour les pieds à cheval sur les limites, on ne compte que celles qui sont enracinées dans le carré;

(4) Estimer visuellement la couverture de chaque espèce en % de la surface totale

(5) Effectuer plusieurs relevés ou **quadrats** en différents points répartis dans le milieu étudié : le nombre de relevés en fonction de la surface totale du milieu déterminera la

précision des mesures effectuées. Un des facteurs décisifs est l'homogénéité ou non de la végétation : si certaines espèces sont réparties en « taches » dans le milieu, un nombre plus élevé de quadrats sera nécessaire. La répartition des relevés se fait sur une base aléatoire prédéterminée sur un plan.

- **Données recueillies**

L'abondance de chaque espèce sera évaluée à partir de différentes mesures effectuées sur chacun des quadrats :

- La **densité** moyenne : nombre d'individus par m^2
- La **couverture** : évaluée précisément ou par tranches de pourcentages (0-25% ; 25-50%...);
- La fréquence : nombre de quadrats où l'espèce est présente /nombre total de quadrats effectués.

- **Avantages et inconvénient**

- **Avantage**

- facile à mettre en œuvre (très utilisé en écologie de terrain);
- permet de se concentrer sur une petite surface.

- **Inconvénients**

- Prend du temps : décompter les individus est souvent long et complexe (plantes enchevêtrées ou couchées au sol difficiles à différencier);
- La mesure de la fréquence est délicate pour les espèces non réparties uniformément;
- L'évaluation de la couverture peut faire l'objet d'erreurs d'appréciation;
- Tendance à surreprésenter les espèces plus grandes, en grosses touffes ou en fleurs.

Chapitre III. Traitement des données

La végétation naturelle a une distribution hétérogène et aléatoire et des connaissances dans l'analyses de donnés plus ou moins poussées sont nécessaires à son interprétation. Les traitements de chaque type de données peuvent être soit des analyses statistiques, soit des traitements spécifiques aux données spatiales (traitements classiques: SIG, modélisation). Si ces traitements permettent de mettre en évidence des différences (spatiales, temporelles) significatives, alors ce type de donnée pourra être considéré comme une donnée essentielle à récolter.

Pourquoi donner une telle importance à l'outil statistique ? La définition de Schwartz est déjà un élément de réponse : « La statistique est un mode de pensée permettant de

recueillir, de traiter et d'interpréter les données qu'on rencontre dans divers domaines, et tout particulièrement dans les sciences de la vie, du fait que ces données présentent une caractéristique essentielle : la variabilité ». Ou encore : «L'individu diffère des autres individus, il diffère de lui-même d'un moment à l'autre. Ainsi le domaine du vivant est fait de cas particuliers. Mais il n'y a de science que du général. Comment alors peut-il y avoir une science du vivant ? Voilà posé le problème : il faut adapter la science au domaine du particulier. Du fait de la variabilité, on est dans le domaine de l'incertain. Adapter une science au particulier, c'est inventer une science de l'incertain ».

Les statistiques permettent de confirmer ou d'infirmer une hypothèse avec une marge d'erreur la plus petite possible, et/ou prédire un évènement à l'aide d'outils. Il existe deux types de statistiques:

- **Les statistiques descriptives ou déductives,** s'occupe de la description des données, a pour but de résumer et de présenter les données observées pour que l'on puisse en prendre connaissance facilement : tableaux, graphiques ...

- **Les statistiques inductives ou inférences,** s'occupe de tirer des conclusions générales à partir d'expériences et de faire des prévisions. Permet d'étendre ou de généraliser dans certaines conditions les conclusions obtenues. Cette phase comporte certains risques d'erreur qui peuvent être mesurés en faisant appel à la théorie des probabilités.

Lorsque l'on réalise des comparaisons de population ou que l'on compare une population à une valeur théorique, il existe deux grandes familles de tests : les tests paramétriques, et les tests non paramétriques.

- **Test paramétrique** qui s'applique sur des données quantitatives suppose nécessairement que la distribution des individus suive **une loi de distribution, le plus souvent la loi normale** (ou Loi de Laplace-Gauss). Dans le cadre des études écologiques au sein d'un observatoire, le nombre de répétition ne pouvant être très élevé en raison du coût que cela engendrerait, les statistiques non paramétriques seront souvent utilisées pour analyser les données.

- **Test non paramétrique**

La statistique non-paramétrique regroupe l'ensemble des méthodes statistiques développées pour l'analyse des données semi-quantitatives et qualitatives. Elle peut aussi être appliquée à des données quantitatives dans certaines conditions.

On aura recours aux statistiques non paramétriques dans les circonstances suivantes :
(1). lorsqu'une ou plusieurs des variables à comparer sont mesurées sur une échelle semi-quantitative ;

(2). lorsque l'on désire mettre en évidence toute relation monotone (croissante ou décroissante) entre des descripteurs quantitatifs, par opposition à des relations strictement linéaires ;

(3). lorsqu'un ou plusieurs descripteurs (quantitatifs) ne sont pas distribués normalement, ou encore que l'on ne veut pas en vérifier la normalité ;
(4). lorsque le nombre d'observations est faible.

Généralement moins puissante que la statistique paramétrique et aux calculs quelquefois plus fastidieux, la statistique non paramétrique est plus rarement utilisée mais présente l'avantage d'être plus robuste quant aux hypothèses posées. La statistique non paramétrique est particulièrement intéressante quand les échantillons sont petits et que **la distribution s'écarte de la normalité.**

III.1. Structure des données écologiques

Une base de données est un ensemble structuré de données enregistrées sur support informatique, destiné à permettre un accès rapide à l'information. Les données écologiques sont toujours organisées sous forme d'une **matrice des données** et on entend par structure d'une matrice, l'organisation de l'ensemble des objets ou des descripteurs en gradient dans un continuum ou encore un sous-ensemble (Discontinuité), cette organisation étant une caractéristique de la matrice de donnée. Les gradients ressortent des méthodes d'ordination, alors que les sous-ensembles des méthodes de classification ou de regroupement.

Dans sa pratique quotidienne, l'écologue doit manipuler une grande quantité de données de forme disparate, collectées dans des systèmes écologiques hiérarchisés en différents niveaux d'intégration. Bouché à bien analysé les difficultés et les limites de la pratique traditionnelle de l'écologue. On peut évoquer certains problèmes répandus :

- Difficulté de l'*accès aux données de base* ("données initiales contrôlées" ou DICs);
- Difficulté de l'*organisation et de la circulation des données* : on passe plus de temps à la construction des matrices de données qu'à leur traitement dans des analyses multivariées!;
- Difficultés de *connexions entre les différentes études sectorielles*;
- Difficultés liées aux *normes actuelles des publications scientifiques*;

Face à ces difficultés, l'écologue peut et doit remettre en question ses habitudes de travail en développant des outils de gestion des données (bases de données relationnelles, bases de connaissances, systèmes experts) appropriés à ses objectifs.

III.2. Méthodes statistiques d'analyses multivariées

Les analyses multivariées se partagent en deux grandes classes : les méthodes d'ordination, qui ordonnent les objets selon des gradients, et les méthodes de classification, qui classent les objets dans des groupes.

III.2.1. Méthodes d'ordination

Les méthodes d'ordination ou d'analyse d'inertie sont toutes basées sur le même principe. Elles consistent à extraire la plus grande quantité d'information contenue dans un tableau de données pour fournir des représentations graphiques susceptibles de faciliter l'interprétation des résultats. Les structures du tableau de données sont recherchées à la fois selon l'organisation des individus en lignes et selon celle des variables en colonnes.

L'ordination cherche à mettre la végétation en relation avec un ou plusieurs gradients environnementaux associés aux axes de l'analyse. Elle consiste à placer chaque relevé en relation avec un ou plusieurs axes de telle manière que sa position relative par rapport aux axes apporte un maximum d'informations sur sa composition. Les techniques d'ordination sont des outils pour mettre les données floristiques en relation avec les facteurs environnementaux susceptibles d'affecter la composition de la végétation.

L'ordination est considérée comme une technique d'analyse directe ou indirecte de gradient (ou variations plus ou moins continues) de l'environnement.

L'ordination, prise au sens large, se fixe trois objectifs:

(1). Synthétiser les données d'un tableau de relevés;
*(2).*Mettre les communautés en relation avec des gradients de l'environnement;
(3). Comprendre la structure des communautés.

Au sens strict, l'ordination a pour but de définir un espace écologique à partir des données originelles.

Donc l'analyse classique comprend deux étapes :

(1). Produire une synthèse de la structure de la communauté, en la ramenant à un espace comprenant typiquement de une à trois dimensions ;
(2). Comparer la structure ainsi révélée avec l'information disponible sur l'environnement.

Les méthodes d'ordination en espace réduits visent à résumer la majeure partie de l'information contenue dans une matrice de données par la recherche de sous-espaces de dimension minimale. Généralement plans ou axes factoriels, ces espaces réduits permettent d'observer au mieux la dispersion des individus (lignes du tableau). Un axe factoriel est caractérisé par un taux d'inertie qui exprime le pourcentage de l'information globale (variance) qu'il "explique". Le premier axe trouvé est celui de plus grande inertie, c'est-à-dire celui qui résume le mieux la dispersion du nuage de points (i.e. l'inertie du nuage). Le second, perpendiculaire au premier et d'inertie plus faible, résume l'information du nuage de points dans une autre direction. Le découpage du nuage d'individus induit par la recherche des axes principaux se poursuit ainsi jusqu'à ce que la dispersion totale du nuage soit expliquée.

Les méthodes d'ordination en espace réduit sont très nombreuses telles que:

- L'analyse en composantes principales;
- L'analyse factorielle des correspondances.

III.2.1.1. Analyse en Composantes Principales ACP

L **Analyse en Composantes Principales ACP** ou **PCA** (*principal component analysis*), est décrite optimalement pour des données **quantitatives** homogènes. L'analyse en composantes principales (A.C.P.) est une technique qui permet de faire la synthèse de l'information contenue dans un grand nombre de variables. Cette technique émerge un nombre réduit de nouvelles variables désignés par «composantes principales». D'après Falissard, les composantes principales sont de nouvelles variables indépendantes, combinaison linéaire des variables initiales possédant une variance maximale.

III.2.1.2. Analyse Factorielle des Correspondances AFC

L'**Analyse Factorielle des Correspondances AFC** est une méthode informatisée qui permet **l'ordination des données en espace réduit**. Elle convient bien à des tableaux **qualitatifs**, en présence-absence ou en fréquence. L'AFC, est une technique statistique dont l'objectif est d'évaluer l'interaction entre plusieurs variables. Elle permet une projection simultanée des relevés et des espèces-paramètres sur le même graphique et ainsi de pouvoir interpréter les groupes de relevés par l'ensemble d'espèces-paramètres ou inversement. L'AFC permet de mettre en lumière des dépendances ou des correspondances entre des données contenues dans des tableaux multidimensionnels. Cette analyse étudie donc la correspondance entre les différentes variables pour réduire la masse d'informations initiales. Les dépendances sont ensuite hiérarchisées.

III.2.2. Méthodes de classification

Les méthodes de classification ont pour objet le regroupement d'individus (stations ou espèces) possédant des caractères communs en un nombre optimal de classes distinctes homogènes. Les méthodes de classification sont très nombreuses. On distingue entre autres, parmi les méthodes de classification, **la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique CAH.** Cette méthode de classification est destinée à produire des groupements décrits par un certain nombre de variables ou caractères. Elle consiste à créer une suite de partitions en classes de moins en moins fines, emboîtées les unes dans les autres. Le critère algorithmique, liant les individus par leur ressemblance, détermine alors un arbre de classification ou dendrogramme, obtenu de manière ascendante, partant d'un individu vers la totalité des objets. Il existe plusieurs méthodes de CAH et plusieurs choix de calcul de la distance entre deux objets, deux classes ou un objet et une classe. C'est l'indice de Bray-Curtis qui a été retenu, avec la technique de regroupement agglomératif moyen, comme le recommandent Legendre et Legendre.

III.3. Analyse différentielle

III.3.1. Définition

L'analyse différentielle de CZEKANOWSKI est une technique statistique simple appliquée à la phytosociologie, elle est basée sur le calcul du coefficient de communauté floristique. Pour chaque relevé, ce coefficient représente le pourcentage d'espèces qu'il a en commun avec chacun des autres.

Selon Ndjekouneyom, l'analyse différentielle est une méthode d'étude statistique des liaisons interspécifiques. Elle permet d'établir des similitudes floristiques entre les relevés. « L'évaluation de cette proximité repose sur le calcule d'un coefficient dit de similitude dont l'objet est de quantifier les ressemblances des listes d'espèces prises deux à deux » (Figure III.1).

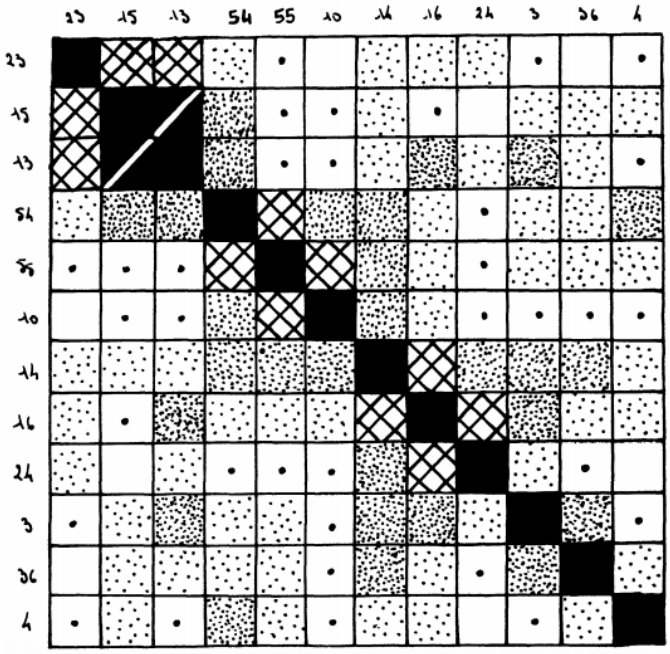


Figure III. 1. Matrice d'analyse différentielle

III.3.2. Coefficients de similitude

L'idée de caractériser le degré de ressemblance entre relevés au moyen de pourcentage d'espèces qu'ils ont en commun est ancienne. Plusieurs formules du coefficient de similitude existent permet lesquelles:

$$Pj = \frac{c}{a+b-c} \times 100 \quad \rightarrow Indice\ de\ Jaccard\ 1901$$

$$Pc = \frac{c}{a+b} \times 100 \ \rightarrow Indice\ de\ Czekanowski\ 1909$$

$$Pk = \frac{\left(\frac{c}{a}\right) + \left(\frac{c}{b}\right)}{2} \times 100 \rightarrow Indice\ de\ Kulczinki\ 1928$$

$$Ps = \frac{2c}{a+b} \times 100 \rightarrow Indice\ de\ S\emptyset rensen\ 1948$$

- *a : représente le nombre d'espèce dans la liste A;*
- *b : représente le nombre d'espèce dans la liste B;*
- *c: représente le nombre d'espèces Communes aux listes A et B.*

Dans les différents cas:

▪ Si l'indice P augmente, un nombre important d'espèces se rencontre dans les deux listes évoquant ainsi que la biodiversité est faible;

▪ Dans le cas contraire, si l'indice diminue, on ne rencontrera qu'un faible nombre d'espèces présentes sur les deux listes (forte biodiversité).

- **La distance de Hamming**

Daget *et al.*, proposent, pour les comparaisons floristiques, entre deux relevés, de recourir au calcul de la distance de Hamming selon la formule :

$$H = 1 - J$$

Où

J est le coefficient de communauté de Jaccard tel qu'il est explicité plus haut. Daget et *al*., retiennent les seuils suivants :

- Différence floristique très faible : H < 20,
- Différence floristique faible : 20 < H < 40,
- Différence floristique moyenne : 40 < H < 60,
- Différence floristique forte : 60 < H < 80,
- Différence floristique très forte : 80 < H

III.3.3. Dendrites

La méthode consiste à joindre chaque relevé à celui avec lequel il a le coefficient de similitude le plus élevé. On obtient ainsi des segments plus ou moins ramifiés (Figure III.2). On appelle groupe les provisoires les portions de dendrites dans lesquelles tous les coefficients sont >50%. Cela ne garantit pas que les groupes provisoires homogènes. Pour cela il faut tenir compte de tous les coefficients de similitude entre relevés du groupe provisoire pris deux à deux. On sera alors amené à fragmenter le groupe provisoire en

s'efforçant d'obtenir le minimum de groupes. Un dendrite non ramifier est en général l'indice d'une variation linéaire de la végétation. La connaissance des dendrites facilite donc la réalisation des tableaux de relevés, mais ne semble pas être utilisées comme principe unique de la classification par Falinski. Ramsay, par contre, définit sur cette base des « nodums » qu'il soumet à une ordination du type Bray et Curtis.

III.4. Analyse fréquentielle

La méthode analyse fréquentielle de l'écologie des espèces ou des profils écologiques est une méthode statistique consiste à regrouper les espèces suivant leur affinité pour les différentes modalités d'un facteur du milieu. Rappelons que dans un ensemble de relevés, la distribution des fréquences d'une espèce dans les classes d'une variable constitue son profil des fréquences absolues. Cette distribution ne rend pas compte directement du comportement de chaque espèce vis à vis des classes de la variable considérée.

Cette méthode a été élaborée à partir de la théorie de la l'information. Elle permet de calculer l'information mutuelle existant entre les espèces et les facteurs de l'environnement à partir des fréquences de présence et d'absence de ces espèces et de ces facteurs dans un ensemble de relevés phytoécologiques. Cette information, **notée I (L, E), mesure l'intensité de la liaison entre une espèce et une variable**. Elle se calcule pour chaque espèce vis-à-vis de chaque descripteur.

- **Entropie relative à un facteur** : Le profil d'ensemble pour un facteur, permet de calculer une entropie, appelée « entropie – facteur » H (L) Ou:

$$H(L) = \sum_{I}^{NK} \frac{U(K)}{NR} \text{Log}_2 \frac{NR}{R(K)}$$

- ***NK*** *= Nombre de classes d'un facteur;*
- ***R (K)*** *= Nombre de relevés effectués dans la classe K;*
- ***NR*** *= Nombre total de relevés.*

- **Entropie relative à une espèce** : Dans un ensemble de relevés, le nombre des présences ou des absences de chaque espèce permet de calculer une entropie, appelée « entropie – espèce » H (E). Ou :

$$H(E) = \frac{U(E)}{NR} \text{Log}_2 \frac{NR}{U(E)} + \frac{V(E)}{NR} \text{Log}_2 \frac{NR}{V(E)}$$

- ***U (E)*** *= Nombre total des relevés ou l'espèce E est présente;*
- ***V (E)*** *= Nombre total des relevés ou l'espèce est absente;*
- ***NR*** *= Nombre total de relevés.*

	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22
12		61,3	65,6	74,6	55,2	64,7	51,8	58,5	61,0	65,7
13	62 19		62,1	59,0	65,4	71,0	58,3	50,8	52,6	50,0
14	64 21	58 18		57,1	51,8	62,5	48,0	59,0	56,4	63,6
16	67 25	61 18	63		59,6	71,6	56,6	46,9	59,2	75,4
17	58 16	52 17	54 14	57 17		62,1	68,2	50,9	50,0	43,3
18	68 22	62 22	64 20	67 24	58 18		55,5	55,4	58,5	62,8
19	54 14	48 14	50 12	53 15	44 15	54 15		47,1	47,0	50,0
20	65 19	59 15	61 18	64 15	55 14	65 18	51 12		48,1	47,8
21	82 25	76 20	78 22	81 24	72 18	82 24	68 16	79 19		61,9
22	70 23	64 16	66 21	69 26	60 13	70 22	56 14	67 16	84 26	

	12	13
12		P
13	a+b c	

Légende de la matrice des similitudes

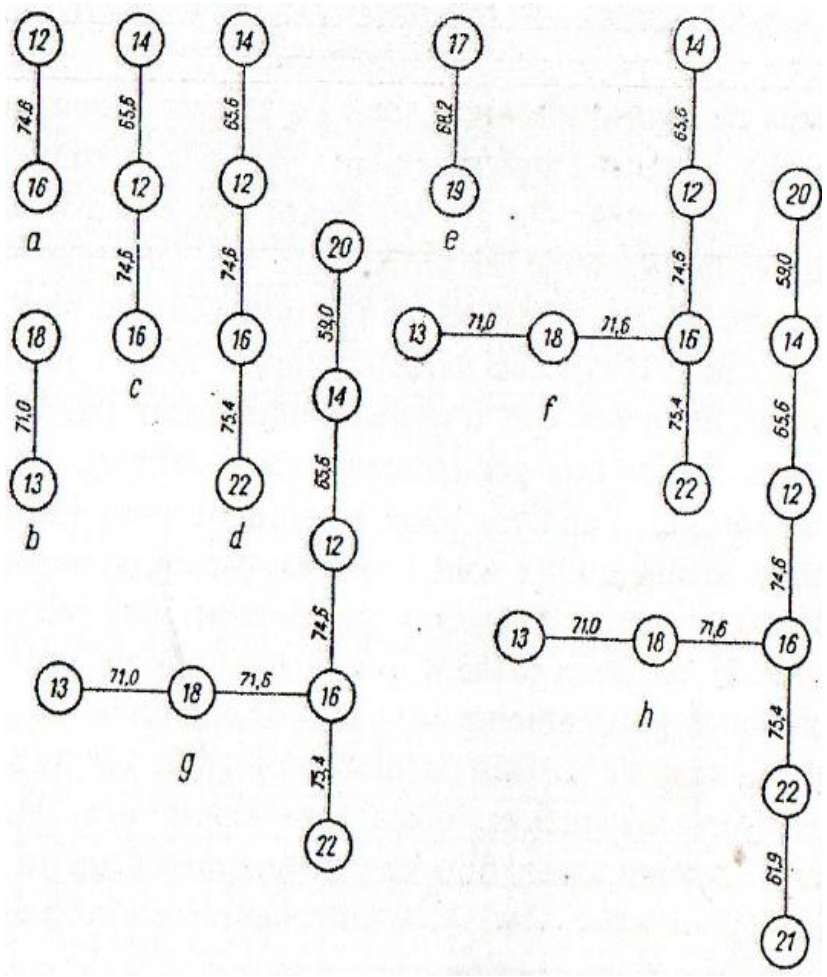


Figure III. 2. Matrices des coefficients de similitudes et de dendrites correspondant à dix relevés

- **Information mutuelle** : L'information apportée par un profil écologique d'une espèce pour un facteur, appelée information mutuelle de l'espèce E pour le facteur L, est une différence d'entropie .Elle se définit par I (L ; E).

$$I(L;E) = \sum_{I}^{NK} \frac{U(K)}{NR} \text{Log}_2 \frac{U(K)}{R(K)} \frac{NR}{U(E)} \sum_{I}^{NK} \frac{V(K)}{NR} \text{Log}_2 \frac{V(K)}{R(K)} \frac{NR}{V(E)}$$

- ***NK*** *= Nombre de classes d'un facteur;*
- ***R(K)*** *= Nombre de relevés effectués dans la classe K;*
- ***NR*** *= Nombre total de relevés;*
- ***U(E)*** *= Nombre total des relevés ou l'espèce E est présente;*
- ***V(E)*** *= Nombre total des relevés ou l'espèce est absente;*
- ***UK****= Nombre de relevés dans la classe K où l'espèce E est présente;*
- ***VK****= Nombre de relevés dans la classe K où l'espèce E est absente.*

Chapitre IV. Classification des types de végétation

IV.1. Méthodes Physionomiques

Les méthodes les plus anciennes et les plus simples de classification se basent sur la physionomie de la végétation, c'est-à-dire sa structure qualitative, sans référence nécessaire à sa composition floristique. Ces unité sont souvent appelées «formation». Une formation est définie comme "tout groupement présentant une physionomie homogène et constante due à la dominance soit d'une ou de plusieurs espèces sociales, soit d'espèces ayant un caractère biologique commun". II existe de nombreuses classifications des formations végétales tels que: forêt, garrigue, maquis, pelouse, steppe, prairie, savanes etc.

Certaines nomenclatures des formations utilisent une dénomination par l'espèce dominante, le terme "physionomie" est aussi utilisé pour désigner une caractérisation de la végétation par les abondances spécifiques relatives ou par les espèces dominantes. Le terme physionomie au sens courant est : "l'aspect particulier qui permet de distinguer un objet d'un autre". La physionomie d'une communauté est donc son allure déterminée, par les traits marquants de sa composition floristique, de sa structure, de la morphologie et de la phénologie des individus qui la composent. La structure de la végétation influence sa physionomie.

Autrement dit, dans une communauté végétale donnée, une ou plusieurs espèces composantes vont pouvoir imposer une physionomie particulière et homogène, par leur prédominance soit du nombre, soit de la taille de leurs individus; cette physionomie résulte, essentiellement, de la forme biologique des espèces dominantes (arbres, herbes …); dans cette méthode, compte est tenu de la notion de formations végétales.

IV.2.Méthodes dynamiques

Le tapis végétal est en rapport beaucoup plus étroit avec le milieu dont la structure était dépendante seulement de celui-ci. Les communautés végétales ne sont pas stables. Gounot a montré que, sur un sol dénudé se développe successivement dans le temps une série de communauté végétale, dont chacune prépare les conditions favorable à la suivante. L'ensemble de ces communautés constitue une succession. Toutes les successions existantes dans une région donnée aboutissent à un climax (climax=formation=association) ou climax climacique dominé par une ou quelques essences et constituant donc une formation physionomique. L'assemblage en mosaïque d'une matrice climatique et d'éléments différents constitue le polyclimax.

IV.3. Méthodes Phytosociologiques

IV.3.1. Définition

La phytosociologie est une discipline apparue au début du XX ième siècle, en Europe de l'Est. En se fondant sur des inventaires floristiques, la phytosociologie permet de décrire précisément une communauté végétale en fonction de sa composition spécifique, reflet des caractéristiques du milieu. Cette discipline repose sur une méthodologie précise d'inventaire floristique (choix du lieu du relevé, surface échantillonnée, critères pour décrire l'abondance, la strate,..) et de classification des communautés végétales. La phytosociologie est donc, la science qui étudie les ensembles de végétaux et cherche à les classer par des méthodes proches de celles de la systématique, en ne se fondant que sur des critères de composition floristique. La phytosociologie est la partie de l'écologie végétale dont l'objet est la connaissance des associations végétales.

La méthode phytosociologique, appelée aussi méthode sigmatiste peut être définie comme « *la partie de la géobotanique ou de l'écologie qui étudie les communautés végétales et leur relation avec le milieu* ». L'unité fondamentale de cette discipline est **l'association végétale**. Ce concept clé a été défini pour la première fois par Flahault et Schroter en 1910 lors du Congres international de botanique de Bruxelles : «*Une association végétale est un groupement végétal de composition floristique déterminée, présentant une physionomie uniforme et croissant dans des conditions stationnelles également uniformes. L'association est l'unité fondamentale de la synécologie*».

Selon Guinochet l'association végétale est une « combinaison originale d'espèces dont certaines, dites caractéristiques, lui sont plus particulièrement liées, les autres étant qualifiées de compagnes ». Gharzouli définie l'individu d'association comme l'objet concret perçu sur le terrain que va porter l'exécution du relevé floristique et la notation des caractères écologiques.

Biondi, développe les cinq parties résumant les principaux domaines d'étude de la phytosociologie.

- **L'organisation des communautés vegetales**: l'étude de la composition spécifique des communautés vegetales ;
- **La synécologie**: l'étude des relations des communautés vegetales entre elles et avec le milieu ;
- **La syngénétique** : l'étude de la naissance, du développement et du déclin des communautés végétales ;
- **La synchorologie** : l'étude de l'occurrence et de la distribution des communautés végétales ;
- **La systématique phytosociologique**: la délimitation des unités vegetales, leur regroupement dans les unités supérieures et l'arrangement systématique de ces unités.

IV.3.2. Phytosociologie dynamico-caténale

La phytosociologie dynamico-caténale ou phytosociologie intégrée est la science qui réunit les différentes approches phytosociologiques que sont la phytosociologie classique, la symphytosociologie et la géosymphytosociologie. Selon Biondi, elle offre la possibilité "*d'analyser et de quantifier, selon des modèles écologiques, les communautés végétales, et les interactions dynamiques qui existent entre elles ainsi que les interactions à l'échelle du paysage*". La phytosociologie dynamico-caténale est la partie de la phytosociologie qui permet de décrire le paysage végétal. L'analyse du tapis végétal peut en effet être réalisée selon trois niveaux d'intégration:

- **La phytosociologie classique** (ou phytosociologie phytocoenotique) qui vise à définir les communautés végétales en présence et leur écologie au niveau de la phytocénose;
- **La symphytosociologie** (ou phytosociologie sériale) qui vise à définir des ensembles de végétations en lien dynamique dans le temps (séries de végétations);
- **La géosymphytosociologie** (ou phytosociologie caténale ou phytosociologie paysagère à proprement parler) qui vise à définir des ensembles de séries de végétations contiguës au niveau d'unités paysagères plus ou moins homogènes.

Gillet *et al*., Notent également qu'un quatrième niveau d'intégration est classiquement cite, celui de la **synusie**, décrit par la **phytosociologie synusiale** qui étudie les différents compartiments d'une phytocénose en fonction de la forme biologique des individus d'associations.

IV.3.3. Symphytosociologie et la géosymphytosociologie

La symphytosociologie et la géosymphytosociologie sont deux approches permettant d'aborder l'étude des communautés végétales en tant qu'éléments constitutifs des *paysages*.

IV.3.3.1. Phytosociologie dynamique ou symphytosociologie

La symphytosociologie s'intéresse aux relations dynamiques qui lient les associations au sein d'unités spatiales homogènes. Son objectif est en effet d'étudier les « associations d'associations» au sein d'unités spatiales données. L'unité de base de la symphytosociologie est la

synassociation ou sigmetum. Le concept de sigmassociation apparaît clairement à travers la combinaison répétitive d'associations végétales au sein de paysages homogènes et analogues.

IV.3.3.2. Phytosociologie paysagère ou géosymphytosociologie

La géosymphytosociologie étudie les ensembles de séries de végétations contiguës réparties selon un gradient édaphique au sein d'une zone présentant des caractéristiques biogéographiques, climatiques et géomorphologiques plus ou moins homogènes. L'unité de base de cette discipline est le **géosigmetum**, défini par la comparaison statistique de géosigmarelevés (liste quantifiée des séries de vegetation ou des groupements végétaux auxquels est attribue un coefficient de couverture et, pour les communautés vegetales, un coefficient de forme).

Chapitre V. Approches méthodologiques d'aménagement sur des bases écologiques

V.1. Principes généraux

V.1. 1. Définition

DEF 1: L'aménagement du territoire est l'un des moyens disponibles pour modifier, rectifier, corriger, adapter, transformer, contrôler et diriger le développement. Il constitue, le processus d'organisation du milieu permettant d'orienter son utilisation et sa mise en valeur, de manière à réaliser les objectifs de développement de la communauté. Un aménagement du territoire favorisant la diversité des écosystèmes permet ainsi de maintenir des processus de régulation et de support permettant ces biens et services.

DEF 2: D'après Van Damme *et al.*, un aménagement « est un système qui tente d'imiter les modèles et les processus écologiques, dans le but de maintenir ou de restaurer les niveaux naturels de composition, de structure et de fonction des écosystèmes à l'intérieur des peuplements et dans le paysage».

DEF 3: L'aménagement écosystémique constitue un moyen privilégié pour répondre aux préoccupations environnementales et aménager les forêts de façon durable.

V.1. 2. Objectifs

L'aménagement contribue plus particulièrement:

- à la conservation de la diversité biologique;
- au maintien de la viabilité des écosystèmes ;
- au maintien et à l'amélioration de l'état et de la productivité des écosystèmes;
- à la conservation des sols et de l'eau;
- au maintien de l'apport des écosystèmes (forestiers…) aux grands cycles écologiques;

- au maintien des avantages socioéconomiques multiples que les forêts procurent à la société;
- à la prise en compte, dans les choix de développement, des valeurs et des besoins exprimés par les populations concernées.

L'aménagement du territoire doit ainsi tenir compte des spécificités du réseau d'aires protégées.

L'aménagement du territoire, peut affecte à différentes échelles, les niveaux hiérarchiques de la diversité biologique et contribuent à la fragmentation des milieux par destruction des habitats, facteur d'appauvrissement de la diversité biologique.

- À l'échelle régionale, l'aménagement, l'introduction d'espèces et l'exploitation des ressources vivantes affectent la dynamique des écosystèmes et des peuplements, et la biologie des populations. Elles augmentent la dominance en raréfiant les populations de la plupart des espèces des communautés modifiées tout en favorisant un petit nombre d'espèces utiles ou opportunistes. Cela suppose une banalisation de la flore.

- À l'échelle locale, la dégradation et la création d'habitats affectent la biologie des populations.

V.2. Standard écologique

La perturbation d'un écosystème consiste en un (des) événement(s) altérant -dans le temps et dans l'espace- les relations entre les organismes vivants et leurs habitats. Ces perturbations peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Il a pour conséquence la modification de la structure des populations, des communautés et de l'écosystème. Les perturbations réduisent fortement l'abondance des espèces tout en limitant parfois la dominance de certaines, peuvent entrainer la perte de plusieurs espèces d'un même taxon et par conséquent la perte de fonctions éco-systémiques à certaine niveaux. Les substitutions de fonctions altèrent la stabilité et les propriétés des écosystèmes telles que la productivité, les taux de décomposition, les cycles des nutriments et la résilience. L'importance de ces menaces à la biodiversité n'a toutefois reçu une attention sérieuse de la part des scientifiques depuis des années. Il est apparu que la seule protection et gestion des fragments rémanents de certains écosystèmes naturels et semi-naturels peut ne pas garantir la conservation à long terme de tous les composants de la biodiversité. Ainsi, outre un besoin de mesures de protection des habitats et des espèces, est né un besoin de restauration écologique.

La restauration écologique est une pratique bien établie en biologie de la conservation dont le but est d'aider le rétablissement d'un écosystème qui a été perturbé. Elle est une action intentionnelle qui **initie ou accélère l'autoréparation** d'un écosystème en respectant sa santé, son intégrité et sa gestion durable.

La restauration écologique est le processus qui assiste l'autoréparation (rétablissement) d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. Elle vise donc à obtenir les résultats les plus élevés et la meilleure récupération possible pour à la fois compenser les dommages passés et pour augmenter progressivement l'étendue et la bonne fonctionnalité des écosystèmes en péril de la planète. La restauration écologique vise à « assister la régénération » d'un écosystème naturel. C'est-à-dire que l'activité de restauration place un écosystème sur une trajectoire de rétablissement pour qu'il puisse persister et que ses espèces puissent s'adapter et évoluer.

La restauration tend vers le retour d'un écosystème à sa trajectoire historique. Les conditions historiques sont de ce fait un point de départ idéal pour un plan de restauration.

L'écosystème restauré ne va pas nécessairement retrouver son stade antérieur, puisque des contraintes et des conditions actuelles peuvent l'entraîner vers une trajectoire altérée. La trajectoire historique d'un écosystème sévèrement touché peut être difficile voire impossible à déterminer avec exactitude. Cependant, la direction et les limites générales de cette trajectoire peuvent être établies par une combinaison de connaissances sur la structure préexistante de l'écosystème endommagé, sa composition et son fonctionnement ; d'études sur des écosystèmes intacts comparables ; d'informations sur les conditions environnementales régionales ; et d'analyses d'autres informations écologiques, culturelles et références historiques.

Les spécialistes, le personnel opérationnel, les planificateurs, les gestionnaires, les bailleurs de fonds et les organismes de réglementation ont besoin de normes pour les aider à élaborer des plans de haute qualité et atteindre des résultats acceptables en matière de rétablissement de l'écosystème. Cela s'applique à la fois à la restauration obligatoire et à la restauration volontaire.

De plus, bien que de nombreux projets réussissent, les résultats de la restauration écologique sont souvent en deçà des attentes, ce qui augmente encore le besoin **de Standards écologiques.**

Les Standards peuvent aider à optimiser le succès des efforts de restauration écologique, qu'ils servent à guider les organismes et les membres de la communauté engagés dans une restauration non obligatoire, ou à guider les organismes de réglementation dans leur élaboration de critères de consentement pour la restauration obligatoire et évaluer si ces critères ont été atteints.

Ces Standards définissent comme activité de restauration écologique toute activité dont le but ultime est le rétablissement des écosystèmes, dans la mesure du possible et par rapport à un modèle autochtone local approprié **« un écosystème de référence** », quelle que soit la période nécessaire pour atteindre le résultat du rétablissement.

Un écosystème de référence est un modèle représentant approximativement la cible du projet de restauration. . En l'absence d'écosystèmes intacts et appropriés du même type près du site à restaurer, le modèle de référence peut être dérivé de multiples sources d'informations sur les organismes vivants passés et présents et les conditions qui se produisent sur le site ou à proximité; complété par des informations sur les changements anticipés des conditions environnementales susceptibles d'entraîner des altérations des assemblages biologiques. Les niveaux de rétablissement recherchés et atteints doivent être identifiés respectivement dans la planification et les rapports d'un projet de restauration. Le rétablissement complet est défini comme l'état ou la condition selon lequel toutes **les catégories d'attributs** clés de l'écosystème correspondent étroitement à celles du modèle de référence.

Six **catégories d'attributs écosystémiques** clés sont énumérées dans le tableau V.1. Étant donné la très grande diversité d'écosystèmes pouvant impliquer une restauration écologique, ces catégories sont nécessairement larges et ne peuvent être mesurées que si elles sont subdivisées en variables suffisamment détaillées pour informer les objectifs opérationnels et les objectifs à long terme d'un projet donné.

Tableau V.1. Principales catégories d'attributs de l'écosystème et exemples d'objectifs généraux susceptibles d'être interprétés pour chaque catégorie d'attribut dans un projet de restauration.

ATTRIBUT	**Exemples d'objectifs généraux pour lesquels des objectifs opérationnels et à long terme plus spécifiques au projet devraient être élaborés**
Absence de menaces	Cessation des menaces telles que la sur-utilisation et la contamination, l'élimination ou le contrôle des espèces envahissantes
Conditions physiques	Rétablissement des conditions hydrologiques et de substrat.
Composition spécifique	Présence d'espèces végétales et animales cibles et absence d'espèces indésirables.
Diversité structurelle	Rétablissement des strates, des réseaux trophiques fauniques et de la diversité spatiale des habitats.
Fonctionnalité De l'écosystème	Niveaux appropriés de croissance et de productivité, rétablissement du cycle des éléments nutritifs et de décomposition, éléments de l'habitat, interactions entre les plantes et les animaux, facteurs de stress normaux, reproduction continue et régénération des espèces de l'écosystème.
Echanges externes	Rétablissement des connexions et de la connectivité pour la migration et le flux de gènes ; et pour les flux comprenant l'hydrologie, le feu ou d'autres processus à l'échelle du paysage.

Pour aider les gestionnaires, les spécialistes et les autorités réglementaires à effectuer les suivis temporels des progrès vers les objectifs du projet, les Standards fournissent un outil à cinq niveaux ou « étoiles », permettant d'évaluer et de classer le degré de rétablissement au cours du temps (tableau V. 2).

Tableau V.2. Résumé des normes génériques pour les niveaux de rétablissement de 1 à 5 étoiles

Nbr d'étoiles	synthèse des résultats du rétablissement
*	Le maintien de la dégradation est empêché. Les substrats sont assainis (physiquement et chimiquement). Un certain nombre d'organismes vivants autochtones sont présents ; les niches de recrutement futures ne sont pas annulées par des caractéristiques biotiques ou abiotiques. Des améliorations futures pour tous les attributs sont prévus et la gestion future du site est pérennisée.
**	Les menaces provenant des zones adjacentes commencent à être gérées ou atténuées. Le site a un petit sous-ensemble d'espèces autochtones caractéristiques et une faible menace d'espèces indésirables sur le site. Une connectivité accrue est arrangée avec les propriétaires des propriétés adjacentes.
***	Les menaces adjacentes sont gérées ou atténuées et la menace d'espèces indésirables sur le site est très faible. Un sous-ensemble de taille moyenne d'espèces autochtones caractéristiques est établi et certaines preuves de la fonctionnalité de l'écosystème commencent. Il y a des preuves d'une connectivité améliorée.
****	Un sous-ensemble important d'organismes autochtones caractéristiques est présent (représentant tous les groupes d'espèces), apportant la preuve d'une structure des communautés en développement et d'un début des processus écosystémiques. La présence d'une connectivité améliorée est établie et les menaces environnantes sont gérées ou atténuées.
*****	Un assemblage caractéristique des organismes est établi, à un point où la complexité structurelle et trophique est susceptible de se développer sans autre intervention. Les flux avec d'autres écosystèmes ou communautés voisines sont possibles et commencent. Des niveaux élevés de résilience sont probables avec le retour de régimes de perturbations appropriés. Des dispositifs de gestion à long terme sont en place.

V.3. Différences avec les autres méthodes

Le choix raisonne d'une trajectoire future pour un écosystème donne implique de prendre en compte :

- Le stade de dégradation atteint par l'écosystème ;
- Les principales conséquences des mésusages qui en ont été faits ;
- Les éventuels usages qu'on aimerait faire dorénavant, y compris ceux qui visent à la protection de la "Nature". Il peut, par exemple, être envisage soit de ramener au plus tôt l'écosystème sur sa trajectoire antérieure, a savoir celle de l'écosystème préexistant a un moment donne de son histoire, soit de le placer sur une trajectoire partiellement différente mais conduisant cependant vers l'un des "états alternatifs stables", désigne comme "écosystème de référence" (Figure V.1.). De fait, donc, plusieurs trajectoires peuvent conduire au même "état alternatif stable" cible.

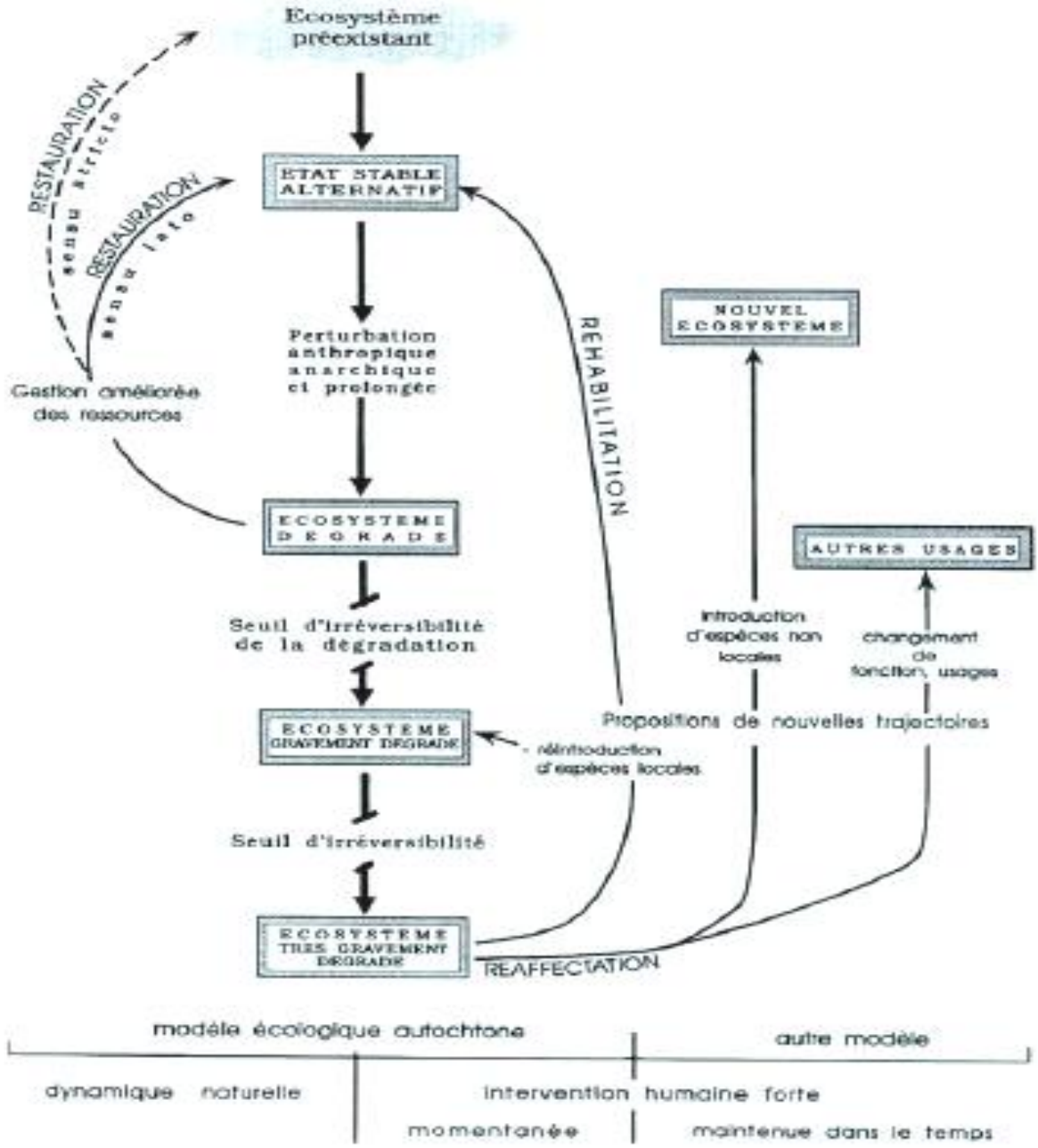


Figure V.1. Modèle général décrivant la dégradation des écosystèmes et les trois voies majeures envisagées pour y remédier

V.3.1. Réhabilitation

La réhabilitation d'un écosystème consiste à lui permettre de retrouver ses fonctions essentielles grâce à une intervention forte mais limitée dans le temps ("démarrage forcé"). La réhabilitation insiste sur la réparation des processus, de la productivité et des services de l'écosystème, tandis que le but de la restauration vise aussi à rétablir l'intégrité biotique préexistante en termes de composition spécifique et de structure des communautés. Cependant, la restauration, comme largement conçue, englobe probablement une large majorité de travaux précédemment identifiés comme faisant partie de la réhabilitation.

V.3.2. Réaffectation

La réaffectation est le terme général décrivant ce qui se passe quand une partie (ou la totalité) d'un paysage, quel que soit son état, est transformée et qu'un nouvel usage lui est assigné, Ce nouvel état est éventuellement sans relation de structure et/ou de fonctionnement avec l'écosystème préexistant.

Modifier un écosystème, par la gestion qui en est faite, afin d'en privilégier un élément ou une fonction particulière, au prix d'interventions constantes, constitue également une réaffectation. La réaffectation peut être appliquée à tous les stades de développement d'un écosystème et même, bien entendu, à un écosystème non encore perturbé.

Par souci de simplification, la réaffectation est, dans la Figure V.2., indiquée comme prenant surtout place dans les stades les plus avancés de la dégradation de l'écosystème et même éventuellement quand un ou plusieurs seuils d'irréversibilité ont été franchis.

V.3.3. Rajeunissement

Le rajeunissement (ou réjuvénation) constitue une autre technique de l'écologie de la restauration et permet de ramener, volontairement, un écosystème ayant atteint son état de maturité (ou y tendant) vers un état plus jeune marqué, par exemple, par une plus grande diversité de strates basses de végétation (changement physionomique), une plus grande richesse floristique, une production plus élevée, etc. Le rajeunissement doit cependant rester une technique parfaitement maîtrisée ; la trajectoire parcourue (Figure V.2) devant permettre d'éviter que cet écosystème ne franchisse un ou plusieurs seuils d'irréversibilité.

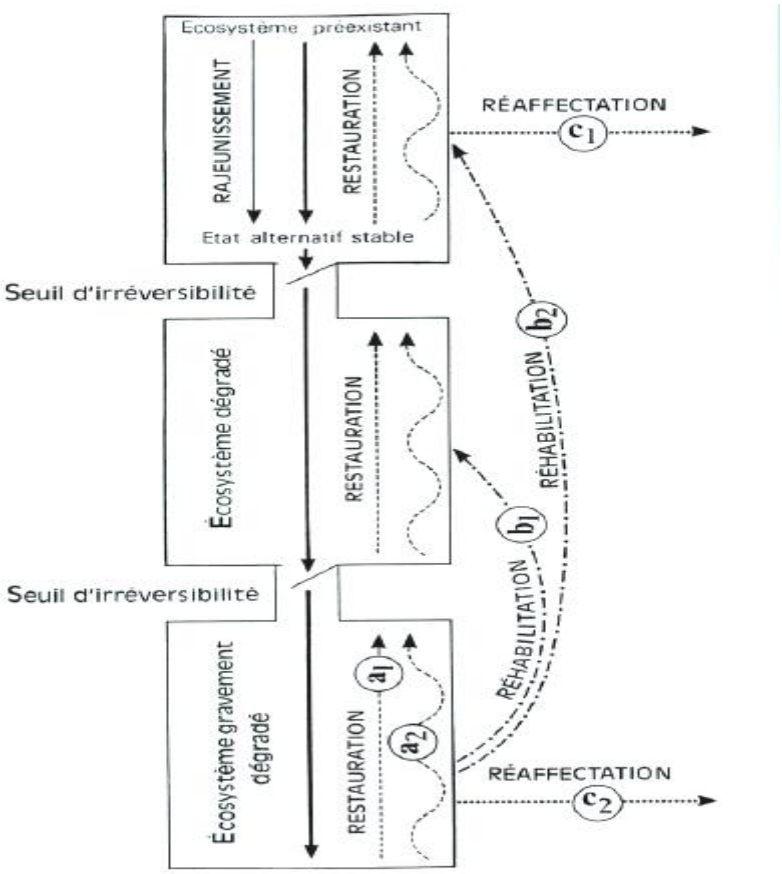


Figure V.2. Schéma explicatif des relations entre les trois voies envisagées pour remédier à la dégradation des écosystèmes et les notions de trajectoire et de seuil d'irréversibilité.

Références bibliographiques

Albert C. H., 2009. Variabilité fonctionnelle intraspécifique: quantification in situ et implications dans une vallée alpine. Ecologie, Environnement. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. tel-00450219, 210p.

Alzieu C., 2003. Bio-évaluation de la qualité environnementale des sédiments portuaires et des zones d'immersion. Ed. Ifremer, France, ISBN 2-84433-124-6, 245p.

Bélanger L. et Pineau M., 1983. La planification écologique et l'aménagement du territoire urbain québécois : une problématique. Cahiers de géographie du Québec, 27(70): 5-21. https://doi.org/10.7202/021585ar.

Belaqziz R., 2006. Etude de la flore et de la végétation du Site d'Intérêt Biologique et Ecologique (S. i. B.E) du Marais de la Palmeraie - Tensift – Marrakech. Univ., Cadi Ayyad Maroc, 40p.

Braun-Blanquet J., 1928. Vocabulaire de sociologie végétale, 3e édition, 24 p.

Bognounou F., 2009. Restauration écologique et gradient latitudinal. GRIN Verlag, 152 p.

Bouxin G., 2016. Les techniques d'analyse factorielle des données de végétation. Analyse statistique des données de végétation, p40.

Buckland S.T., Anderson D.R., Burnham, K.P. et Laake J.L., 1993. Distance Sampling, Estimating Abundance of Biological Populations. London: Chapman and Hall.

Cámara Artigas R., 2009. Concepts, approche bioclimatique et typologie des savanes. Application aux savanes américaines. Aspects environnementaux en Amérique latine, *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 246:175-218.

Carles J., 1948. Le spectre biologique réel. Bulletin de la Société Botanique de France, 95:7-9, 340-343, DOI: 10.1080/00378941.1948.10834734.

Chermat S., 2013. Etude phytosociologique et pastorale des djebels Youssef et Zdimm (Hautes plaines Sétifiènnes). Thèse Doc., Univ. D'Algérie, 263p.

Colasse V., Delassus L., Glémarec E., Guitton H., Laurent E., Magnanon S. et Thomassin G., 2014. Classification physionomique et phytosociologique des végétations. Conservatoire botanique national de Brest, 260p.

Colin J. P., 1970. Nouveau dictionnaire des difficultés du Français. Hachette. Tchou. 875 p.

Cristofoli S. et Mahy G., 2010. Restauration écologique : contexte, contraintes et indicateurs. Presses Agronomiques de Gembloux, 14 (1): 203-211.

Crosaz Y., 1994. Le matériel végétal: un outil pour la protection des sols. Onzièmes journées du Réseau Erosion Centre ORSTOM de Bondy, 449-460.

Daget ph., Poissonet j. et Huguenin J., 2010. Prairies et pâturages : méthode d'études et Interprétations. Ed. Emvt, Cnrs et Cirad, France, 955 p.

Dajoz R., 1985. *Précis d'écologie*. Ed. Dunod, Paris, 505 p.

Dajoz R. 2006. Précis d'écologie, 8e édition. Dunod, Paris. 631p.

Delassus L. et Zambettakis C., 2012. Proposition de méthode de caractérisation des systèmes de fosses des marais du cotentin et du bessin (manche, calvados). Revue du Conservatoire botanique national de Brest, 25: 159-166.

Dervin C., 1990. Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle des correspondances ? Service des études statistiques, I.T.C.F., Paris, 75 p.

Dufaure O., 2015. Influence des pratiques agricoles sur la production fourragère de montagne. AGROCAMPUS OUEST – Stage de recherche, M1Horticulture, 15p.

Durand C., 2009. Pourquoi un échantillon ? Les types d'échantillon. Université de Montréal, Méthodes de sondage – SOL3017 et SOL 6448.

Falissard B., 1998. Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vie. Collection Evaluation et Statistique. Masson (ed.), Paris, 332 p.

Fellegi I.P., 2003. Méthodes et pratiques d'enquête. STATISTIQUE CANADA, Ottawa, No 12-587-X au catalogue, ISBN 978-1-100-95206-2, 422p.

Fiers V. et coll., 2003. Etudes scientifiques en espaces naturels. Cadre méthodologique pour le recueil et le traitement de données naturalistes. Cahiers techniques de l'ATEN n°72. Réserves Naturelles de France. Montpellier : 96 p.

Fenni M., 2003. Etude des mauvaises herbes des céréales d'hiver des hautes plaines constantinoises. Ecologie, dynamique, phénologie et biologie des bromes. Thèse doc. Univ. de Sétif, Algérie, 165 p.

Flahault C. et Schrôter C., 1910. Nomenclature phytogéographique. Rapport et proposition et propositions. Bruxelles.

Fleury P., 1994. Le diagnostic agronomique des végétations prairiale et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles. Typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions. Méthode et applications dans les alpes du nord. Thèse Doc., Univ. Lorraine, 300p.

Gaudin S., 1997. Quelques éléments d'écologie utiles au forestier. BTSA Gestion Forestière, CFPPA/CFAA, 88p.

Gehu J.-M. 1979. Pour une approche nouvelle des paysages végétaux: la symphytosociologie, Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques, 126:2, 213-223, DOI: 10.1080/01811797.1979.10824391.

Gerard M., 2012. Analyse écologique de la répartition de la végétation à partir d'une base de données phytosociologiques : exemple de la végétation méditerranéenne. Sciences agricoles, dumas- 00773444, 43p.

Geslin J., Magnanon S. et Lacroix P., 2011. La question de l'indigénat des plantes de Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire Définitions et critères à prendre en compte pour l'attribution d'un « statut d'indigénat ». Conservatoire Botanique National de Brest, 19p.

Gillet F., de Foucault B., Julve P., 1991. La phytosociologie synusiale integree : objets et concepts, Candollea, 46 (2) : 315-340.

Gillet F., 2000. Guide d'utilisation de Phytobase 8, base de données phytosociologiques. Hal-00558605, 39 p.

Glèlè Kakaï R., Salako V. K. et Lykke A. M., 2016. Techniques d'échantillonnage en étude de végétation. Annales des Sciences Agronomiques 20 - spécial Projet Undesert-UE: 1-13 (2016) ISSN 1659-5009.

Godron M., 1966. Application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et la structure de la végétation Oecol. Plant., 1, (2):187-191.

Godron M., 1970. Application de la théorie de l'information a l'étude de l'homogénéité et de la structure de la vegetation. Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques du C.N.R.S. Montpellier, Ed., R. Tüxen, Gesellschaftsmorphologie.

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

Guesdon G., 2011. Évaluation des impacts environnementaux (EIE). Faculté des sciences et de génie Univ. Laval. https://www.gci.ulaval.ca/fileadmin/gci/documents/rgalvez.

Gumuchian H. et Marois C., 2000. Initiation à la recherche en géographie Aménagement, développement territorial, environnement. Thématique Sciences sociales, Univ. de Montréal, 425 p.

Hirche A., 2015. Guide technique écologie pour la collecte, l'analyse des données et le calcul des indicateurs écologiques suivant l'approche harmonisée ROSELT/DNSE/OSS/; OSS, Tunis, ISBN : 978-9973-856-9-3, 159p.

Huetz De Lemps A., 1970. La végétation de la terre. Revue Géographique de l'Est, 11-2: 242.

Jouret, B., 1972. La méthode du transect appliquée à l'analyse urbaine. Un exemple bruxellois. In: Revue de géographie de Lyon. 47(1): 77-96.

Kazi Tani Ch., Le Bourgeois T. et Munoz F., 2010. Aspects floristiques des adventices du domaine phytogéographique oranais (Nord-Ouest algérien) et persistance d'espèces rares et endémiques. Fl. Medit. 20: 29-46, ISSN 1120-4052.

Le Floc'h É. et Aronson J., 1995. Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. CNRS/Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive, Montpellier. NATURES - SCIENCES - SOCIÉTÉS, HORS-SÉRIE, 29-35.

Le Floc'h E., 2008. Guide méthodologique pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation, collection Roselt/OSS, CT N°1, Tunis, ISBN : 978-9973-856-35-7, 175 p.

Marouf A., 2000. Dictionnaire de botanique, les phanérogames. Dunod. Paris

McDonald T., Gann GD., Jonson J. et Dixon KW., 2016. Standards internationaux pour la restauration écologique - incluant les principes et les concepts clés. Society for Ecological Restoration, Washington, D.C. 49 p.

Ndjekouneyom S., 2007. Les impacts du maraichage sur la végétation ligneuse dans la région des Niayes centrales (Mboro- Diogo) au Sénégal. Univ. Cheikh Anta Diop de Daka.

Nerini D., 1994. Élaboration d'un protocole d'analyses de données pour une typologie des peuplements demersaux du plateau continental guyanais. Univ. d'AIX MARSEILLE, Ed., Ifremer, 59p.

Niang Diop F., 2010. Le suivi de la flore et de la végétation aquatiques. Projet de démonstration Bassin du fleuve Gambie, Wetlands International Afrique, 62p.

Ozenda P. 1975. Sur les étages de végétation dans les montagnes du bassin méditerranéen. - Doc. Cartogr. Ecol., 16: 1-32.

Painting K. A., Perry M. C., Denning R. A. et Ayad W. G., 1993. Guide de documentation des ressources génétiques : méthode d'autoformation pour la compréhension, l'analyse et l'utilisation de la documentation des ressources génétiques. URL: http://pdf.dec.org/pdf_docs/Pnach898.

Paradis G., Hugot L. et Spinosi P., 2008. Les plantes envahissantes : une menace pour la biodiversité. Nature, 18-26 pp.
Parc national Albert. Les formes d'adaptation des végétaux. pp.398-467.

Rameau J.-C., Mansion D. et Dumé G., 1993. Flore forestière française : guide écologique illustré. Tome 1, 2405p.

Rhanem M., 2008. Quelques aspects topoclimatiques de l'étagement de la végétation spontanée en montagne méditerranéenne, avec référence aux montagnes du Moyen et Haut Atlas (Maroc). *Quad. Bot. Amb. AppL,* 19:183-201.

Roselt/OSS DS4, 2004. Indicateurs écologiques ROSELT/OSS. ***Une première approche méthodologique pour la surveillance de la biodiversité et des changements environnementaux,*** collection ROSELT/OSS, document scientifique N° 04, Montpellier, 82 p.

Schwal B., 2004. Dynamique de la biodiversité végétale dans les paysages d'agriculture intensive. Utilisation du sol, composition floristique, végétation et structures paysagères du Lauragais haut-garonnais (Sud-ouest, France), XIXe-XXe Siècles. Thèse doc., Univ., Toulouse, France, 370p.

Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Sottiaux B., 2008. Découverte du milieu naturel, Ecologie générale et appliquée Cours industriels et commerciaux Couillet, 31p.

Tarrieu F., 1994. L'électrophorèse des iso-enzymes, outil de détection d'espèces jumelles chez les phlébotomes Montpellier ORSTOM, 40p.

Tosca C., Labroue L. et Carles J., 1978. Homogénéité floristique, hétérogénéité structurale et dynamique stationnelle dans des groupements végétaux du Pic du Midi de Bigorre, Bulletin de la Société Botanique de France, 125:1-2, 89-100.

Vaillant J., 2005. Initiation à la théorie de l'échantillonnage. http://monnano.weebly.com/uploads/1/6/6/3/1663287/theoechtage.pdf

Van Damme L., Burkhardt R., Plante L. et Saunders K., 2014. Le point sur l'aménagement forestier écosystémique (AFE) : Obstacles et possibilités en matière d'AFE au Canada. Préparé pour l'Entente sur la forêt boréale canadienne. KBM Resources Group, Thunder Bay (Ontario). 107 p.

Wouokoue Taffo Junior B., Nguetsop V.F. et Fonkou Th., 2018. Analyse des spectres écologiques de la flore des savanes des hautes terres de l'ouest Cameroun. Researchgate.

https://essayiste.org/methodologie-dechantillonnage-en-ecologie/