CT n°14

RÉSEAU D'OBSERVATOIRES DE SURVEILLANCE ÉCOLOGIQUE À LONG TERME

ROSELT/OSS

Fiches techniques pour la construction de quelques indicateurs écologiques ROSELT/OSS

Collection ROSELT/OSS - Contribution Technique n°14

OSS

FICHES TECHNIQUES POUR LA CONSTRUCTION DANS ROSELT/OSS DE QUELQUES INDICATEURS ECOLOGIQUES ET DE LA BIODIVERSITE VEGETALE

Collection ROSELT/OSS – Contribution Technique n°14, 2004.

ROSELT/OSS CT14, 2004. Fiches techniques pour la construction dans ROSELT/OSS de quelques indicateurs écologiques et de la biodiversité végétale. Collection scientifique et technique ROSELT/OSS, Contribution Technique n°14, Montpellier : xx p.

Issu du document :

ROSELT/OSS, 2002. Fiches techniques pour la construction des indicateurs ROSELT/OSS. Contributions : Sandrine Jauffret, Maud Loireau et Jean Marc d'Herbès, en collaboration avec Olivia Delanöe et Gilbert Long.

Photographie de la couverture : Sandrine Jauffret ©, OSS

SOMMAIRE

Introduction **4**

Fiche technique n°1 : Evolution de la composition floristique d'un observatoire **6**

Fiche technique n°2: Richesse spécifique de la flore sur stations permanentes **10**

Fiche technique n°3 : Recouvrement de la végétation et phytovolume sur stations permanentes **13**

Fiche technique n°4 : Biomasse sur stations permanentes **21**

Fiche technique n°5 : Etats de surface du sol sur des stations permanentes **26**

Fiche technique n°6 : Hauteur des végétaux pérennes sur stations permanentes **30**

Fiche technique n°7 : Densité des espèces pérennes sur stations permanentes **32**

Fiche technique n°8 : Diversité alpha sur stations permanentes **35**

Fiche technique n°9 : Diversité béta entre différentes stations permanentes le long d'un gradient environnemental **39**

Fiche technique n°10 : Spectres biologiques de Raunkiaer sur stations permanentes **41**

Fiche technique n°11 : Proportions d'espèces palatables *vs*. non palatables sur stations permanentes **44**

Fiche technique n°12 : Proportions des espèces en C3 *vs.* espèces en C4 sur stations permanentes **49**

Fiche technique n°13 : Spectres biogéographiques de la flore des stations permanentes **52**

Fiche technique n°14 : Etude des types stratégiques des espèces végétales sur des stations permanentes **55**

Conclusion **58**

Bibliographie *59*

ANNEXE 1 : Traitements statistiques usuels en écologie *62*

INTRODUCTION

Le réseau ROSELT/OSS fournit un cadre général structuré pour une meilleure compréhension des relations entre la biodiversité végétale et la dégradation des terres, notamment à travers son mandat d'harmonisation des approches et des méthodologies à une échelle régionale. Il permet ainsi d'envisager des comparaisons à différentes échelles entre observatoires et entre régions écologiques (cf. ROSELT/OSS DS1 & DS4, 2004).

L'approche scientifique de ROSELT/OSS comporte deux modes principaux :

- **Le mode synchronique**, par la comparaison des états de l'environnement, à un moment donné, à l'intérieur des territoires d'observatoires et entre ceux-ci, afin de mettre en évidence (1) les mécanismes propres à chaque observatoire, en relation avec leurs spécificités, mais aussi (2) les mécanismes qui leur sont communs, au-delà des différences de fonctionnement ;

- **Le mode diachronique**, par la comparaison à long terme des tendances évolutives d'un observatoire au cours de son histoire, d'une part; et d'autre part entre les observatoires.

Par ailleurs, des projets de recherche thématiques à court et moyen termes sont associés au réseau, dont ils visent à compléter et approfondir les connaissances concernant les mécanismes mis en jeu dans les processus de désertification. Ces projets concernent par exemple l'étude fine des mécanismes de désertification et des problématiques associées, telles que la biodiversité végétale et animale ou les relations population humaine – environnement.

Ces études doivent aider à la définition progressive des paramètres pertinents à mesurer, en particulier d'un « **kit minimum de données** » à collecter, et des méthodologies correspondantes. L'interprétation (statistique, modélisation…) des séries de données synchroniques et diachroniques doit servir à la validation des indicateurs de désertification ou de restauration pour en extraire les tendances évolutives.

Deux activités concomitantes et complémentaires doivent être mises en œuvre :

1. **la valorisation des acquis afin d'établir un référentiel par rapport au temps présent t_0**. Cette phase de valorisation est essentielle : correctement réalisée, elle permet de gagner beaucoup de temps pour identifier et tester les indicateurs potentiels, issus de l'analyse des données anciennes confrontées aux données actuelles, collectées dans des conditions compatibles.

2. **la mise en place d'un dispositif de surveillance à long terme** pour étudier l'évolution et la dynamique des paysages et des systèmes écologiques dans le futur. Ceci requiert d'effectuer un échantillonnage adéquat et d'adopter des méthodes d'observation et de mesure harmonisées au sein du réseau (cf. ROSELT/OSS CT 1, 2 ,8 11 et 13 : guides méthodologiques).

La démarche méthodologique présentée ici vise à identifier et à valider les indicateurs de la biodiversité végétale et des changements écologiques à long terme. Elle complète et illustre la démarche conceptuelle exposée dans le document ROSELT/OSS DS4 (2004).

Le présent document est structuré en **fiches techniques** qui rendent compte du processus de collecte des données, du traitement statistique permettant leur validation, et de l'intérêt relatif de la méthode, tout en précisant leurs perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre du réseau ROSELT/OSS.

Ces fiches ont été élaborées dans le cadre de travaux portant sur les steppes méditerranéennes arides en Tunisie (cf. ROSELT/OSS CT4, 2004) : elles ne peuvent pas encore prétendre à l'exhaustivité et devront être testées et amendées par le réseau au fur et à mesure de leur mise en œuvre.

Les données à collecter faisant partie du **« kit minimum de données »** (cf. ROSELT/OSS DS3 et DS4, 2005) et du « kit minimum d'indicateurs » à mesurer, ou à calculer, correspondent aux fiches 1 à 5. **Ces données sont donc prioritaires**.

Les autres fiches proposent de collecter des données dont la pertinence est avérée pour ROSELT/OSS d'avoir une connaissance approfondie de la composition, de la structure et du fonctionnement des systèmes écologiques, de mieux comprendre les changements que ces systèmes subissent au cours des processus de dégradation des terres voire de désertification ainsi que l'impact de la dégradation des terres sur la biodiversité végétale (cf. indices de diversité fiches n°8 et 9).

FICHE TECHNIQUE N°1 : EVOLUTION DE LA COMPOSITION FLORISTIQUE D'UN OBSERVATOIRE

- **Définition**

La composition floristique est l'ensemble des espèces végétales (phanérogames) présentes, à un moment donné, en un site donné. Dans le cadre de ROSELT/OSS, la composition floristique peut être évaluée en établissant la liste des espèces présentes sur la totalité du territoire d'observatoire.

- **Objectifs**

Il s'agit de comparer les **listes floristiques exhaustives** établies dans l'espace étudié (un observatoire), à différentes dates, de manière à rendre compte de ***l'évolution de la composition floristique*** au cours du temps. Les modifications de la flore, et de la végétation, entraînant éventuellement un changement de la physionomie des formations végétales et de leur diversité, l'étude de la composition floristique permet donc de dégager une ***typologie des formations végétales*** caractérisant l'observatoire et parfois d'actualiser les typologies existantes.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il faut rechercher l'ensemble des listes d'espèces établies par le passé sur l'observatoire pour avoir une situation de référence (information à intégrer aux bases de données de l'observatoire).

Données à récolter et méthode de mesure :

Il est nécessaire d'établir la liste exhaustive des espèces végétales caractérisant l'observatoire actuellement. Pour cela il est nécessaire d'inventorier l'ensemble des espèces caractérisant chaque formation végétale, en particulier au moment du pic de végétation. Deux types de données peuvent être récoltés : les relevés permanents sur station et les inventaires globaux sur l'ensemble de l'observatoire (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004). Ces derniers permettent notamment de tenir compte les milieux particuliers (« refuges » : talus, corniches, haies, etc.), qui doivent faire l'objet d'enquêtes spécifiques, notamment pour assurer au mieux le repérage d'individus d'éventuelles espèces rares. Les taxons doivent être désignés par leur nom de genre, d'espèce (et autre niveau infra-spécifique) et être obligatoirement accompagnés du nom d'auteur, et si possible des synonymes éventuels. Les meilleurs travaux connus de floristique (flore ou liste taxonomique utilisée) doivent être retenus (et mentionnés) comme constituant les références.

Traitement des données :

Trois grands types de traitement peuvent être entrepris :

- la comparaison diachronique des listes floristiques anciennes et actuelles établies sur l'observatoire au travers de différentes caractéristiques : la richesse spécifique (le nombre d'espèces recensées ; cf. fiche n°2), le degré d'homogénéisation (?????) (nombre important d'espèces à large amplitude écologique), le statut vis-à-vis de la biodiversité végétale nationale et internationale (nombre d'espèces des listes rouges), la banalisation (faible nombre d'espèces rares, remarquables), la qualité (nombre et fréquence des espèces à bonne valeur d'usage).

- l'analyse de la composition floristique établie sur les stations permanentes ou sur l'ensemble de l'observatoire grâce à une Analyse Factorielle des Correspondances. Cette analyse permet d'établir une typologie des formations végétales et d'observer l'évolution de la composition floristique et les changements éventuels par rapport aux typologies existantes.

- **Intérêt et limites**

Cette méthode permet d'étudier en partie la biodiversité végétale (composition taxonomique et structure ; cf. ROSELT/OSS DS4, 2005) et son évolution dans le temps (perte d'espèces, disparition d'espèces rares ou menacées, homogénéisation et banalisation de la flore). En outre, l'établissement des listes floristiques est fondamental puisqu'il sert généralement de base pour l'étude des spectres biologiques, des classifications par types biogéographiques, par types de Noy-Meir (cf. fiches techniques correspondantes), ces diverses expressions des résultats constituant autant de méthodes d'évaluation de l'état de dégradation relative des systèmes écologiques.
Cependant, les limites de ces études résident dans le fait que seul un botaniste expérimenté peut établir la liste exhaustive des espèces en un observatoire donné.

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Quadriennal pour l'inventaire global Annuel sur les stations permanentes Suite à des évènements climatiques exceptionnels
Faisabilité	Recours à un botaniste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Très grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Obligatoire, prioritaire**
Fait partie du « kit minimum de données » à collecter et du « kit minimum d'indicateurs » à calculer	

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Les comparaisons synchroniques et diachroniques des listes floristiques doivent être effectuées dans chaque observatoire, sur les inventaires globaux ou sur les relevés stationnels.

Une comparaison synchronique / diachronique des listes floristiques doit être entreprise entre des observatoires comparables (par sous-région et zones écogéographiques ; par ex. les steppes d'Afrique du Nord) afin de pouvoir dégager leurs évolutions floristiques respectives, en relation avec les forces directrices principales : changements climatiques et pression anthropique.

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

Tableau 1. Etude diachronique : Comparaison à deux dates de la composition floristique de deux stations permanentes de surveillance (Source : Jauffret 2001).

	Station 1		Station 2	
Espèces	**1975**	**1999**	**1975**	**1999**
Chaméphytes				
Anabasis oropodiorum *Maire*			1	
Argyrolobium uniflorum *(Decne.) Jaub. & Spach*	1			
Astragalus armatus *Willd. subsp.* armatus	1			1
Atractylis serratuloides *Sieber ex Cass.*	1	1	1	1
Farsetia aegyptiaca *Turra*				
Gymnocarpos decander *Forssk*.	1		1	1
Haloxylon scoparium *Pomel*			1	
Helianthemum kahiricum *Delile*	1	1	1	
Helianthemum lippii *(L.) Dum. Cours.*	1		1	
Helianthemum sessiliflorum *(Desf.) Pers.*				1
Kickxia aegyptiaca *(L.) Nábelek*	1			
Salvia aegyptiaca *L.*	1	1		1
Teucrium polium *L. subsp.* polium	1			
Thymelaea hirsuta *(L.) Endl.*	1		1	
Géophytes				
Asphodelus tenuifolius *Cav*.	1			
Hémicryptophytes				
Echium humile Desf. subsp. pycnanthum (Pomel) Greuter & Burdet	1	1	1	1
Erodium glaucophyllum *(L.) L'Hér.*	1	1	1	1
Herniaria fontanesii *J. Gay subsp*. fontanesii	1	1	1	
Launaea mucronata *(Forssk.) Muschl.*				1
Lotus creticus *L.*				1
Plantago albicans *L.*	1			
Thérophytes				
Astragalus corrugatus *Bertol.*		1		1
Cutandia dichotoma *(Forssk.) Trab.*				1
Fagonia glutinosa *Delile*		1		
Filago pyramidala *L.*		1		1
Hippocrepis areolata *Desv.*				1
Rostraria salzmannii (Boiss. & Reut.) Holub				1
Koelpinia linearis *Pall.*				1
Malva aegyptiaca *L.*		1		
Matricaria auraea *(Loefl.) Sch. Bip.*		1		
Medicago laciniata *(L.) Mill.*				1
Schismus barbatus *(L.) P. Beauv.*	1			1
Stipa capensis *Thunb.*				1
Thesium humile *Vahl*				1

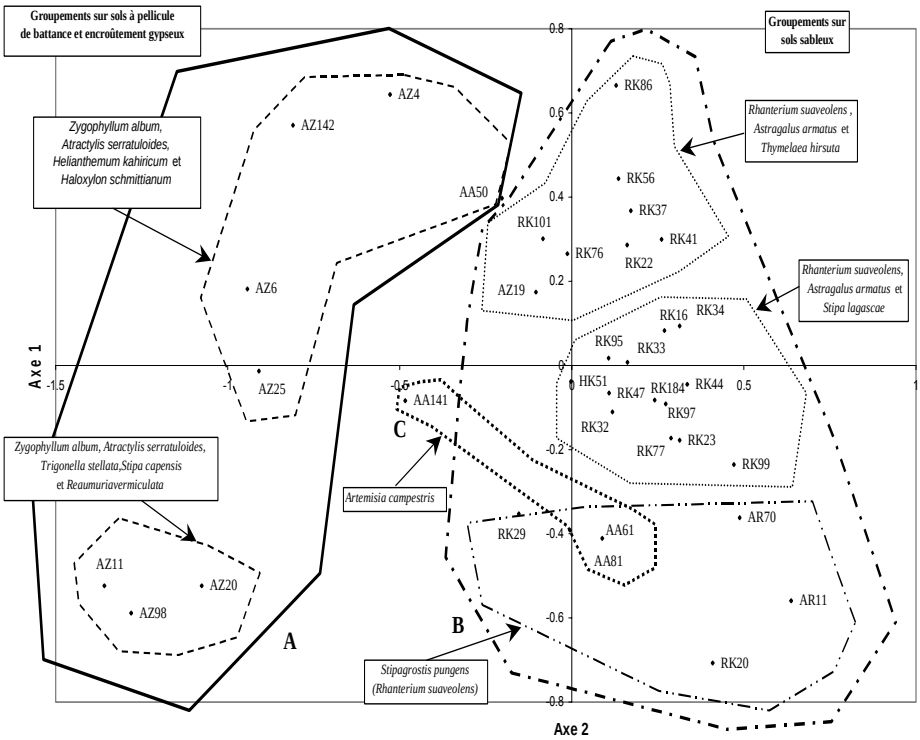


Figure 1 : Etude synchronique : Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) portant sur les données présence absence des espèces caractérisant un lot de stations permanentes en vue d'élaborer une typologie des stations au temps t. Projections des relevés dans le plan factoriel (1/2)
de l'AFC.

FICHE TECHNIQUE N°2: RICHESSE SPECIFIQUE DE LA FLORE SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La richesse spécifique de la flore correspond au nombre d'espèces (phanérogames) présentes sur un site donné. C'est la mesure de la richesse taxonomique (diversité) d'une communauté la plus couramment employée.

- **Objectifs**

Il s'agit de suivre l'évolution du nombre d'espèces, en particulier des espèces pérennes. En effet le recours privilégié aux espèces pérennes, considérées comme susceptibles de contribuer au mieux à la stabilité des écosystèmes des zones arides et semi-arides, se révèle être pertinent pour juger de la perte ou du gain de diversité. La prise en compte du nombre d'espèces annuelles, parfois caractéristiques de certains stades de la succession, permet de compléter le diagnostic concernant la diversité globale des systèmes écologiques.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :
Il s'agit de rechercher les listes d'espèces établies par le passé sur des stations, si possible géoréférencées, qui pourraient servir de listes de référence dans l'observatoire.

Données à récolter :
Il faut établir la liste complète des espèces caractérisant chaque station permanente (5 stations permanentes au minimum par type de formation végétale, de préférence le long de gradients environnementaux par exemple). Ces données doivent être récoltées à différentes saisons et durant plusieurs années, une attention particulière doit être portée à la saison correspondant au pic de végétation.

Méthode de mesure : méthode de l'aire minimale
Cette approche consiste à dresser la liste exhaustive des espèces végétales présentes sur le site échantillonné, par étapes successives en partant d'une petite surface (de l'ordre du m^2). La surface explorée est ensuite accrue géométriquement (1, 2, 4, 8, 16, 32,…m^2) et ce jusqu'à obtenir une réduction progressive du nombre d'espèces nouvelles. L'aire minimale retenue sera la surface à partir de laquelle il n'y a plus, ou presque plus, de recensement d'espèces nouvelles. Il est en outre recommandé d'explorer soigneusement, à chaque relevé, l'ensemble du site échantillonné.
L'aire minimale, déterminée lors du premier inventaire exhaustif, est considérée comme caractérisant la formation végétale et est retenue pour toutes les mesures suivantes sur le même site (Grouzis, 1982 ; ROSELT/OSS CT1, 2004).

Traitement des données
Le traitement des données se déroule comme suit :
- la richesse spécifique totale (nombre total d'espèces) est calculée pour chaque station, ainsi que la richesse en espèces pérennes et annuelles;
- l'analyse de variance est utilisée pour comparer les moyennes de la richesse en espèces pérennes d'une part et en espèces annuelles d'autre part,
    - sur une station permanente au cours du temps ;
    - entre différentes stations permanentes le long de gradients environnementaux.

Si les différences statistiques sont significatives, chaque descripteur est validé en tant qu'indicateur potentiel.

- **Intérêt et limites**
  L'intérêt d'une telle étude est de permettre la surveillance de l'évolution de la richesse spécifique, en distinguant les pérennes (garantes de la stabilité des écosystèmes) des annuelles (éventuel phénomène de thérophytisation, réputé être positivement corrélé avec la dégradation des terres). La perte de diversité dans les deux catégories de végétaux (pérennes et annuels) peut servir d'indicateurs d'alerte.
  Cependant, l'expertise scientifique d'un botaniste compétent est requise. En outre, ce descripteur de la composition est semi-quantitatif et ne permet pas d'avoir une idée précise de la structure de la phytocénose. Il doit donc être complété par un ou plusieurs descripteurs quantitatifs (ex : fréquences spécifiques, recouvrement de la végétation, etc., cf. fiches techniques associées).

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel
Faisabilité	Bonnes connaissances botaniques
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Très Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Obligatoire, prioritaire**
Fait partie du « kit minimum de données » à collecter et du « kit minimum d'indicateurs » à calculer	

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

  Plusieurs applications de la méthode peuvent être entreprises :

1. **Comparaison synchronique :**
   - en espèces annuelles) le long de gradients environnementaux (gradient d'utilisation, de pression sur le milieu, gradient climatique ou édaphique) sur un observatoire.

     Ex : une analyse de variance est effectuée pour comparer la richesse spécifique moyenne d'une formation végétale en bon état et celles de ses faciès dans un gradient de dégradation. Une même opération peut-être effectuée avec la richesse en espèces pérennes et/ou annuelles.
2. **Comparaison diachronique :**
   - Analyse de variance entre la richesse spécifique totale, en espèces pérennes et en espèces annuelles d'une station permanente à différentes saisons et années (t_0, t_1, t_2 … t_n) sur un observatoire.
3. **Comparaison synchronique / diachronique :**
   - Analyse de variance entre la richesse spécifique totale, en espèces pérennes et en espèces annuelles de plusieurs observatoires comparables entre eux et au cours du temps (identification des tendances).

Exemples d'application de la méthode

Tableau 1. Etude diachronique : Evolution de la richesse spécifique totale au cours du temps sur des stations de surveillance permanentes (Source : Jauffret 2001).

Espèces	Station 1 1975	Station 1 1999	Station 2 1975	Station 2 1999
Nombre total d'espèces	16	11	10	19
Nombre de Chaméphytes	10	3	7	5
Nombre d'Hémicryptophytes	4	2	3	4
Nombre de Géophytes	1	0	0	0
Nombre de Thérophytes	1	5	0	10

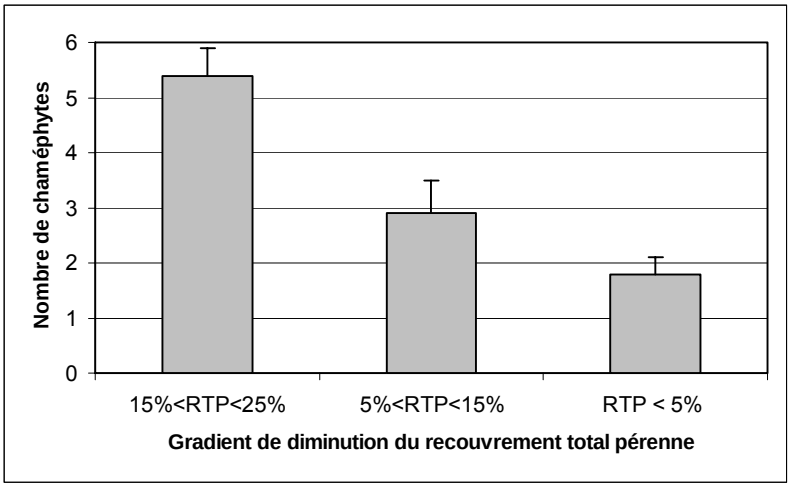


Figure 1 : Etude synchronique : évolution / variation de la richesse spécifique en chaméphytes au printemps le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne (RTP). χ^2 = 18.39, p < 0.001***

NB : cet exemple n'a pas de relation avec l'exemple donné dans le Tableau 1 ci-dessus.

FICHE TECHNIQUE N°3 : RECOUVREMENT DE LA VEGETATION ET PHYTOVOLUME SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

  Le recouvrement de la végétation correspond au recouvrement de l'ensemble des espèces végétales présentes en un site donné.
  Le phytovolume est ici considéré dans le sens de l'encombrement aérien, c'est-à-dire qu'il désigne la portion du volume d'espace occupée par l'espèce ou les espèces végétales présentes.

  NB : cette fiche ne traite que des données de recouvrement mesurées lors de relevés stationnels (stations permanentes ou campagne d'inventaires phyto-écologiques), à l'exclusion des évaluations cartographiques au sol ou à partir de l'imagerie aérienne ou satellitaire. Les méthodes de mesure préconisées, adaptées aux steppes méditerranéennes à végétation ligneuse basse (inférieure à 1-2 m de hauteur) ou à herbacées, nécessitent parfois d'être complétées pour être généralisées en particulier aux formations comportant des arbres.-.

- **Objectifs**

  Le recouvrement de la végétation est un descripteur essentiel pour l'évaluation de l'état relatif d'un écosystème et pour l'estimation de la disponibilité en ressources végétales. Il participe à la fixation et au maintien du sol (et du carbone), favorise l'installation des espèces et un meilleur bilan hydrique, limite l'érosion et constitue, pour les régions concernées, une part importante de la ration alimentaire des herbivores domestiques.
  L'évaluation du recouvrement de la végatation étant, dans certaines limites, possible à partir des données satellitaires (indices de végétation), ce paramètre permet donc les changements d'échelle ainsi que le suivi spatio-temporel des ressources végétales.

  L'évaluation du phytovolume apporte une information supplémentaire à celle fournie par le recouvrement puisqu'il illustre 'l'encombrement' de la végétation, qui peut notamment être relié à des analyses de la rugosité de l'imagerie satellitaire. Il permet aussi, sous certaines conditions (mesures au sol pour le calibrage notamment) d'estimer la phytomasse sur pied.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il faut rechercher les éventuelles données, anciennes, disponibles sur le recouvrement de la végétation sur des stations géoréférencées qui pourront servir de référence.

Données à récolter :

Il s'agit de mesurer la fréquence de chaque espèce présente dans la station permanente. Ces données peuvent être récoltées à différentes saisons et en particulier au moment du pic de végétation. ***Unité*** : pourcentage.

Méthode de mesure préconisée (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004) l'analyse linéaire de points-quadrats.

L'objectif poursuivi est d'adopter une méthode de mesure quantitative du couvert de la végétation et de l'état de la surface du sol, qui soit fiable, précise, aisément reproductible, non destructive et qui permette d'aider à la fois au diagnostic de l'état d'un système écologique et à la comparaison de l'état, soit d'un même système écologique à des dates différentes, soit de plusieurs systèmes écologiques différents.

La méthode retenue est la ***méthode d'analyse linéaire de « points-quadrats »*** (*cf.* Daget & Poissonet, 1971) : L'opération est menée par deux personnes le lecteur et le transcripteur. Le lecteur descend une fine aiguille verticalement dans la végétation et le transcripteur note, sur un formulaire édité à cet effet, les contacts de cette aiguille avec des parties de végétation puis avec les éléments de surface du sol. La hauteur des végétaux pérennes est aussi notée. L'opération est répétée, le long d'un ruban gradué tendu dans (ou sur) la végétation, à intervalles réguliers. L'intervalle est adapté au grain de répartition de la végétation.
Il convient, en fonction du couvert végétal présent, de déterminer le nombre de mesures ou observations qu'il est nécessaire d'effectuer, pour obtenir des données statistiquement valables. Il est considéré, pour un site échantillonné, qu'un nombre **minimum de 100 points de contact avec la végétation** est nécessaire pour que la fréquence puisse être mathématiquement assimilée à un recouvrement. Augmenter le nombre de points revient à augmenter la précision des mesures. En zone aride méditerranéenne, la végétation présentant un patron diffus et épars : un minimum de 5 lignes de 20 m est préconisé et une lecture tous les 10 cm (au total 1000 points de lecture).

Parmi les autres méthodes de mesures du recouvrement de la végétation existantes, signalons que la méthode de l'interception sur lignes peut être également utilisée (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004). Cette méthode consiste à noter la longueur des segments occupés par de la végétation. Cette méthode, relativement plus rapide que la méthode des points-quadrats, est également moins précise, notamment pour quantifier les recouvrements des taxons considérés isolément.

La méthode d'analyse linéaire de points-quadrats permet d'obtenir trois types d'information

- ***La présence*** : est l'observation d'un élément (par exemple une espèce ou un état de la surface du sol) en un point. Dès qu'une espèce est touchée (un ou plusieurs contacts) en un point de lecture, par l'aiguille descendue dans la végétation, elle est considérée comme présente.

Le contact : est l'intersection d'un élément (par exemple une espèce) avec l'aiguille descendue dans la végétation. On peut compter éventuellement plusieurs contacts entre un élément donné et l'aiguille en un même point de lecture. Le relevé du nombre total de contacts de chaque espèce sur l'ensemble de la ligne de lecture permet d'accéder à une évaluation du phytovolume en prenant également en compte la hauteur (précisément : l'encombrement spatial).
La hauteur : la hauteur (h) pour chaque taxon pérenne (ligneux haut et bas ; graminée pérenne) intercepté, ou la hauteur maximale de la strate (ligneuse haute et basse, ou herbacée) est mesurée, à tous les points successifs de lecture le long de la ligne de points quadrats, afin d'estimer leur hauteur moyenne entrant dans le calcul de leur phytovolume.

Traitement des données

Les résultats des observations et mesures précédentes (présence et contact) peuvent être exprimés de plusieurs façons en calculant :

- ***La Fréquence Spécifique*** (FS_i) d'un taxon (ou un état de surface, cf. fiche n°5) est le nombre de points où ce taxon (ou cet état de surface) à été lu. Exemple : espèce A , 40 points ; espèce B 10 points sur 200 points de lecture.

- ***La Fréquence Spécifique Centésimale*** (FSC_i) d'un taxon (ou un état de surface): est le rapport en % entre sa FS_i et le nombre total N de points de lecture le long de la ligne.

$$FSC_i\,\% = \frac{FS_i \times 100}{N}$$

Cette fréquence peut être considérée comme traduisant le couvert d'une espèce donnée, lorsque le nombre de points de lecture est suffisant. Exemple : couvert de l'espèce A, 40/200 = 25 %, espèce B, 10/200 = 5%.
La somme des fréquences spécifiques centésimales représente la somme des différentes strates de végétation et peut donc dépasser 100 %.

- ***Le Recouvrement total*** (RTV) : est le rapport en % entre le nombre de points où l'on a relevé la présence d'au moins un taxon et le nombre total de points de lecture. Il s'obtient également en retranchant, du nombre total de points de lecture, le nombre de points sans contact avec la végétation. Il est donc par définition égal ou inférieur à 100%. Le RTV est, généralement, inférieur à la somme des fréquences spécifiques (puisque l'on peut toucher plusieurs espèces au même point sur les lignes de points-quadrats).

- ***La Contribution Spécifique Présence*** (CSP_i) : est le rapport (en %) entre la fréquence spécifique centésimale (FSC_i) d'un taxon i et la somme des fréquences spécifiques centésimales de tous les taxons présents

$$CSP_i\ \% = \frac{FSC_i \times 100}{\Sigma FSC_i}$$

Dans les formations ouvertes et peu recouvrantes des zones arides les individus en relativement petit nombre peuvent être épars et il est intéressant alors, pour avoir une idée plus précise de l'état du tapis végétal, de pondérer les contributions spécifiques par le recouvrement global de la végétation (R). La valeur corrigée C'si exprime la contribution réelle de l'espèce i au tapis végétal (Aidoud 1983).

$$C'S_i\% = CS_i \times \frac{R}{100}$$

Dans le cas particulier et extrême ou chaque point de lecture le long de la ligne ne comporte qu'une seule espèce fréquence spécifique centésimale et contribution spécifique seraient équivalents (Hirche et *al.* 1999) : $C'S_i = FSC_i$

- ***La Contribution Spécifique Contact*** (CSC_i) : est le rapport en % entre le nombre total des contacts d'un taxon donné C_i et la somme des contacts de tous les taxons présent s :

$$CSC_i\ \% = \frac{C_i \times 100}{s}$$

- ***le phytovolume*** (PV) peut être calculé dans chaque station en appliquant la formule suivante :

$$PV_i = (FSC_i \times h_i) \times 100\ (m^3 / ha)$$

Où h_i = hauteur moyenne de l'espèce i sur la ligne de lecture

<u>*Remarques*</u> :
a) la hauteur des herbacées et des ligneux bas est mesurée aisément sur les lignes de points-quadrats.
b) pour les ligneux hauts, les estimations du recouvrement et de la hauteur se font par d'autres méthodes d'échantillonnage (généralement surfaciques) et de mesures comme par exemple les mesures allométriques (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004).

- Comparaison des moyennes :
    - Analyse de variance du recouvrement total de la végétation et du phytovolume total (au cours du temps, le long de gradients environnementaux);
    - Analyse de variance des recouvrements spécifiques et du phytovolume par espèce ou par type biologique (au cours du temps, le long de gradients environnementaux).

- **Intérêt et limites**

Le couvert des végétaux pérennes est généralement reconnu comme étant le principal indicateur de l'état relatif des systèmes écologiques (cf. ROSELT/OSS CT4 et CT9, 2004).
L'évaluation du couvert de la végétation est possible, sous certaines précautions concernant les couverts épars, par les traitements d'images satellitaires (indices de végétation), ce qui permet i) d'en analyser l'évolution dans l'espace et dans le temps et ii) d'extrapoler les mesures locales sur la base des cartes issues du traitement d'images.

Cependant, lors d'une campagne de mesure, les taxons inventoriés ne sont pas tous au même stade phénologique. Il est nécessaire de qualifier, avec précision, l'état phénologique (état végétatif, feuillaison, floraison, fructification, etc.) de chaque taxon (souvent indispensable à son identification). Pour cela des herbiers de référence doivent être confectionnés sur chaque observatoire. L'herbier présente alors les espèces à leurs différents stades de développement.

La mesure du recouvrement végétal ne suffit pas pour qualifier les ressources végétales' et leur disponibilité. En effet ce paramètre ne prend pas en compte l'intérêt des espèces en tant que ressources pour un usage particulier (valeur bromatologique ou pastorale, valeur énergétique, *etc*.).

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	.Annuel, au moment du pic de végétation ou saisonnier, durant les phases diagnostic. Quadriennales, ou lors d'évènements exceptionnels.
Faisabilité	Connaissances botaniques minimales requises
Rentabilité	Facile à mettre en œuvre, nécessite un temps de terrain minimal
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Très grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Obligatoire, prioritaire**
Fait partie du « kit minimum de données » à collecter et du « kit minimum d'indicateurs » à calculer	

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

La méthode peut être utilisée de diverses manières :

1. Comparaison synchronique
Analyse de variance des couverts végétaux moyens le long de gradients environnementaux (gradient d'usages, gradient climatique ou édaphique) sur un observatoire.
Ex : une analyse de variance peut-être effectuée pour comparer le recouvrement moyen des chaméphytes dans une même formation végétale et sous ses différents faciès du bon état à la dégradation extrême (gradient de dégradation).

2. Comparaison diachronique
Analyse de variance entre les couverts végétaux moyens d'une station permanentes X à différentes saisons et années (t_0, t_1, t_2 … t_n) sur un observatoire.

3. Comparaison synchronique / diachronique
Analyse de variance entre les couverts végétaux moyens de plusieurs observatoires comparables entre eux et au cours du temps (identification des tendances).

Exemples d'application de la méthode.

Tableau 1. Étude diachronique : calcul des fréquences spécifiques mesurées selon la méthode des points-quadrat sur deux stations de surveillance permanentes à différentes dates (Source : Jauffret, 2001)

	Station 1			**Station 2**		
Espèces	**1975**	**1999**	**2000**	**1975**	**1999**	**2000**
Chaméphytes						
Argyrolobium uniflorum	0,1		0,2	0,056		
Artemisia campestris	0,14		0,1	1,49	1,8	0,8
Astragalus armatus					0,2	0,1
Atractylis serratuloides	0,14		0,2		0,8	
Deverra tortuosa	0,11		2,4		10,1	11,5
Echiochilon fruticosum	0,12					
Helianthemum kahiricum	0,52	3,5	1,5			
Helianthemum lippii						
Helianthemum sessiliflorum	0,16		0,2			
Kickxia aegyptiaca	0,2			0,2	0,7	2
Marrubium desertii	0,11					
Rhanterium suaveolens	2,1	0,6	4,1			
Salsola vermiculata	0,27	4,5	0,8			
Salvia aegyptiaca					0,1	
Teucrium polium				0,19		
Géophytes		**0,1**				
Asphodelus refractus	0,01	0,3		0,09	15,2	2,8
Asphodelus tenuifolius					0,2	0,1
Cynodon dactylon					0,6	
Hémicryptophytes				**0,14**	**0,3**	**0,2**
Atractylis flava	0,24		0,1			
Diplotaxis harra				1,64	0,2	
Erodium glaucophyllum		0,1		0,06		
Herniaria fontanesii	0,01	1,1	0,4	0,06	1,4	0,1
Launaea resedifolia			0,9			
Lotus creticus	1,04		0,3	0,26		1,4
Lygeum spartum	0,24	0,1	0,8			
Stipa lagascae	0,1		0,2	0,056		

	Station 1			Station 2		
	1975	**1999**	**2000**	**1975**	**1999**	**2000**
Thérophytes						
Adonis dentata				0,03		
Ajuga iva				0,66		
Anacyclus cyrtolepidioides		3,3	2		3,8	0,3
Arnebia decumbens		0,1			0,2	
Astragalus cruciatus		2,1			2	0,1
Astragalus tenuifoliosus		0,1				
Carduus getulus		0,1			0,4	
chardon sp.					0,2	
Cutandia dichotoma		3,7	0,1		3,1	2,4
Daucus syrticus		1	0,7			
Diplotaxis simplex		0,6	0,1			
Enarthrocarpus clavatus					0,5	
Euphorbia retusa		0,1			0,2	
Evax argentea		0,9	0,4			
Fagonia glutinosa	0,52			0,53	0,4	0,2
Filago germanica		0,1	0,5		0,2	0,5
Hedysarum spinosissimum		0,7				
Hippocrepis areolata		6			0,9	0,2
Ifloga spicata		0,9				
Koelpinia linearis			0,1			
Launaea glomerata			0,1			
Matthiola longipetala		15,3	1,4			
Medicago laciniata		1			0,1	0,1
Medicago truncatula		2,5	1,6		0,4	0,7
Muricaria prostrata		5,7	0,1			
Paronychia arabica		0,3				
Plantago ovata				0,13		
Reseda decursiva		0,2				
Schismus barbatus		1		0,1	0,1	
Stipa capensis				0,06		
Thesium humile					0,1	
Trigonella stellata	0,05					

Tableau 2. Etude diachronique : calcul du recouvrement total de la végétation et par types biologiques calculés à partir des fréquences spécifiques mesurées ci-dessus (tableau 1)

	Station 1			Station 2		
Recouvrement	**1975**	**1999**	**2000**	**1975**	**1999**	**2000**
Total	6,08	56	19,1	5,69	44,2	23,5
Chaméphytes	3,97	8,6	9,5	1,93	13,7	14,4
Géophytes	0,01	0,4	0	0,09	15,4	2,9
Hémicryptophytes	1,53	1,3	2,5	2,16	2,5	1,7
Thérophytes	0,57	45,7	7,1	1,51	12,6	4,5

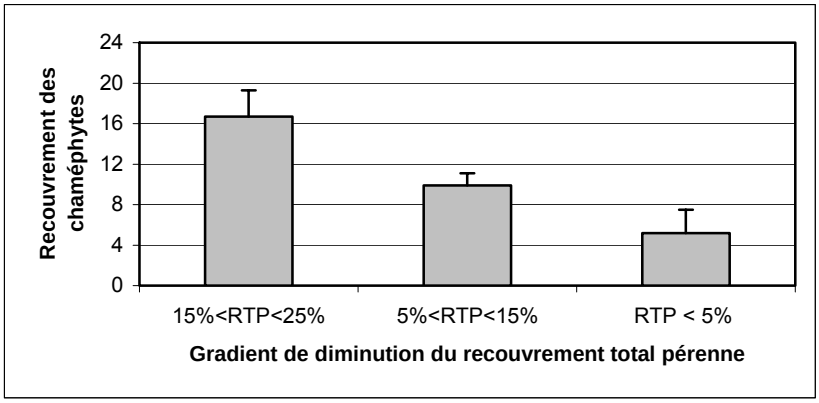


Figure 2. : Etude synchronique : évolution / variation du recouvrement des chaméphytes au printemps le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne (RTP). $\chi^2 = 18.39$, $p < 0.001$***

NB : cet exemple n'a pas de relation avec l'exemple donné dans le Tableau 1 ci-dessus.

FICHE TECHNIQUE N°4 : PHYTOMASSE AERIENNE SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La *phytomasse aérienne* (poids du matériel végétal, vivant ou non, présent au dessus de la surface du sol) qui se distingue de la phytomasse souterraine (poids des racines vivantes et mortes) comprend la phytomasse aérienne sur pied et la litière tombée au sol.
La phytomasse aérienne sur pied est de fait la quantité de végétation sur pied présente, par unité de surface, à un instant donné. Elle comprend une part plus ou moins importante de matériel mort (partie de la nécromasse). Il est également possible de distinguer la phytomasse 'verte' vivante de la phytomasse sur pied mais morte. Tout le matériel mort est également dénommé nécromasse. Il s'avère important de connaître la phénologie de la constitution de la phytomasse pour pouvoir espérer accéder à la mesure de *production primaire* qui exprime la capacité de photosynthèse, c'est à dire la quantité d'assimilas produits par les végétaux chlorophylliens sur une surface donnée à un instant donné.
La *productivité primaire nette* est la quantité de matières produites rapportée à la dimension d'un ou plusieurs facteurs de production. C'est un rapport de la production sur le temps, la pluviosité. On parle alors de vitesse de production. Les notions de production primaire et de productivité primaire ne sont pas explorées plus avant ici. Elles relèvent en effet de schéma de recherche dans des directions qui ne sont pas en conformité immédiate avec les objectifs de ROSELT/OSS. En conséquence nous ne nous intéresseront qu'à la **phytomasse aérienne sur pied.**

- **Objectifs**

L'évaluation de la phytomasse est essentielle si l'on désire évaluer la production primaire. Celle-ci est indispensable pour évaluer la quantité de ressources disponibles.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :
Il faut rechercher les éventuelles données, anciennes, disponibles sur la phytomasse de la végétation sur des stations géoréférencées qui pourront servir de référence. Les abaques, si elles existent, pourraient être utilisées pour évaluer, à partir du recouvrement, la phytomasse sur pied ce qui permettrait un gain de temps.

Données à récolter :
Il s'agit de calculer soit par une méthode destructive soit par une méthode non ou peu destructive la quantité de matière sèche présente sur des stations permanentes.
Unité : kilogrammes de matière sèche par hectare (Kg/MS/ha).

Méthode de mesure n°1: mesure fondée sur l'aire minimale – méthode destructive

Protocole pratique
L'aire minimale (cf. Fiche n°2) constitue une base convenable pour les mesures de poids pour la végétation pérenne.
La végétation pérenne est coupée au ras du sol et pesé en vert. Un échantillon est pesé précisément puis mis à l'étuve pour séchage jusqu'à poids constant. La pesée au sortir de ce séchage permet de calculer la teneur en matière sèche et transformer ainsi les données en poids vert du terrain en poids sec.
Si une espèce domine nettement dans la végétation il est souhaitable de la peser séparément. Le quotient poids vert/poids sec variant avec les saisons et l'état de la végétation mais également des épisodes climatiques, il importe à chaque coupe sur le terrain de calculer à nouveau le coefficient à appliquer pour les transformations.

Pour la végétation annuelle, les mesures sont effectuées sur des placettes de $1m^2$ avec un grand nombre de répétitions étant donné le caractère très aléatoire de la distribution des végétaux de cette strate.

Un des problèmes majeurs qui se posent est la détermination du nombre de coupes à effectuer pour atteindre une représentativité suffisante. Ce nombre (généralement de 10 à 20) dépend, bien entendu, de l'homogénéité de la distribution de la végétation. En principe, le nombre est déterminé par moyenne cumulée de manière à obtenir un intervalle de confiance de 5% .

$$p = \frac{2\,\sigma}{m\,\sqrt{n}}$$

où p = degré de précision ; σ = écart type ; m = moyenne ; n = nombre de placettes échantillonnées.

Il reste également possible d'établir une courbe aire-phytomasse. Le principe de la mesure consiste à effectuer des séries de coupes de phytomasse dans des carrés de surface croissante en puissance de 2 (4, 8, 16, $32m^2$). Les carrés étant choisis au hasard.

Traitement des données
La phytomasse est rapportée à l'hectare pour avoir des valeurs comparatives. Chaque série comportera *n* mesures sur une aire donnée d'une parcelle (si possible 30 mesures par série). Les moyennes et les coefficients de variation sont calculés.
Une courbe aire- phytomasse représentant les fluctuations du coefficient de variation, rapport de l'écart type à la moyenne, relativement aux unités de surface sera établie. L'analyse des variances nous permettra de définir la surface minimale d'échantillonnage la plus représentative qui correspondra au point d'infléchissement monotone sur la courbe. De fait cette méthode est très rarement mise en application.
Pour les arbres et gros arbustes l'on procède, selon la méthode dite de l'arbre moyen' (Ovington 1956, Whittaker & Woodwell 1971, Duvigneaud 1974) exposée au niveau de la démarche mixte qui suit.

NB : la phytomasse mesurée à un instant donné ne représente bien entendu pas la totalité de la matière verte produite au cours du cycle de végétation. Cette phytomasse, présente à un moment donné, est constituée pour une part, du moins chez les espèces vivaces, de matière produite au cours de périodes précédentes de végétation et subsistant et pour une autre part de matière produite au cours du cycle observé et non encore nécrosée.

Méthode de mesure n°2 : méthodes mixtes ou indirectes (non ou peu destructives)

Les méthodes quantitatives présentées ci-dessus sont relativement destructives et contraignantes pour un suivi à moyen et long terme. Les « Méthodes mixtes ou indirectes » seront donc privilégiées.

- **Méthode par entraînement d'observateurs**

Protocole pratique
Pour chaque type d'unité dont on souhaite déterminer la phytomasse, environ 30 placettes élémentaires (correspondant à l'aire minimale) sont tirées au hasard. Pour chaque première parcelle d'une série de trois on procède à une estimation visuelle du poids vert de chaque touffe puis à sa pesée après coupe au ras du sol. Les données obtenues (estimation puis poids mesuré) sont toutes enregistrées. Pour les deux parcelles suivantes de chaque série de trois, le poids de chaque touffe est seulement estimé et cette estimation est enregistrée. Pour chaque type de milieux, on procède de la même manière pour les 9 autres séries de

trois placettes. L'ensemble des résultats est enregistré. Progressivement les observateurs, toujours les mêmes, améliorent leur estimation visuelle et les résultats sont corrigés par l'erreur moyenne calculée sur les individus à la fois estimés et pesés.

Traitement des données
Les résultats sont ensuite exprimés en poids sec après passage d'échantillon à l'étuve et calcul de la corrélation entre poids vert et poids sec.
La méthode offre l'avantage d'être à la fois plus économe en temps, d'où possibilité d'accroître le nombre d'échantillons, et relativement moins destructive.

- **Méthode par établissement d'équations de régression**

Protocole pratique
La pratique de la méthode consiste à mesurer un ensemble de paramètres (hauteur, diamètre, *etc*.) d'un grand nombre d'individus de différentes dimensions puis après coupe, pesées, séchage et pesées à exprimer les résultats de la même manière que pour les mesures directes.

Traitement des données
Des relations fiables ont été trouvées entre les valeurs mesurées de paramètres et la phytomasse sur pied pour des buissons ligneux bas et des touffes de graminées pérennes. Des corrélations existent entre un certain nombre de paramètres qualitatifs et des paramètres quantitatifs permettant d'apprécier la phytomasse dans un contexte moindrement destructif.
Selon les taxons des formules ont été trouvés donnant de bonnes corrélations entre le diamètre moyen de la couronne et le poids vert (Joffre 1978 pour des ligneux bas), le diamètre moyen, la hauteur et le poids vert (Joffre 1978, Aidoud 1983 ; pour des ligneux bas), le diamètre basal moyen et le poids vert (Gaddès 1978 pour des touffes de graminées pérennes).

A compléter. Mettre les formules. Cf Edouard !!!

- **3. Méthode radiométrique A conserver ??**

Une méthode non destructive, déjà utilisée pour l'estimation de la phytomasse, est basée sur la mesure de la réflectance spectrale du couvert dans le rouge (0,600 à 700nm) et le proche infra rouge (0,750 à 1,00 nm).
Si de bons résultats ont été obtenus ; cette méthode, rapide à mettre en œuvre à partir d'un appareil portable, est estimée fiable pour les écosystèmes à base de graminées, tant que le rapport matière verte/biomasse totale dépasse 30%. La méthode est par contre relativement imprécise pour des végétations relativement sèches. Il est nécessaire de procéder à un étalonnage préalable de l'appareil, pour chaque type de végétation, et pour chaque stade phénologique.
La méthode n'est pas fiable si la stratification du peuplement (structure) est compliquée ou irrégulière.
Cette méthode présente également des difficultés d'application lorsque le recouvrement de la végétation est faible. C'est le cas en zone aride où la réflectance est due à la végétation d'une part et au sol nu d'autre part. Lahraoui (1987) a appliqué cette méthode à l'étude des steppes d'alfa et des steppes d'armoise blanche au Maroc.

La surface échantillonnée par le radiomètre correspondait à un cercle de 0,63m (radiomètre tenu à trois mètres au-dessus de la végétation) ce qui permettait d'intégrer en général des plages comportant végétation et sol nu. Des méthodes sont actuellement développées qui combinent entre la radiométrie du sol et de la végétation (méthodes du *unmixing* ou de la déconvolution spectrale).

Intéressant mais rappelons que les méthodes doivent absolument être fiables. Le unmixing est encore du domaine de la recherche. Peurt être pas édaquat avec ROSELT/OSS !!!

Méthode de mesure n°3 : Méthode de l'arbre moyen

Protocole pratique

Elle consiste à procéder à un inventaire sur des placettes de 1 ha (100 x 100 m ; ou un cercle de 56,4 m de rayon). Pour chaque placette les individus sont répartis en classe (10) en fonction de leur hauteur mais éventuellement aussi du diamètre de la couronne, *etc*. La pesée de la phytomasse est alors effectué sur l'arbre moyen (caractéristiques moyennes). Généralement les pesées distinguent les feuilles, le tronc, et quelques diamètres de branches. Cette technique forestière dite de « l'arbre moyen » n'est de l'avis des personnes qui l'ont utilisée réellement applicable qu'à l'étude de formations équiennes (plantations, etc. dont les individus sont de même âge).

Traitement des données

La phytomasse du peuplement est obtenue en multipliant le résultat de l'arbre moyen par le nombre d'arbres du peuplement.

Rappels : Pour obtenir une bonne corrélation, il convient de respecter certaines conditions :
Les mesures de phytomasses et des autres paramètres doivent être réalisées simultanément et à l'optimum de développement de la végétation (pic de végétation).
Les effets de la variation de la pression pastorale, qui doit être estimé avec attention, sont du moins dans un premier temps nettement plus marqués au niveau de la phytomasse que pour les paramètres de dimension.

- **Intérêt et limites**

L'intérêt de quantifier avec précision la phytomasse ne fait aucun doute puisque cette donnée permet d'estimer la quantité de ressources disponibles.

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Quadriennal, au moment du pic de végétation ou saisonnier, durant les phases diagnostic
Faisabilité	Connaissances techniques requises
Rentabilité	Nécessite un temps de terrain conséquent selon la méthode utilisée, mise en œuvre plus ou moins fastidieuse
Coût	Dépendant de la méthode utilisée
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Obligatoire, prioritaire**
Fait partie du « kit minimum de données » à collecter et du « kit minimum d'indicateurs » à calculer	

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

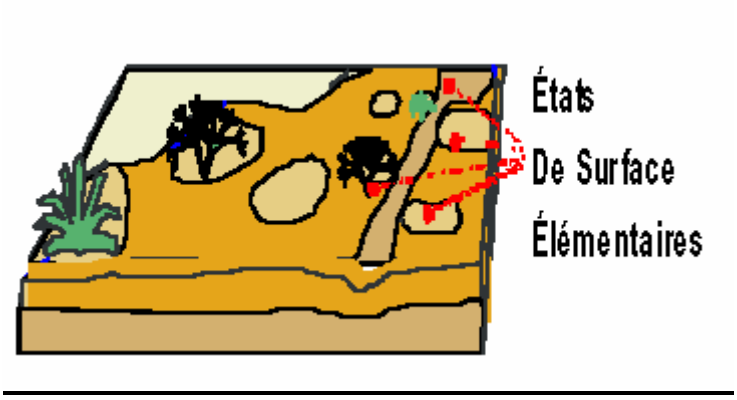
  Comme pour l'ensemble des indicateurs, l'évolution de la phytomasse au cours du temps (étude diachronique) et / ou dans l'espace (étude synchronique) peuvent être menée afin d'étudier l'impact des pratiques / usages (pastoral, agricole…) sur la quantité de phytomasse disponible.

Cette donnée est essentielle à collecter dans le cadre de la modélisation des impacts des usages sur les ressources naturelles (SIEL-ROSELT/OSS).

FICHE TECHNIQUE N°5 : ÉTATS DE SURFACE DU SOL SUR DES STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

Un état de surface correspond à la composition et à l'organisation de la surface du sol à un instant donné (Escadafal, 1989). Il inclut les éléments issus de la végétation et de la superficie du sol.
L'état de surface élémentaire (ESE) est, quant à lui, la plage d'un état de surface qui peut être individualisée et caractérisée au niveau macroscopique (cf. Escadafal, 1989 ; Casenave & Valentin, 1989).



Les surfaces hétérogènes sont considérées come des mosaïques de sous-unités homogènes (« états de surface élémentaires », adapté de Escadafal, 1981a). La mesure de l'extension et des propriétés de chaque sous-unité permet de calculer des valeurs moyennes de la surface complexe

- **Objectif**

Les surfaces des sols des régions arides, souvent hétérogènes à l'échelle stationnelle, sont de fait un arrangement de différentes taches ou plages, distinguables à l'œil nu par leur composition, leur couleur, leur granulométrie, leur micro-relief et leur structure.
Une typologie doit être mise en place et servir de référence pour décrire aussi bien les organisations pelliculaires de surface, que les formes d'accumulation éolienne ou les figures d'érosion hydrique (cf. ROSELT/OSS CT11, 2004).

- **Description des méthodes :**

Valorisation des acquis :

Il est nécessaire de rechercher les données anciennes disponibles (relevés écologiques) sur les états de surface (pourcentage des états de surface élémentaires) des stations géoréférencées.
Il importe également d'adopter la classification des états de surface de Casenave & Valentin (1989) pour les zones sahéliennes mais aussi de l'adapter aux zones du Nord et de l'Est de l'Afrique.

Données à récolter :

- La **fréquence spécifique des états de surface élémentaires** caractérisant la station permanente doit être mesurée, afin de rendre compte de la structure de la station. La somme de ces fréquences peut être assimilée à un recouvrement. Ces données peuvent être récoltées à différentes saisons, en fonction de la dynamique active sur le site (régime des vents, saison des pluies, *etc*.) et de toutes façons au moment du pic de végétation, et **simultanément aux mesures relatives à la végétation (cf. fiche n°3)**.
- La dynamique de l'organisation des états doit être suivie, sur un pas de temps saisonnier ou annuel, afin de rendre compte du fonctionnement stationnel (éolien/hydrique ; érosion/ déposition ; cheminement de l'eau, *etc*.). En effet, avec des recouvrements relatifs d'états de surface similaires, les milieux peuvent avoir des fonctionnements et des dynamiques complètement différents. Une grande attention doit être portée à la répartition des éléments et à leurs interrelations spatiales.

Méthode de mesure :

- Pour la mesure des fréquences spécifiques, l'analyse linéaire de points-quadrats est préconisée (cf. fiche technique n°3). L'état de surface est décrit et noté sur bordereau à tous les points de lecture le long de la ligne de points-quadrats, que ceux-ci soient ou non dépourvus de végétation. La somme des différents états de surface du sol rencontrés doit donc être égale à 100% (cf. guides méthodologiques ROSELT/OSS CT 1 et CT 11, 2004).

- L'étude de la dynamique de l'organisation spatiale des éléments de la surface du sol pourra être envisagée à partir d'images numériques à Très Haute Résolution spatiale (THR) fournies par des «engins volant » (drône téléguidé sur le terrain, images satellitaires THR). Les fréquences spécifiques mesurées au sol servent à la fois de description précise des éléments structurant la station et de validation aux classifications des images numériques.

Traitement des données :

Le traitement des données fait appel à deux méthodes différentes :
- calcul des fréquences spécifiques et du recouvrement des états de surface élémentaires du sol et comparaison des moyennes :
    - analyse de variance (saisonnière, annuelle) des couverts de chaque état de surface élémentaire le long d'un gradient environnemental ;
    - analyse de variance diachronique de l'évolution des états de surface élémentaires d'une même station permanente au cours du temps ;
- analyse diachronique des images multi-dates par des logiciels usuels de traitement d'image.

- **Intérêt et limites**

Comme le recouvrement de la végétation, la mesure du recouvrement des états de surface du sol est particulièrement importante. En zone aride, l'évolution et les modifications des états de surface du sol reflètent «l'état de santé» des systèmes écologiques. Les états de surface du sol jouent, en effet, un rôle majeur dans tous les processus (ruissellement, infiltration, décantation, *etc*.) impliquant l'eau qui est fréquemment la ressource limitante. Ils conditionnent également les possibilités de stockage des graines (incorporation au sol), leur germination, l'émergence et la survie des plantules (Casenave & Valentin, 1989 ; Escadafal,1989).

Certaines organisations de la surface des sols sont particulièrement fréquentes en régions arides. Ainsi, les croûtes dites de «battance» (ou croûtes d'érosion) sont apparues comme étant une caractéristique essentielle de la surface des sols arides. Ces croûtes se retrouvent notamment dans les zones anciennement cultivées, jachères ou friches. Cependant, les états de surface du sol comprennent bien d'autres éléments tels que les pavages de cailloux et de graviers, les placages de sable, des algues ou encore des efflorescences salines. Ces différents composants ont un impact sur l'infiltration, le développement des plantes et la sensibilité du sol à l'érosion hydrique ou à la déflation, comme cela a été montré en Tunisie par exemple (cf. Floret & Pontanier, 1982 ; Telahigue *et al.*, 1987).

Les états de surface du sol, quantifiables à la fois au sol et par télédétection satellitale, constituent ainsi des indicateurs précieux des changements écologiques à long terme.

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel, au moment du pic de végétation
Faisabilité	Nécessite une formation des observateurs
Rentabilité	Facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour **ROSELT/OSS**	**Très grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Obligatoire, prioritaire**
Fait partie du « kit minimum de données » à collecter et du « kit minimum d'indicateurs » à calculer	

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

La méthode peut être utilisée de diverses manières :

1. Comparaison synchronique

   Analyse de variance des couverts des états de surface élémentaires moyens le long de gradients environnementaux (gradient de dégradation du couvert végétal, gradient climatique ou édaphique) sur un observatoire.

2. Comparaison diachronique

   Analyse de variance entre les couverts des états de surface élémentaires moyens d'une station permanente X à différentes saisons et années (T_0, T_1, T_2 … T_n) sur un observatoire.

3. Comparaison synchronique / diachronique

   Analyse de variance entre les couverts des états de surface élémentaires moyens de plusieurs observatoires, à un moment donné et au cours du temps (identification des tendances).

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

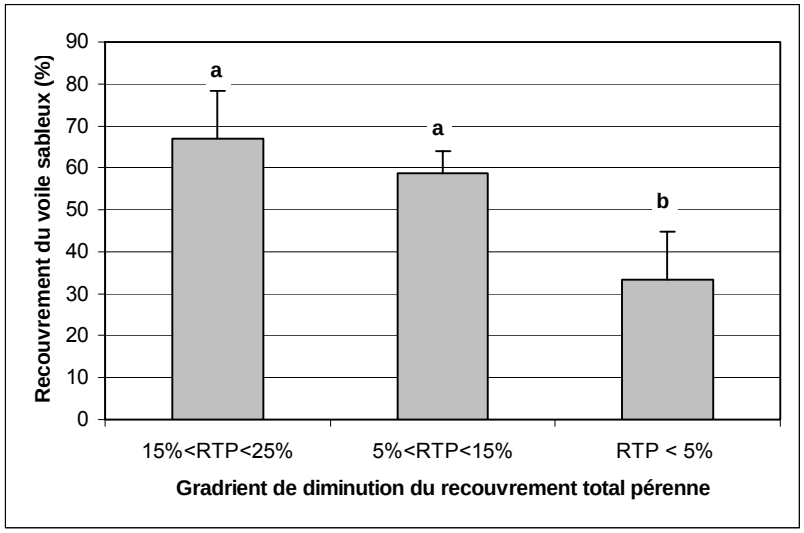


Figure 1.: Étude synchronique : évolution / variation du recouvrement du voile sableux le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne (RTP). Les lettres a et b sont utilisées pour exprimer les différences significatives (test du χ^2).

FICHE TECHNIQUE N°6 : HAUTEUR DES VEGETAUX PERENNES SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La hauteur correspond ici à la hauteur moyenne des végétaux que l'on mesure le long d'une ligne de points-quadrats.

- **Objectifs**

La hauteur des végétaux s'avère être un bon descripteur de la plasticité des végétaux puisqu'il permet de rendre compte de leur capacité d'adaptation aux stress et aux perturbations de leur environnement.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il s'agit de rechercher toutes les données anciennes quantitatives portant sur la mesure de la hauteur des végétaux.

Données à récolter et méthode de mesure :

Il s'agit de mesurer au point la hauteur (h) maximale de la strate (herbacée H, ligneux bas LB ou ligneux haut LH) interceptée sur les lignes de points-quadrats (cf. fiche n°3).
Unité : en mètres.

Traitement des données :

Il s'agit de comparer les moyennes de la hauteur (Analyse de variance) :
- sur une station au cours du temps ;
- le long de gradients environnementaux

- **Intérêt et limites**

Cette mesure simple et rapide donne une bonne indication de la réponse de la végétation aux conditions de stress et de perturbation. Ce descripteur doit être corrélé aux niveaux de pression (usages, tels que la pression pastorale), aux variations climatiques, aux conditions édaphiques… L'étude de la densité des individus et de leur port complète utilement ces informations.

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel sur les stations permanentes
Faisabilité	Besoin d'un botaniste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour **ROSELT/OSS**	**Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Les analyses de variance peuvent être appliquées de différentes manières afin de :
- comparer les variations de la hauteur des végétaux le long de gradients environnementaux (gradients d'usage, climatique, édaphique…) dans un observatoire donné (étude synchronique) ;
- comparer les variations de la hauteur des végétaux au cours du temps dans un observatoire donné (étude diachronique) ;
- comparer les variations de la hauteur des végétaux pour différents observatoires afin de rechercher les corrélations entre hauteur, usages et paramètres climatiques par exemple.

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

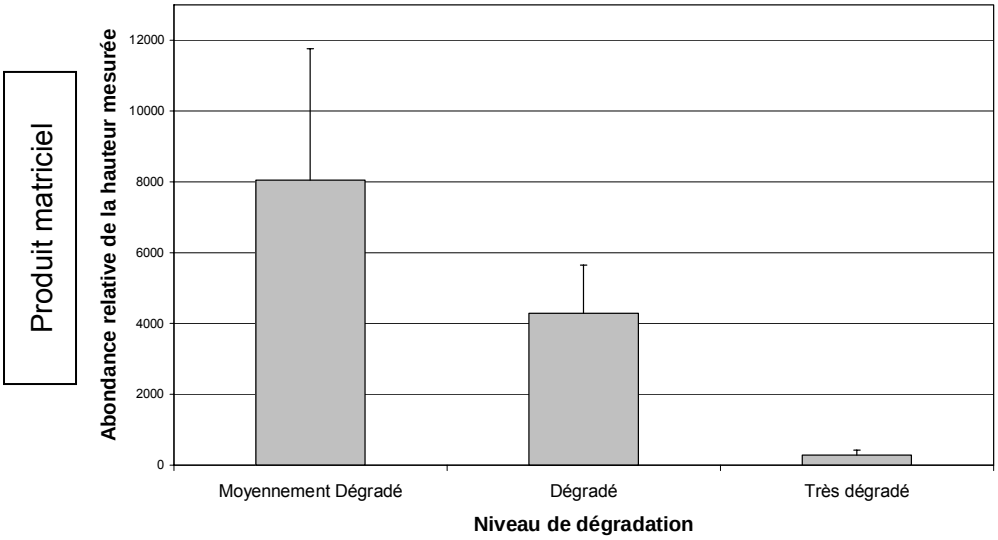


Figure 1. : Étude synchronique : Variation de la hauteur mesurée des chaméphytes au printemps le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne (RTP). $\chi^2_{(35)} = 24.14$, $p < 0.001$ ***

Légende : Moyennement dégradé RTP 15-25 %, Dégradé RTP 5-15% et Très dégradé RTP < 5%
L'abondance relative de la hauteur mesurée a été calculée grâce à un produit matriciel.

FICHE TECHNIQUE N°7 : DENSITE DES ESPECES PERENNES SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La densité d'un taxon végétal est le nombre d'individus de ce taxon présents par unité de surface.

- **Objectif**

La densité d'individus pérennes est un indicateur important de l'état de l'écosystème. Il peut être avantageusement utilisé en combinaison avec d'autres descripteurs, telle la taille moyenne des individus ou encore le recouvrement.
Elle permet également de définir les tendances à l'installation ou à la raréfaction des individus des taxons pérennes et ainsi d'évaluer les tendances évolutives (régénération, dégradation) d'une formation végétale.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il faut rechercher autant que possible des données anciennes circonstanciées (date du relevé, géoréférencement, auteur, protocole, *etc*.).

Données à récolter :

Il s'agit d'effectuer le dénombrement des individus de chaque espèce pérenne dans les stations permanentes de surveillance. Il est également possible d'affiner en distinguant les individus par strates de hauteur ou par classes de phytovolume (par exemple : individu gros, moyen ou petit).

Méthode de mesure :

La seule méthode statistique fiable consiste à réaliser un nombre suffisant de mesures sur des parcelles-échantillons jusqu'à obtenir des écarts à la moyenne qui n'évoluent plus significativement lorsqu'on mesure des échantillons supplémentaires. Ce nombre est déterminé une fois pour toutes pour une station (un faciès paysager) donnée.
En règle générale, au minimum cinq parcelles-échantillons doivent être installées de manière à obtenir une moyenne du nombre d'individus pérennes (densité moyenne par station). Les mesures doivent être faites au moins une fois par an, en particulier au moment du pic de végétation
Des études particulières peuvent justifier plusieurs dénombrements durant la saison de végétation, par exemple pour suivre la germination et le taux de survie des plantules des espèces pérennes, ligneuses notamment, au cours d'années exceptionnelles (recrutement).

Les dimensions (superficie) de la parcelle inventoriée doit être adaptée à la densité moyenne des individus sur la station d'observation (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004).

- Dans les steppes à chaméphytes ou hémicryptophytes (voir Fiche Technique n°7), des **surfaces d'extension** peuvent être installées le long d'une partie de chaque ligne de points-quadrats. Sur les aires ainsi délimitées (entre 1 et plusieurs dizaines de mètres carrés) on dénombre les individus pérennes. Plus les individus sont épars, plus les surfaces (et le nombre de parcelles) doivent être importantes.
- Dans les phanérophytes (depuis la savane arborée jusqu'à la forêt) la superficie des parcelles doit également être importante. Dans ces cas une méthode pratique, empruntée aux forestiers, consiste à échantillonner des parcelles «quart d'hectare circulaire», simplement matérialisées par un point, choisi au hasard dans la station, et

une corde – rayon dont la rotation détermine un cercle autour de ce point : la rotation progressive de la corde intercepte les individus dénombrés. Un rapide calcul permet de déterminer la longueur nécessaire de la corde : 28.2 m pour ¼ ha. On peut, selon la densité augmenter cette surface (individus épars) : ½ ha (39,9 m), 1 ha (56.4 m) ou au contraire la diminuer (densité importante) : 1/8 ha (19.9 m) voire 1/16 ha (14.1 m).
On peut aussi réaliser des dénombrements sur des surfaces carrées ou rectangulaires (50 x 50 m pour ¼ ha), dont les périmètres doivent alors être matérialisés.

Unité : nombre d'individus par unité de surfaces (du m^2 à l'hectare).

Traitement des données :

Différentes analyses de variance peuvent être entreprises :

- analyse de la variance de la densité des espèces pérennes sur chaque station permanente au cours du temps ;
- analyse de la variance de la densité des espèces pérennes le long de gradients environnementaux.

- **Intérêt et limites**

Ce descripteur de la structure des écosystèmes permet le postulat suivant : les chances pour une végétale de se restaurer rapidement après une perturbation croit avec la densité des individus d'espèces pérennes présentes à la disparition de cette perturbation. Ce descripteur est donc pertinent pour expliquer les phénomènes de succession végétale, en fonction des facteurs bio-physiques du milieu et des facteurs de perturbation (sécheresses prolongées, défrichement, feu, surpâturage, *etc*.).
L'interprétation des résultats est nettement améliorée si l'on peut simultanément prendre en compte la taille et le volume des individus (phytovolume). Un bon nombre d'espèces pérennes des zones arides rejettent de souche et un même individu peut alors se développer considérablement dans des conditions qui lui sont favorables. Il convient de rappeler que la densité des espèces pérennes dépend étroitement de l'âge de la perturbation. En effet, après un certain temps, la densité diminue au fur et à mesure que la taille des individus augmente et que la concurrence pour les ressources s'accroît. Les stades «matures» présentent généralement de forts couverts végétaux mais de faibles densités en individus pérennes. Il est donc essentiel de prendre en compte le facteur temps afin d'évaluer les capacités d'un milieu à se régénérer.
A l'inverse, des fortes contraintes exercées en permanence peuvent provoquer une réduction de la taille des individus (nanification) et une augmentation de leur densité.

L'augmentation de la densité (et du phytovolume) des espèces résistantes aux stress et aux perturbations *versus* la diminution de la densité (et du phytovolume) des espèces sensibles aux mêmes facteurs constitue donc un indicateur de dégradation.

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
as de temps	Annuel
Faisabilité	Besoin d'un botaniste compétent
Rentabilité	Facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour **ROSELT/OSS**	**Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Les comparaisons synchroniques permettent d'analyser l'évolution de la densité des espèces pérennes le long de gradients environnementaux, notamment entre différents stades de dégradation.
Les comparaisons diachroniques permettent quant à elles de suivre l'évolution de la densité des espèces pérennes au cours du temps sur une station. Ce descripteur est, particulièrement intéressant à suivre dans les mises en défens, pour évaluer les capacités de régénération de l'écosystème.

En outre, il convient de rechercher les corrélations entre densité/hauteur/recouvrement afin de vérifier les hypothèses concernant notamment la corrélation positive entre nanisme des individus végétaux et dégradation du milieu.
Dans le même esprit, on peut analyser les densités relatives des espèces selon leur valeur pastorale.

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

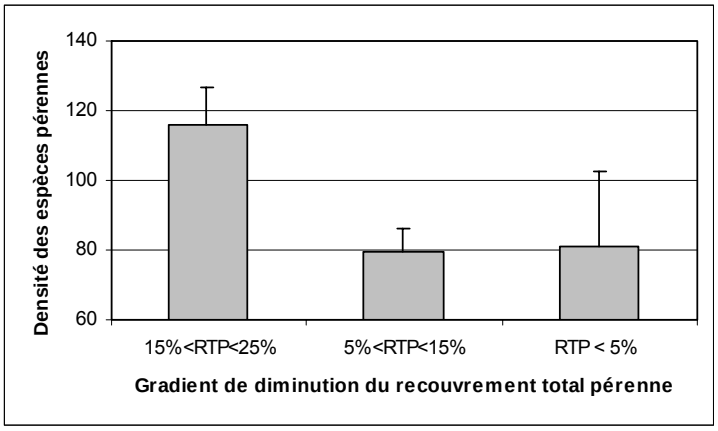


Figure 1. : Étude synchronique : Variation de la densité des espèces pérennes (nombre d'individus / 100 m^2) le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne. χ^2 = 18.39, p < 0.001***

FICHE TECHNIQUE N°8 : DIVERSITE ALPHA SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La diversité alpha est la diversité des espèces dans une communauté – un habitat (Huston, 1994).

- **Objectifs**

La richesse spécifique (indice de diversité le plus simple à évaluer) ne suffit pas pour rendre compte de la composition floristique quantitative d'un peuplement végétal. En effet, deux peuplements présentant la même composition floristique (listes floristiques identiques) mêmes espèces) peuvent être caractérisés par des indices de diversité très différents. Un peuplement dont toutes les espèces ont le même nombre d'individus possède la diversité maximale (Barbault, 1995) tandis qu'un le peuplement dont une espèce est majoritairement dominante possède une diversité moindre. L'estimation des modifications de la diversité végétale doit être complétée par l'utilisation d'indices de diversité.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il est nécessaire de rechercher l'ensemble des anciens relevés (mesures de la fréquence spécifique des espèces sur une station). S'ils n'ont pas été localisés précisément, ils peuvent cependant servir de référence à la caractérisation de la région au sens large. Si par contre, les relevés sont localisés, des études comparatives peuvent être entreprises (comparaison diachronique et analyse de variance).

Données à récolter :

La diversité alpha pouvant être évaluée grâce à l'emploi d'indices basés sur l'utilisation des données quantitatives. L'on a le plus souvent recours aux fréquences des espèces présentes dans une station permanente donnée (fréquences spécifiques), en particulier au moment du pic de végétation.

Méthode de mesure :

Deux types de mesures peuvent être entreprises :

- les mesures quantitatives : l'analyse linéaire de points-quadrats (cf. Fiche technique n°3 : recouvrement de la végétation) ;
- les mesures semi-quantitatives : méthode d'évaluation de l'abondance- dominance de Braun-Blanquet (1952).
  La classification de Braun-Blanquet est un moyen rapide d'estimation visuelle de la couverture de chaque espèce en un site donné. On distingue 6 classes de recouvrement total de la végétation RTV :
  - \+ RTV< 1%
  - 1 RTV 1-5 %
  - 2 RTV 6-25 %
  - 3 RTV 25-50 %
  - 4 RTV 56-75 %
  - 5 RTV 76-100 %

Traitement des données :

1. La première étape consiste à ***calculer divers indices de diversité*** :

Les indices basés sur la théorie de l'information **:**
Ces indices supposent que la diversité dans un écosystème peut être mesurée comme l'information contenue dans un message ou un code. ***L'indice de Shannon-Weaver*** (Shannon & Weaver, 1949) est l'indice le plus simple dans sa catégorie et, donc, le plus largement utilisé.

Cet indice est calculé de la manière suivante :

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \log_2 p_i$$

avec S = nombre total d'espèces
$p_i = (n_j/N)$, fréquence relative des espèces
n_j = fréquence relative de l'espèce j dans l'unité d'échantillonnage
N = somme des fréquences relatives spécifiques

Plus la valeur de l'indice H' est élevée, plus la diversité est grande.

Les structures d'abondance relative des espèces déterminent l'équitabilité ou la composante de dominance de la diversité. Etant donnée une phytocénose constituée de *S* espèces, la diversité est plus élevée si toutes les espèces *S* sont bien représentées (équitabilité élevée, faible dominance) que si un petit nombre d'espèces, dites *T*, sont très communes et que le reste (*S* - *T*) sont présentes mais rares (faible équitabilité, forte dominance). L'évaluation de l'équitabilité est utile pour détecter les changements dans la structure d'une communauté et a quelquefois prouvé son efficacité pour détecter les changements d'origine anthropique. La **mesure de l'équitabilité correspondant à l'indice de Shannon-Weaver** est réalisée selon la formule suivante :

$$E = \frac{H'}{\log_2 S}$$

Les indices de dominance :
Ce groupe d'indices prend en compte la fréquence mesurée des espèces. Ils accordent plus d'importance aux espèces les plus fréquentes qu'à la richesse spécifique totale. Ils sont donc plus sensibles aux espèces les plus fréquentes qu'à la richesse spécifique totale (Magurran, 1988). Dans ce groupe, l'indice le plus largement utilisé est l'indice de Simpson.

- **L'indice de Simpson** (Simpson, 1949)

$$D = \sum_{i=1}^{s} p_i^2$$

La diversité spécifique est la plus élevée quand l'indice de Simpson est le plus faible. La mesure de l'équitabilité correspondant à l'indice de Simpson est :

$$E = \frac{D}{1 - \frac{1}{S}}$$

L'inverse de Simpson permet de faire varier l'indice dans le même sens que la diversité : plus la diversité spécifique est élevée plus l'indice est fort :

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^{s} p_i^2}$$

- **L'indice de Hill** (Hill, 1973)

Hill a montré que les indices de diversité sont mathématiquement liés ; il a donc proposé une formule N_a qui réunit plusieurs expressions classiques de la diversité :

$$N_a = \left(\sum_{i=1}^{S} p_i^{\,a}\right)^{1/(1-a)}$$

Ainsi pour a=0 on trouve N_a = S (richesse spécifique) ; pour a=1 on trouve $N_a = e^{H'}$ dont la valeur maximale est S ; pour a = 2 on trouve N_a = 1/D (indice de Simpson) dont la valeur maximale est 1 quand toutes les espèces ont la même fréquence.

2. La deuxième étape concerne les ***analyses statistiques*** proprement dites. Des analyses de variances doivent être entreprises de manière à comparer les moyennes des divers indices calculés caractérisant les stations le long de gradients environnementaux et/ou au cours du temps.

- **Intérêt et limites**

Ces indices paraissent attractifs à première vue mais ne rendent pas forcément compte de la réalité. La diversité peut être élevée au moment du pic de végétation (grand nombre d'espèces réparties de manière équitable) tandis que le couvert peut être élevé ou faible. La pertinence de ces indices est encore en discussion. Leur utilisation et leur interprétation doivent toujours être couplées à d'autres descripteurs quantitatifs.

- **Evaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel (évaluation des fréquences spécifiques) Quadriennal (diagnostic) Evènements climatiques exceptionnels
Faisabilité	Dépend de la mesure des fréquences spécifiques
Rentabilité	Facile à calculer
Coût	Faible
Pertinence pour **ROSELT/OSS**	**A tester**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**A valider**

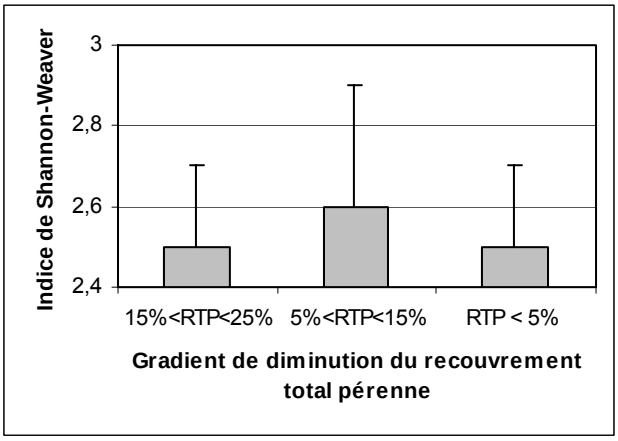
- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

A tester, notamment pour comparer les observatoires entre eux (comparaison à l'échelle régionale ex : Nord *vs.* Sud du Sahara).**Note pour la mise en page : si possible sur une pleine page paire en fin de fiche n° 5,**
encadré, légèrement grisé

Exemples d'application de la méthode

Tableau 1 : Méthode de calcul de l'indice de Shannon-Weaver et de son équitabilité pour une station de surveillance permanente (Source : Jauffret, 2001).

Station 1	**Fréquence spécifique**	$p_i = n_i/N$	$\log_2 p_i$	$- p_i \log_2 p_i$
Astragalus armatus	4	0,1739	-2,5236	0,4389
Deverra tortuosa	2	0,0870	-3,5236	0,3064
Zygophyllum album	1	0,0435	-4,5236	0,1967
Cynodon dactylon	1	0,0435	-4,5236	0,1967
Diplotaxis harra	4	0,1739	-2,5236	0,4389
Astragalus corrugatus	1	0,0435	-4,5236	0,1967
Stipa capensis	10	0,4348	-1,2016	0,5224
N	**23**			
S	**7**			
Indice de Shannon $H' = - \Sigma\, p_i \log_2 p_i$	**2,2966**			
Equitabilité $E = H'/ \log_2 S$	**0,8181**			



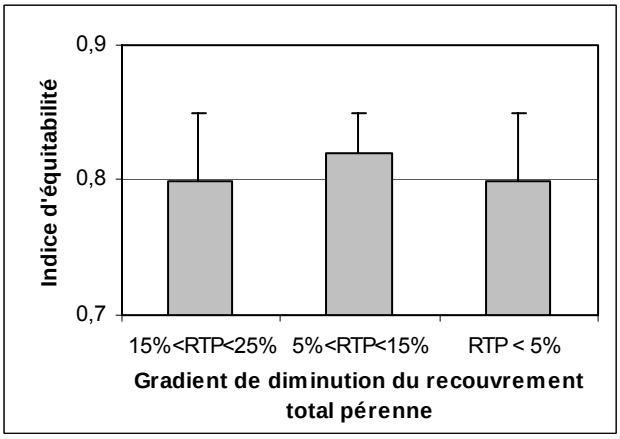


Figure 1. Variation de l'indice de Shannon - χ^2 = 1.7565, p > 0.5 n.s. - et de l'indice d'équitabilité - χ^2 = 0.8071, p > 0.5 n.s. - le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne (RTP)

FICHE TECHNIQUE N°9 : DIVERSITE BETA ENTRE DIFFERENTES STATIONS PERMANENTES LE LONG D'UN GRADIENT ENVIRONNEMENTAL

- **Définition**

La diversité béta correspond à l'importance du remplacement des espèces, ou des changements biotiques, le long de gradients environnementaux (Whittaker, 1972). La diversité béta mesure donc le gradient de changement de la diversité entre différents habitats, sites ou communautés.

- **Objectif**

L'intérêt de l'étude de la diversité béta est de compléter l'étude de la diversité alpha (richesse spécifique et indices de diversité) et de rendre compte de la diversité à l'échelle d'une région.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il est nécessaire de rechercher l'ensemble des listes floristiques anciennes, établies ou resituées si possible le long de gradients environnementaux. Le traitement de ces données doit permettre d'établir la situation de référence.

Données à récolter et méthode de mesure :

Pour étudier la diversité béta, il est indispensable de disposer de la composition floristique des stations. Pour cela, il faut établir la liste exhaustive des espèces végétales caractérisant des situations, considérées comme représentatives, le long du gradient environnemental choisi (par exemple les différents stades d'une succession post-culturale). On inventorie alors l'ensemble des espèces caractérisant chaque situation, au moment du pic de végétation.

Traitement des données :

La diversité béta peut être mesurée en utilisant divers indices (cf. Contribution Technique n°1) parmi lesquels nous retenons prioritairement l'indice de Jaccard qui suit :

⇒ **L'indice de Jaccard** (1908, *in* Roux & Roux,1967) permet de quantifier la similarité entre habitats. La similarité augmente avec la valeur de l'indice. Il se calcule ainsi à partir de mesures effectuées sur des stations (relevés, inventaires, transects) à partir d'un tableau « espèces-relevés ».

Cet indice est calculé de la manière suivante (Jaccard,1901 *in* Roux & Roux, 1967) :

$$P_J = \frac{c}{a+b-c} \times 100$$

avec :
a = nombre d'espèces de la liste a (relevé A)
b = nombre d'espèces de la liste b (relevé B)
c = nombre d'espèces communes aux relevés A et B.

- **Intérêt et limites**

L'intérêt d'une telle étude réside dans le fait que la diversité béta peut rendre compte de l'homogénéisation de la végétation entre les différentes formations végétales le long de gradients environnementaux (ex : grand nombre d'espèces à large amplitude écologique).

Cependant, cet indicateur intimement lié à la qualité des listes floristiques établies (exhaustivité) montre ces limites dans le sens où la présence d'un botaniste expérimenté est exigée pour la récolte des données brutes.

- **Evaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel ou quadriennal (diagnostic de la richesse globale de l'observatoire)
Faisabilité	Besoin d'un botaniste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Très grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Les comparaisons diachroniques et synchroniques des indices de diversité béta peut être effectuée dans chaque observatoire.
Une comparaison synchronique / diachronique de ces indices peut aussi être entreprise entre observatoires comparables (ex : steppes d'Afrique du Nord) permettant de dégager des évolutions et tendances similaires le cas échéant (ex : homogénéisation de la flore).

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

Tableau 1. Evolution de l'indice de Jaccard au cours de la dégradation d'un milieu caractériser par un écosystème en bon état, un écosystème peu dégradé et un écosystème dégradé (Source : Jauffret 2001).

	Bon état	**Peu dégradé**	**Dégradé**
Bon état	**-**		
Peu dégradé	0.64	-	
Dégradé	0.44	0.67	**-**

Au cours de la dégradation, on remarque que plus de 60% de la flore est commune entre le stade en bon état et le stade peu dégradé d'une part ; et entre le stade peu dégradé et le stade dégradé d'autre part. De même, 44% de la flore est conservée entre les stades en bon état et dégradé. Ce résultat permet de suivre l'évolution de la composition floristique le long d'un gradient de dégradation. Une grande partie des espèces est conservée, ceci témoigne de l'adaptation des espèces ubiquistes.

FICHE TECHNIQUE N°10 : SPECTRES BIOLOGIQUES DE RAUNKIAER SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

Les végétaux peuvent être classés selon leur type biologique «*life form*» déterminé par la morphologie générale de l'espèce, qui exprime en partie son adaptation à l'environnement.

Raunkiaer (1934) a défini une classification des types biologiques fondée sur l'adaptation des plantes à la mauvaise saison correspondant soit à la période froide des climats tempérés ou froid, soit à la période sèche et chaude des régions tropicales et méditerranéennes *s.l.*
Le système de Raunkiaer est basé sur la situation des bourgeons dormants qui assurent la production / reproduction pour la période de végétation suivante. Ce système distingue 5 types principaux de végétaux terrestres :

- les phanérophytes & nanophanérophytes: plantes vasculaires ligneuses dont les organes végétatifs sont placés en hauteur et dont les bourgeons végétatifs sont situés à 25 cm, ou plus, au dessus du sol. Ces végétaux sont dits 'ligneux hauts' et l'on distingue les phanérophytes (> 2 m) et nanophanérophytes (0.25-2 m). Si certaines situations l'imposent, il sera possible de distinguer une catégorie de mégaphanérophytes (> 8 m).
- les chaméphytes : plantes ligneuses dont les bourgeons végétatifs se situent au maximum à 25 cm du sol. Ces végétatux sont également désignés par le terme 'ligneux bas' < 0.25 m.
- les hémicrytophytes : plantes herbacées (dépourvues de parties aériennes durables). La perennité de ces plantes est assurée à partir des bourgeons végétatifs, situés au ras du sol (collet). Les graminées pérennes relèvent de cette catégorie.
- les cryptophytes : plantes herbacées ne subsistant, durant la mauvaise saison que par les parties souterraines (bulbes, tubercules, rhizomes). Il s'agit également d'herbacées pérennes.
- les thérophytes : plantes annuelles dont la durée du cycle évolutif est variable mais inférieure à un an. Ce cycle peut être très court, en particulier en zones arides : les plantes sont alors qualifiées d'éphémérophytes ou d'éphéméroides. Les végétaux ayant type biologique supportent les rigueurs imposées par la sécheresse en régions méditerranéenne et tropicale ; la graine est l'organe le mieux adapté pour résister longtemps à des conditions défavorables.

- **Objectif**

L'intérêt de regrouper les taxons selon leur mode de croissance ou selon leur morphologie constitue un élément important dans la description de la physionomie, de la structure de la végétation, mais aussi de son fonctionnement. En effet, le spectre biologique d'une végétation exprime les adaptations évolutives des plantes à l'environnement (Orshan, 1982), y compris aux pressions exercées par l'homme et les animaux herbivores.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il s'agit d'établir les spectres biologiques à partir des listes floristiques anciennes disponibles sur des stations si possible géoréférencées.

Données à récolter :

Le spectre biologique d'une station est établi en déterminant le nombre d'espèces de chaque type biologique. Il faut donc connaître la liste floristique exhaustive des espèces ainsi que leur biologie. La liste floristique est généralement établie au pic de végétation.

Pour approfondir l'analyse, le spectre biologique peut aussi être établi en utilisant les données quantitatives associant ainsi chaque type biologique à sa fréquence spécifique.

Méthode de mesure :
La récolte des données se fait comme suit :
1. Établir la liste exhaustive des espèces sur chaque station permanente,
2. Utiliser l'analyse linéaire de points-quadrats (*cf.* fiche méthodologique : Étude du recouvrement de la végétation) pour obtenir les données quantitatives (fréquences spécifiques),
3. Vérifier et compléter les connaissances vis à vis des types biologiques auquel appartient chacun des taxons relevés.
Unité : pourcentage

Traitement des données :
Le traitement des données consiste à :
- Établir les spectres biologiques en fonction de la richesse spécifique (nombre d'espèces) et/ou en fonction de la fréquence spécifique
- Effectuer une analyse de variance : comparaison des moyennes des différents types biologiques (données de richesse ou données quantitatives avec les fréquences spécifiques) au cours du temps sur une station permanente ou le long de gradients environnementaux.

- **Intérêt et limites**

Bien qu'étant la plus usitée, la classification des types biologiques de Raunkiaer, établie pour les pays à saison froide, ne donne pas complète satisfaction en zone aride chaude. En effet, elle ne prend pas en compte le fait que la période défavorable à la vie des végétaux est le moment où l'eau, principal facteur limitant, est la moins disponible. L'adaptation des espèces dans ces régions est fonction des précipitations, de la température et de l'éclairement.

En milieu aride un type biologique domine souvent les autres. ROSELT/OSS devra vérifier les hypothèses concernant la domination des espèces annuelles (thérophytes) dans les systèmes fortement anthropisés (surpâturage, cultures) ; celle des phanérophytes dans les systèmes bien alimentés en eau et relativement peu salés. D'une façon générale, ROSELT/OSS devra expliquer pourquoi les chaméphytes fournissent la plus grande part de la phytomasse dans l'ensemble des systèmes écologiques tant soit peu dégradés de la région présaharienne (formations steppiques) d'Afrique du Nord, tandis que les graminées pérennes (hémicryptophytes) et les phanérophytes dominent dans les zones de savanes. Quels facteurs sont susceptibles d'expliquer la composition de la flore en termes de type biologique ?

- **Evaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel
Faisabilité	Besoin d'un botaniste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Très grande**

Mise en œuvre nécessaire Recommandée pour ROSELT/OSS

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Les comparaisons diachroniques et synchroniques des spectres biologiques peuvent être effectuées dans chaque observatoire.
Une comparaison synchronique / diachronique des spectres biologiques peut aussi être entreprise entre observatoires comparables (ex : steppes d'Afrique du Nord) permettant de dégager des évolutions et tendances (et donc des processus) similaires le cas échéant.

Exemples d'application de la méthode

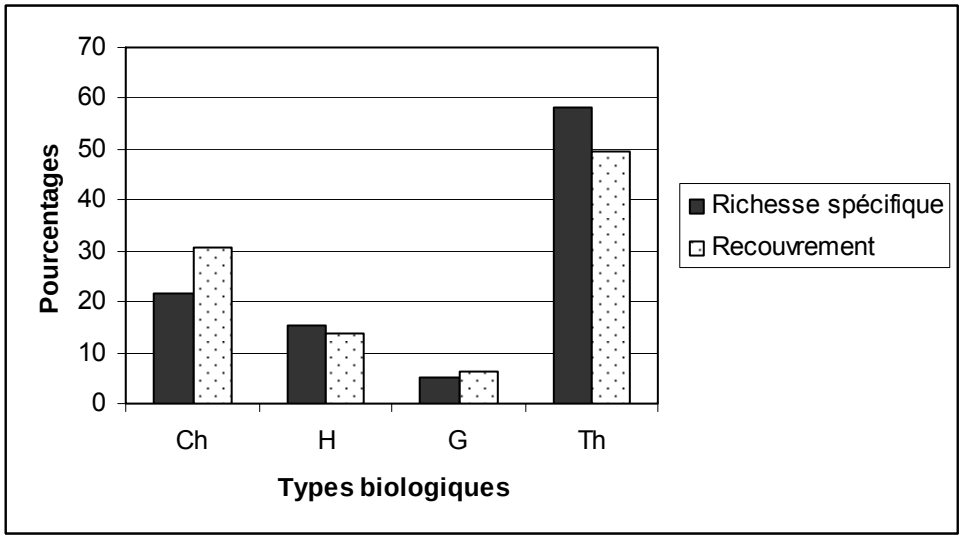


Figure 1. Spectres biologiques moyens de la séquence à *Rhanterium suaveolens*, établis en fonction de la richesse spécifique (nombre d'espèces) et du recouvrement pour chaque type biologique. Observatoire de Menzel Habib, Tunisie. (Source : Jauffret, 2001). Légende : Ch : chaméphyte ; H : hémicryptophytes ; G : géophytes et Th : thérophyte

FICHE TECHNIQUE N°11 : PROPORTIONS D'ESPECES PALATABLES VS. NON PALATABLES SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

Une espèce est dite palatable lorsqu'elle est consommée ou très consommée par le bétail. Au contraire, une espèce non palatable est peu ou pas appréciée par le bétail.
La palatabilité peut, par exemple, être évaluée grâce à un indice d'acceptabilité relatif compte tenu du fait que la consommation d'une espèce dans une station donnée est fonction de sa disponibilité mais également de la disponibilité des autres espèces.
Waechter (1982) a ainsi établi un indice :

$$IA_{ij} = 1/N \Sigma CR_{ijk} / CV_{ik}$$

où IA_{ij} est l'indice d'acceptabilité de l'espèce végétale i pour l'espèce animale j ;
CR_{ijk} = la contribution de l'espèce végétale i au régime de l'espèce animale j (ovin, caprin, …) au sein du site d'observation k (%),
CV_{ik} = la contribution de l'espèce i au phytovolume total du site d'observation k (%),
et N = nombre total de sites observés.

- **Objectif**

La prise en compte de la proportion espèces palatables/ espèces non-palatables permet de décrire la qualité pastorale d'un système écologique. Ce descripteur devient encore plus pertinent s'il est associé à un critère quantitatif tel que le phytovolume ou le recouvrement. Bien nentendu ce descripteur permet de suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources pastorales au cours du temps.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il est nécessaire de rechercher l'ensemble des données et des études sur le pastoralisme entreprises sur l'observatoire par le passé (valeurs pastorales, indices spécifiques de palatabilité, unité fourragère).

Données à récolter :

Il s'agit d'établir dans chaque station permanente la fréquence spécifique (et/ou le phytovolume) des espèces présentes au moment du pic de végétation.
Les indices d'acceptabilité sont généralement disponibles dans la littérature pour chaque grande région écologique.
Si aucune donnée n'existe sur les indices d'acceptabilité, il faut envisager une étude pastorale (par suivi du comportement des troupeaux au pâturage par exemple). Remarque : les indices d'acceptabilité doivent être contextualisés et régulièrement actualisés. L'indice est généralement « enquêté ». Dans la pratique la procédure adoptée est de classer les taxons pérennes et annuels selon les appréciations moyennes estimées d'un certain nombre d'éleveurs et de pasteurs questionnés à ce propos. La résultante peut-être un classement allant de 0 (toxique, non consommé) à 10 (très bonne espèce, très recherchée du bétail) ou encore de 0 à 5. La note relative décernée à un taxon constitue son indice de qualité spécifique (IS) tel qu'il est utilisé dans la formule de calcul de la valeur pastorale d'une unité, présentée au paragraphe afférent.

C'est d'ailleurs généralement ainsi que les indices sont établis. Par ailleurs il y à disposition de relativement nombreuses évaluations

Méthode de mesure :

L'analyse linéaire de points-quadrats permet de disposer des fréquences spécifiques et des phytovolumes pour chaque espèce (*cf.* fiche technique n°3).

Si les indices d'acceptabilité (ou de valeur pastorale des espèces ; cf. ROSELT/OSS CT1, 2005) n'existent pas pour la région représentée par l'observatoire, il conviendra de les déterminer dans le cadre de ROSELT/OSS, avec la mise en place de protocoles sur le comportement des troupeaux et le comportement individuel des animaux domestiques au pâturage. Plus simplement, l'indice d'acceptabilité peut être déterminé grâce à des enquêtes auprès des pasteurs (cf. ROSELT/OSS CT1, 2005).

Traitement des données :

La première étape consiste à classer les espèces en catégories de végétaux selon leur palatabilité relative à partir des données disponibles (indices) puis de calculer les pourcentages pour chaque station permanente : x % d'espèces palatables *vs.* y % d'espèces non palatables.

Il s'agit ensuite de faire des comparaisons de pourcentage :

- comparer l'évolution des pourcentages des deux catégories d'espèces au cours du temps pour une même station ;
- comparer les pourcentages des deux catégories d'espèces le long de gradients environnementaux.

- **Intérêt et limites**

L'intérêt réside essentiellement dans la possibilité de compléter ainsi le diagnostic de l'évolution des systèmes écologiques au cours du temps, soumis à une pression pastorale. Le critère quantitatif (recouvrement / phytovolume) décrivant les ressources végétales est associé à un critère qualitatif (palatabilité) permettant d'évaluer les potentialités offertes par les systèmes écologiques en tant que «terres de parcours» (cf. ROSELT/OSS CT1, 2004 : évaluation des ressources pastorales) ou au contraire les stades de dégradation des ressources (envahissement par des *refus* pastoraux) qui ne traduisent pas obligatoirement une «dégradation des terres» en termes de productivité biologique. Un exemple illustre ce propos dans le Sud Tunisien, avec le remplacement (non irréversible) de l'écosystème pastoral à *Rhanterium suaveolens* par un stade dégradé (seulement utilisable par les Camélidés) à *Astragalus armatus* subsp*. armatus*.

La notion développée ici permet donc aussi, en l'absence d'autres travaux, d'interpréter l'état général de l'écosystème en fonction des pressions probables qui se sont exercées ou qui sont encore appliquées sur ses différents constituants.

Il est par ailleurs clair que la performance de ce descripteur est grandement améliorée s'il est possible de l'associer à d'autres descripteurs, par exemple la classification en types biologiques (Fiche Technique n°10). Les espèces thérophytes pâturées n'ont pas la même réponse écologique que les espèces pérennes. Les thérophytes se reproduisent exclusivement par graines seront surtout sensibles à un pâturage excessif durant les phases phénologiques s'étalant depuis la floraison jusqu'à la dispersion des graines ; les espèces pérennes seront fragilisées par un pâturage récurrent, limitant ou inhibant leur développement végétatif.

Cependant, afin de mieux comprendre la dynamique végétale, il faut pouvoir corréler les variations des proportions des deux catégories d'espèces à des pressions pastorales connues. Pour ce faire, des études portant sur la charge pastorale ainsi que sur le comportement au pâturage sont nécessaires et doivent être appliquées sur chaque station (cf. ROSELT/OSS CT2, 2004).

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Annuel (sur station) ou quadriennal (phase diagnostic)
Faisabilité	Besoin d'un pastoraliste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour **ROSELT/OSS**	**Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Il est possible de comparer de façon diachronique sur chaque observatoire et entre différents observatoires les proportions des espèces palatables/espèces non palatables. Ceci permet d'apprécier l'évolution des écosystèmes sous les effets de la pression pastorale dans un observatoire et entre les différents observatoires d'une même sous-région.

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

Tableau 1. Relevés floristiques de deux stations permanentes de surveillance et indice d'acceptabilité des espèces présentes (Source : Jauffret 2001).
Classe de l'indice d'acceptabilité (codification à partir des données de Le Houérou & Ionesco 1973) : 0 espèce non appétée, 1 espèce rarement appétée, 2 espèce peu appétée, 3 espèce appétée, 4 espèces bien appétée et 5 espèce très appétée.

Espèces	Indice d'acceptabilité	Station 1	Station 2
Chaméphytes			
Astragalus armatus	2		1
Atractylis serratuloides	2	1	1
Gymnocarpos decander	5		1
Helianthemum kahiricum	4	1	
Helianthemum sessiliflorum	5		1
Salvia aegyptiaca	3	1	1
Hémicryptophytes			
Echium humile	2	1	1
Erodium glaucophyllum	1	1	1
Herniaria fontanesii	3	1	
Launaea mucronata	5		1
Lotus creticus	3		1
Thérophytes			
Astragalus corrugatus	4	1	1
Cutandia dichotoma	4		1
Fagonia glutinosa	0	1	
Filago pyramidala	1	1	1
Hippocrepis areolata	4		1
Rostraria salzmannii	3		1
Koelpinia linearis	4		1
Malva aegyptiaca	3	1	
Matricaria auraea	2	1	
Medicago laciniata	4		1
Schismus barbatus	4		1
Stipa capensis	2		1
Thesium humile	0		1

Tableau 2. Calcul du nombre des espèces palatables et non palatables (voir légende Tableau 1) et de leur pourcentage respectif dans les stations 1 et 2.

	Nombre d'espèces palatables (classes 3, 4 et 5)	Nombre d'espèces non palatables (classes 0, 1 et 2)	Espèces palatables %	Espèces non palatables %
Station 1	5	6	45	55
Station 2	12	7	63	37

NB : Classe de l'indice d'acceptabilité (codification à partir des données de Le Houérou & Ionesco 1973) : 0 espèce non appétée, 1 espèce rarement appétée, 2 espèce peu appétée, 3 espèce appétée, 4 espèces bien appétée et 5 espèce très appétée.

FICHE TECHNIQUE N°12 : PROPORTIONS DES ESPECES EN C3 VS. ESPECES EN C4 SUR STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

Selon leur mécanisme biochimique de photosynthèse les espèces sont, dans le cadre qui nous concerne, qualifiées d'espèces en C3 ou en C4.
Les espèces d'affinité méditerranéenne sont essentiellement du type C3 et fonctionnent bien quand l'eau est disponible et que les températures ne sont pas trop élevées.
Dans les régions tropicales sèches les espèces «en C4» sont très majoritaires. Elles ont un avantage compétitif sur les plantes «en C3» lorsque les températures s'élèvent au-dessus de 30°C et que l'humidité atmosphérique diminue (*cf.* Frontier & Pichod-Viale, 1991). Cet avantage ne s'exprime, bien entendu, que si l'humidité du substrat est encore suffisante pour assurer la demande des végétaux pour leur croissance..

- **Objectif**

L'étude de la proportion des espèces (en particulier de leur abondance) de ces deux catégories de mécanisme biochimique de photosynthèse permet de juger de l'adaptation des espèces à leur environnement, en particulier le long de gradients environnementaux (ex : relictes «tropicales» en zone méditerranéenne).

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il s'agit de rechercher l'ensemble des études sur les types biochimiques de photosynthèse identifié pour les espèces rencontrées dans l'observatoire. Les anciennes listes d'espèces sont nécessaires pour comparer les variations de proportions des espèces en C3 et en C4 au cours du temps.

Données à récolter et méthode de mesure :

Il s'agit d'établir la liste des espèces dans chaque station permanente et autant que possible leur attribuer une abondance (fréquence spécifique, recouvrement…). La méthode d'analyse linéaire de points-quadrats est préconisée (cf. fiche technique n°3).

Traitement des données :

Une fois les proportions C3/C4 calculées, deux types de traitements statistiques peuvent être entrepris :

- une comparaison au cours du temps des proportions respectives d'espèces en C3 et en C4 le long d'un gradient environnemental et de chaque station permanente;
- une analyse de la variance au cours du temps des abondances respectives (somme des fréquences spécifiques des espèces, recouvrement…) des espèces en C3 et en C4, le long d'un gradient environnemental et de chaque station permanente.

- **Intérêt et limites**

Ce concept est très intéressant, notamment dans le cadre de l'évaluation des changements écosystémiques en relation avec les modifications climatiques. L'efficacité relative des espèces en C3 et en C4 dépend en effet essentiellement de la température moyenne, dont la tendance est à la hausse dans le contexte des changements globaux.
Il est évident que la pression anthropique peut jouer un rôle sélectif supplémentaire selon l'intérêt relatif de l'espèce en tant que ressource, quel que soit son mécanisme biochimique. L'interprétation isolée de ce descripteur s'en trouve compliquée.
Les connaissances fragmentaires et disparates concernant les types biochimiques de photosynthèse rendent encore difficile la mise en œuvre d'une telle étude dans tous les

observatoires. L'utilisation de ce descripteur requiert une analyse bibliographique exhaustive incluant la recherche de l'ensemble des études menées sur la biologie des espèces étudiées (dans tous les écosystèmes susceptibles d'abriter ces espèces), une synthèse peut parfois être réalisée.
Bien que ce paramètre soit délicat à retenir à l'échelle locale, il revêt un grand intérêt à l'échelle régionale notamment dans le cadre de l'étude de la raréfaction ou l'envahissement de quelques espèces emblématiques en C3 et C4. La dégradation des sols peut entraîner la réduction de leur capacité de stockage d'eau qui est alors captée au bénéfice des espèces fonctionnant plus tôt en saison (C3).

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	La première année de mesure puis quadriennale
Faisabilité	Besoin d'une étude bibliographique importante
Rentabilité	Facile à mettre en œuvre quand les données de base existent
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	Grande au niveau régional
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Progressive en fonction des acquis exogènes sur les espèces**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

A étudier progressivement dans le réseau ROSELT/OSS, notamment pour les observatoires d'Afrique au Nord du Sahara..

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

Afin d'utiliser ce descripteur, il est nécessaire de valoriser les acquis et d'effectuer une analyse bibliographique exhaustive afin de déterminer pour chaque espèce le type biochimique de photosynthèse correspondant. Généralement, pour un site donné, les informations concernant les types biochimiques de photosynthèse manquent. Cependant, en recherchant l'ensemble des études menées sur la biologie des espèces étudiées (dans tous les écosystèmes susceptibles d'abriter ces espèces), une synthèse peut être faite (*cf.* **Tableaux 1** et **2**).

Tableau 1. Quelques exemples de types biochimiques de photosynthèse de type C4 pour des espèces de la flore tunisienne (extrait de Floret & Pontanier 1982)

ESPECES DE TYPE C4		
Anabasis aphylla *Anabasis articulata* *Anabasis oropodierum* *Aristida adsencionis* *Stipagrostis plumosa* (= *Aristida plumosa*) *Haloxylon schmittianum* (= *Arthrophytum schmittianum*) *Haloxylon scoparium* (= *Arthrophytum scoparium*)	*Atriplex glauca* *Atriplex halimus* *Atriplex semibaccata* *Bassia muricata* *Calligonum comosum* *Cornulaca monocantha* *Dicanthium annulatum* *Echiochilon colona* *Heteropogon contortus* *Hyparrhenia hirta*	*Noaea mucronata* *Panicum turgidum* *Salsola kali* *Salsola longifolia* *Salsola tetragona* *Salsola tetranda* *Salsola soda* *Salsola vermiculata* *Suaeda fruticosa* *Suaeda vermiculata*

Tableau 2. Quelques exemples de types biochimiques de photosynthèse de type C3 pour des espèces de la flore tunisienne (extrait de Floret & Pontanier 1982)

ESPECES DE TYPE C3		
Aizoon hispanicum *Asphodelus tenuifolius* *Atriplex hastata* *Atriplex mollis* *Beta vulgaris* *Chenopodium album* *Chenopodium ambroisides* *Chenopodium murale*	*Chenopodium vulvaria* *Citrullus colocynthis* *Cressa cretica* *Diplotaxis harra* *Farsetia aegyptiaca* *Halimione portulacoides* *Halocnemum strobilaceum* *Halopeplis amplexicaulis*	*Pegamum harmala* *Phoenix dactilyfera* *Polygonum monspeliensis* *Ricinus communis* *Salicornia arabica* *Sisymbrium irio* *Thymelaea hirsuta*

FICHE TECHNIQUE N°13 : SPECTRES BIOGEOGRAPHIQUES DE LA FLORE DES STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

La biogéographie a pour objet de définir les limites de la répartition spontanée des espèces vivantes sur la planète. Cette répartition est fonction de l'adaptation des espèces à leur environnement.

- **Objectif**

Le regroupement des espèces suivant leur type biogéographique et leur proportion dans la flore locale permet de juger de l'évolution de la composition floristique au cours du temps.

- **Description de la méthode :**

Valorisation des acquis :

Il s'agit de rechercher les listes d'espèces établies dans le passé sur des stations, si possible géoréférencées. Une synthèse sur l'Afrique du Nord fournit déjà de nombreuses données (Le Houérou, 1995).

Données à récolter et méthode de mesure

Il est nécessaire d'établir la liste complète des espèces caractérisant chaque station permanente. Chaque espèce se voit ensuite affectée de son type biogéographique (information généralement consignée dans les flores locales ou régionales).

Traitement des données :

Une fois les espèces classées par type biogéographique ; il convient de calculer, pour chaque site, la proportion de la flore relevant de chacun des types biogéographiques. Ces bilans permettront de :

- comparer l'évolution les proportions des types biogéographiques au cours du temps pour une même station,
- comparer les proportions des types biogéographiques le long de gradients environnementaux.

Les données quantitatives (fréquences spécifiques, recouvrement…) peuvent aussi être utilisées et des analyses de variance entreprises :

- analyse de la variance de l'abondance des types biogéographiques dans chaque station permanente au cours du temps ;
- analyse de la variance de l'abondance des types biogéographiques le long de gradients environnementaux.

- **Intérêt et limites**

Cette étude permet d'analyser l'évolution de la composition floristique sous les effets cumulés des différentes pressions environnementales (facteurs climatiques, édaphiques, anthropiques…).

Cependant, il est nécessaire d'effectuer une bonne synthèse bibliographique pour extraire des flores les informations sur le type biogéographique d'une espèce donnée. Dans certains pays, des flores nationales existent. Pour les autres pays, il faudra se référer aux flores régionales comme par exemple la Flore du Sahara (Ozenda, 1977).

- **Évaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	La première année puis quadriennale
Faisabilité	Besoin d'une étude bibliographique (Flores)
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Grande au niveau régional**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

Il est possible de comparer sur chaque observatoire et entre différents observatoires l'évolution des proportions des types biogéographiques dans le temps. Ceci permettra d'analyser l'évolution des cortèges biogéographiques dans un observatoire (échelle locale d'un pays), entre les différents observatoires d'une même sous-région, ainsi qu'entre sous-régions à l'échelle de l'ensemble du réseau.

Exemples d'application de la méthode

Tableau 1. Evolution du nombre d'espèces classées par type biogéographique sur deux stations permanentes de surveillance. (Source : Jauffret, 2001).

Type biogéographique	Station 1		Station 2	
	1975	2000	1975	2000
Algérie –Tunisie - Libye		1		
Circum - méditerranéenne			1	
Cosmopolite				1
Endémique Libyco-Tunisienne		1		
Eury – Méditerranéenne		1	1	1
Ibéro - Mauritanienne				
Macaronésienne - Méditerranéenne	1		2	1
Méditerranéenne	4	7	7	5
Méditerranéenne – Irano -Tourannienne			1	1
Méditerranéenne - Saharienne	1	1	1	1
Méditerranéenne – Saharo -sindienne		1		1
Nord-Africaine	2	5		2
Sud Méditerranéenne				
Saharienne	3		1	1
Saharienne – Irano –Touranienne	1			
Saharo - sindienne	5	6	2	2
Tripolitaine – Cyrénaïque – Égypte	1	1		1

A partir des données du tableau précédent, il est possible, après avoir établi un regroupement par types biogéographiques majeurs, d'établir les spectres biogéographiques (Tableau 2).

Tableau 2. Évolution du spectre biogéographique sur les stations permanentes de surveillance

Type biogéographique	Station 1		Station 2	
	1975	2000	1975	2000
Eury-méditerranéenne	0	1	1	1
Cosmopolite	0	0	1	1
Nord africaine	3	8	0	3
Méditerranéenne	6	9	11	9
Saharienne	9	6	3	3

FICHE TECHNIQUE N°14 : ÉTUDE DES TYPES STRATEGIQUES DES ESPECES VEGETALES SUR DES STATIONS PERMANENTES

- **Définition**

Shantz (1927) propose une classification «fonctionnelle des taxons des régions arides vis-à-vis de la sécheresse, en distinguant des catégories telles que les plantes évitant la sécheresse, les plantes tolérant ou résistant à la sécheresse, *etc*. (*cf.* Floret & Pontanier, 1982). Evenari *et al.* (1975) ont proposé une classification permettant d'attribuer un critère fonctionnel aux espèces en relation avec l'adaptation des espèces aux conditions climatiques sévères. En effet, ces auteurs suggèrent, comme l'avait évoqué Noy-Meir en 1973, de classer les espèces des zones arides en deux catégories : les espèces «arido-passives» ne présentant pas d'activité photosynthétique durant la période sèche et les espèces «arido-actives» maintenant une activité, même réduite, durant cette période.

Plus précisément, la notion d'arido-passive recouvre :
- les annuelles dont le cycle se déroulent le plus souvent au cours de la période humide et qui passent la période sèche à l'état de graines;
- les pérennes qui perdent leurs feuilles durant la période sèche et dont certaines ont leurs réserves sous forme de rhizomes ou de bulbes.

Les espèces arido-actives, qui fonctionnent, parfois au ralenti, également, durant la saison sèche. sont représentées au sens de Noy-Meir (1973) par :
- les 'pérennes fluctuantes' qui perdent leurs feuilles ou les remplacent par de plus petites en période de sécheresse (dimorphisme foliaire saisonnier souligné par Orshan, 1964) ;
- les 'pérennes permanentes' présentant les caractéristiques classiques des xérophytes.

La distinction entre ces deux types d'espèces n'est pas toujours évidente. Floret et Pontanier ont montré que «rares sont les espèces qui ne présentent pas un dimorphisme saisonnier lié à la sécheresse» (1982). Ils ont notamment illustré leur propos par une expérience mettant en évidence la perte de poids considérable, durant la période sèche, de la partie verte d'espèces considérées pourtant comme de « vraies » xérophytes.
Ces mêmes auteurs discernent une troisième catégorie, celle des phréatophytes, terme désignant des ligneux dont l'appareil racinaire est développé en profondeur, vers les nappes souterraines et qui de ce fait échappent à la réduction saisonnière forte de la disponibilité en eau..

- **Objectif**

Il s'agit de classer les espèces suivant les deux catégories qui permettent d'interpréter, sur le plan fonctionnel, leur réponse à la sécheresse.

- **Description méthode :**

Valorisation des acquis :

Il faut rechercher l'ensemble des listes d'espèces établies par le passé sur l'observatoire pour avoir une situation de référence et classer les espèces suivant les deux critères : arido-actives / arido-passives.
L'utilisation des données quantitatives existantes améliore la qualité de cet indicateur.

Données à récolter et méthode de mesure :

L'utilisation de la liste exhaustive des espèces végétales caractérisant l'observatoire est requise (cf. fiche technique n°2).

Il est recommandé d'utiliser également les données quantitatives collectées (fréquences spécifiques : cf. fiche technique n°3).

Traitement des données :

Le traitement des données se fait de la manière suivante :

- comparaison diachronique des proportions (test du χ^2) d'espèces arido-actives et arido-passives anciennes et actuelles, lorsque des données anciennes sont disponibles ;
- comparaison des proportions d'espèces arido-actives et arido-passives le long de gradients environnementaux ;
- analyse de la variance de la fréquence spécifique des types de Noy-Meir le long de gradients environnementaux ou au cours du temps sur une station permanente.

- **Intérêt et limites**

Ce descripteur permet d'évaluer le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes en réponse aux conditions climatiques.

Cependant, un diagnostic ne peut être correctement établi à partir de la seule liste des espèces : il est souhaitable de joindre un critère quantitatif à l'étude d'un indicateur qualitatif de la végétation.

Par ailleurs, des projets de recherche spécifiques doivent être menés afin de tester la qualité arido-active ou arido-passive des espèces : études fonctionnelles écophysiologiques notamment (ex : étude du potentiel hydrique de la sève dans les végétaux...).
D'autres voies de recherche sont explorées : « stratégies de Grimm », « groupes fonctionnels ». On trouvera un exemple d'application dans le Document Technique ROSELT/OSS CT4

- **Evaluation de la méthode**

	EVALUATION
Pas de temps	Quadriennal (diagnostic)
Faisabilité	Besoin d'un botaniste expérimenté
Rentabilité	Rapide et facile à mettre en œuvre si l'information est disponible
Coût	Faible
Pertinence pour ROSELT/OSS	**Grande**
Mise en œuvre nécessaire pour ROSELT/OSS	**Recommandée**

- **Perspectives d'utilisation ou de généralisation dans le cadre de ROSELT/OSS**

L'utilisation de cette classification semble pertinente pour l'ensemble des observatoires ROSELT/OSS.
L'évolution des pourcentages des types de Noy-Meir dans différents observatoires pourrait être comparée. Ceci permettrait d'observer les tendances dans des observatoires comparables (sous-région Afrique du Nord).

Exemples d'application de la méthode (Jauffret, 2001).

Exemple 1 : La comparaison deux à deux des pourcentages (test du χ^2 de Pearson) des espèces arido-actives et arido-passives le long d'un gradient de diminution du recouvrement total pérenne sur l'observatoire de Menzel Habib a montré que les différences étaient non significatives :

- séquence à *Anarrhinum brevifolium* : $\chi^2_{(5)} = 0{,}14$, $p < 3{,}84$ N.S
- séquence à *Rhanterium suaveolens* : $\chi^2_{(5)} = 0{,}01$, $p < 3{,}84$ N.S.

CONCLUSION

Ce document contribue à l'harmonisation des méthodes de collecte et de traitement des données. Les fiches techniques, présentées ici, ne prétendent pas à l'exhaustivité et le réseau ROSELT/OSS devra s'en inspirer pour l'enrichir progressivement et élaborer des fiches complémentaires. A titre d'exemple, il serait souhaitable d'élaborer des fiches techniques concernant les traitements des images satellitaires (calcul d'indices, classifications…).

BIBLIOGRAPHIE

Ambouta J.-M. K., Valentin C. & Laverdière M.R., 1996 – Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7 : 269-275.

Barbault R., 1995 – *Ecologie des peuplements. Structure et dynamique de la biodiversité*. 2ème tirage, Masson. 273 p.

Benzecri J.P., 1964 – Sur l'analyse factorielle des proximités. *Pub. Inst. Statist. Univ. Paris*, 14 (1) : 165-180.

Bernus E., 1980 – Les causes de la désertification : les thèses en présence. *In* : La sécheresse au Sahel. *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, 18 (3-4) : 159-165.

Bonin G., 1978 – *Contribution à la connaissance de la végétation de l'Apennin centro-méridional*. Thèse d'Etat, Univ. Aix-Marseille III, 320 p. + annexes.

Bonin G. & Roux M., 1978 – Utilisation de l'analyse factorielle des correspondances dans l'étude phytosociologique de quelques pelouses de l'Apennin lucano-calabrais. *Acta Oecologia / Oecologia Plantarum*, 13 : 121-128.

Bonin G. & Tatoni T., 1990 – Réflexions sur l'apport de l'analyse factorielle des correspondances dans l'étude des communautés végétales et leur environnement. *Ecologia Mediterranea*, 16 : 403-414.

Braun-Blanquet J., 1952. Phytosociologie appliquée. 1. *Comm. S.I.G.M.A*. 116 : 156-161.

Casenave A. & Valentin C., 1989 – *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Orstom, Paris, 229 p.

Cody M.L. Towards a theory of continental species diversities: bird distribution over Mediterranean habitat gradients. *In*: M.L. Cody & J.M. Diamond (eds.), *Ecology and Evolution of Communities*. Harvard Univ. Press, Cambridge: 214-257.

Cordier B., 1965 – *Sur l'analyse factorielle des correspondances*. Thèse 3ème cycle, Univ. Rennes : 66 p.

Daget P. & Poissonet J., 1971 - Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. *Annales d'Agronomie*, 22 : 5-41.

Escadafal R., 1979 – *Contribution à l'étude des ressources en sols de la plaine des Ababsas*. Etude n° 542 , Direction des sols, Tunis, 49 p. + annexes (19. p), 2 cartes h.t. couleur.

Escadafal R. 1989 – *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et pat télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie).* Etudes et Thèses, éditions ORSTOM, Paris.

Evenari M., Schulze E.D., Kappen L., Buschbom V. & Lange O.L., 1975 – Adaptative mechanism in desert plants. In : Vernberg F.J. (Ed), *Physiological Adaptation to the Environments* : 111-129.

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

Floret C. & Pontanier R., 1982 – *L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement.* Travaux et documents de l'ORSTOM n°150, Paris. p. 544.

Frontier S. & Pichod-Viale D., 1991 – *Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution.* Collection d'Ecologie 21, Masson, Paris. 392 p.

Grouzis M., 1982 – *Méthodes d'étude des pâturages naturels*. Documents ORSTOM, Ouagadougou.

Hanafi A., 2000 – *Cartographie des systèmes écologiques et étude de leur évolution depuis 1978 dans la région de Menzel Habib (Gabès).* Mémoire DEA, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis. 103 p. + annexes.

Hébrard J.P. & Loisel R., 1991 – Contribution à l'étude de l'effet du débroussaillement sur le peuplement muscinal au niveau de quelques formations arborescentes et arbustives, dans les Bouches-du-Rhône (France méridionale). *Cryptogamie, Bryologie, Lichénol*ogie, 12 (1) : 1-29.

Hill M.O., 1973 – Diversity and eveness : a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54 (2) : 427-432.

Huston M.A., 1994. Biological diversity – *The coexistence of species on changing landscapes*. Cambridge University Press, Cambridge.
Jauffret S., 2001 - *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien*. PhD, Thèse doct. Univ. Aix-Marseille III, 365 p.
Jauffret S. & Véla E., 2000 – Passé, présent et devenir des la végétation des paysages pastoraux au Sud et au Nord de la Méditerranée. L'exemple du sud tunisien et du sud-est français. Actes du séminaire international MEDENPOP 2000 : *Population rurale et environnement en contexte bioclimatique méditerranéen*, 25-28 octobre 2000, Jerba, Tunisie
Lebreton J.-D., Chessel D., Richardot-Coulet M. & Yoccoz N., 1988 – L'analyse des relations espèces-milieu par l'analyse canonique des correspondances. II. – Variables de milieu qualitatives. *Acta Oecologica* 9 (2) : 137-151.
Legendre L. & Legendre P., 1984a – *Ecologie numérique. 1. Le traitement multiple des données écologiques*. Collection d'écologie 12, 2ème édition, Masson, Paris. 260 p.
Legendre L. & Legendre P., 1984b – *Ecologie numérique. 2. La structure des données écologiques*. Collection d'écologie 13, 2ème édition, Masson, Paris. 260 p.
Le Houérou H.-N. & Ionesco T., 1973. *Appétabilité des espèces végétales de la Tunisie steppique*. Tunis, FAO, Projets TUN:71/525 et TUN/69/001, 68 p., ronéo.
Le Houérou H.-N., 1995 – Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertisation. *CIHEAM Options Méditerranéennes*, Série B, N°10, Montpellier, France, 396 p.
Médail F., 1996 – *Structuration de la biodiversité de peuplements végétaux méditerranéens en situation d'isolement*. Thèse Doct. Sci. (PhD), Univ. Aix-Marseille III : 290 p. + annexes.
Noy-Meir I.m 1973 – Desert ecosystems : environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics,* 4 : 25-51.
Orshan G., 1964 – Seasonal dimorphism of desert and Mediterranean Chamaephytes and their significance as a factor in their water economy. *In : The water relations of plants*. Oxford Blackwell Sci. Publ. : 206-222.
Ozenda P., 1977 - *Flore du Sahara*. Deuxième édition, CNRS, Paris, France, 622 pp.
Raunkiaer C., 1934 – *The life-forms of plants and statistical plant geography*. Clarendon Press, Oxford.
Roux G & Roux M., 1967 – A propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie. *Revue de statistique appliquée*, 15 (2) : 59-72.
Shannon C.E. & Weaver W., 1949 - *The mathematical theory of communication*. Urbana, Chicago Ill., Univ. Illinois Press, 125 p.
Shantz H.L.m 1927 – Drought resistance and soil moisture. *Ecology*, 8 : 145.
Simpson E.H., 1949 - Measurement of diversity. *Nature*, 163 : 688.
Tatoni Th., 1992 – *Evolution post-culturale des agrosystèmes de terrasses en Provence calcaire. Phytoécologie et impact humain*. Thèse Doct. Sci., Univ. de Provence, Aix-Marseille I. 157 p. + annexes.
Telahigue T., Floret C. & Le Floc'h E., 1987 – Succession post-culturale en zone aride de Tunisie. *Oecologia Plantarum*, 8 (22) : 45-58.
Ter Braak C.J.F., 1986 – Canonical correspondance analysis : a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67 (5) : 1167-1179.
Ter Braak C.J.F., 1987 – The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondance analysis. *Vegetatio*, 69 : 69-77.
Vezza A., 1990 – *La déprise rurale dans les pays du Ventoux : dynamique de la végétation en relation avec les sols*. Thèse Doct. Sci. (PhD), Univ. Aix-Marseille III : 143 p. + annexes.
Vidal P., 1982 – *Les pelouses de la Drôme : caractéristiques floristiques, relations avec les facteurs géopédologiques et physiographiques, essai de zonage en vue de leur aménagement*. Thèse 3ème cycle, Univ. Aix-Marseille III : 78 p. + annexes.
Waechter P., 1982. *Etude des relations entre les animaux domestiques et la végétation dans les steppes du sud de la Tunisie. Implications pastorales*. Thèse Doct. Sci., Univ. de Montpellier II, France. 293 p.

Whittaker R.H., 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30: 279-338.
Whittaker R.H., 1972 – Evolution and measurements of species diversity. *Taxon*, 21 : 213-251.
Wilson M.V. & Shmida A., 1984. Measuring beta diversity with presence-absence data. *Journal of Ecology* 72: 1055-1064.

ANNEXE 1 : TRAITEMENTS STATISTIQUES USUELS EN ECOLOGIE

- **Analyse de variance (ANOVA)**

  L'analyse de variance a pour but de comparer la moyenne des groupes formés par le ou les critères de classification soumis à l'analyse. Elle permet de répondre à la question suivante : y a-t-il de la variabilité significative parmi ces moyennes, pour chacun des critères de classification considérés ? (Legendre & Legendre 1984ab). Les données suivent généralement une distribution normale (test de Normalité).

  Cependant dans certains cas la normalité n'a pu être vérifiée. Il est donc indispensable de recourir à la statistique non-paramétrique. En outre, la robustesse de ces tests est indiscutable. L'analyse de variance non-paramétrique peut être adoptée pour l'ensemble des traitements statistiques. De plus ce choix est conforté quand le nombre d'observations ($\leq$ 5 observations par station) est faible et qu'il faut mettre en évidence toute relation monotone (croissante ou décroissante) entre les descripteurs quantitatifs. Il s'agira de déterminer si les moyennes de chaque descripteur varient significativement.

  Pour comparer plusieurs modalités, le test de Kruskal-Wallis (analyse de variance à un critère) est usuellement employé. La comparaison entre deux modalités fait appel au test de Mann & Whitney (Falissard, 1998). Ces deux tests sont préconisés lors des différents calculs statistiques d'analyse de variance. Le seuil critique α au-delà duquel on observe une différence significative entre les moyennes est fixé et codé comme suit : différence non significative = NS $p>0,05$; différence significative = * $p\leq 0,05$; ** $p\leq 0,01$; *** $p\leq 0,001$.

- **Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)**

  L'analyse factorielle des correspondances mise au point par Benzecri (1964) et Cordier (1965) s'applique aux données qualitatives et s'avère largement utilisée dans tous les compartiments de l'écologie (Bonin & Tatoni,1990). En particulier de très nombreux auteurs l'ont employée en phytoécologie, où son intérêt n'est plus à démontrer (Bonin, 1978 ; Bonin & Roux ,1978 ; Vidal, 1982 ; Vezza, 1990 ; Tatoni,1992 ; Médail,1996 ; Hanafi, 2000). Sans entrer dans le détail de cette méthode d'analyse multivariée, rappelons simplement qu'elle a pour objet la recherche des affinités pouvant exister entre les différents cortèges floristiques relevés au sein d'un même ensemble (Hébrard et Loisel,1991). La représentation graphique de la projection des relevés et des taxons sur les axes factoriels permettra de déterminer le gradient écologique sous-tendant chacun des axes.

- **Analyse Factorielle des Correspondances sur Variables Instrumentales (AFCVI)**
  L'Analyse Factorielle des Correspondances sur Variables Instrumentales ou Analyse Canoniques des Correspondances ACC consiste à mettre en corrélation un ensemble de descripteurs (variables explicatives dites instrumentales) avec un groupe de variables à expliquer (tableau de contingence). Il s'agit, par exemple, de coupler un tableau de contingence espèces x relevés avec un tableau espèces x variables (les variables peuvent être quantitatives ou qualitatives). Dans le cas de variables qualitatives, le tableau espèces x variables sera disjoncté en plusieurs modalités. L'AFCVI a pour but de trouver la corrélation maximale entre les combinaisons linéaires (variables canoniques) de deux groupes de descripteurs. Elle permet de reconnaître la part de variance du tableau de contingence expliqué par le tableau de variables disjonctées (Ter Braak,1986 et 1987 ; Lebreton *et al,.* 1988).

- **Analyse Factorielle des Correspondances Multivariée (AFCM)**

  Une Analyse Factorielle des Correspondances Multivariée consiste à faire une AFC sur un tableau de données qualitatives disjonctées en modalités.

- **Analyse en Composantes Principales (ACP)**

  L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique qui permet de faire la synthèse de l'information contenue dans un grand nombre de variables. Les composantes principales sont de nouvelles variables, indépendantes, combinaison linéaire des variables initiales, possédant une variance maximum. Ces nouvelles variables permettent parfois d'éclairer les mécanismes intimes mis en œuvre par la genèse des données. Elles permettent aussi d'utiliser dans de meilleures conditions des techniques multivariées classiques comme la régression linéaire. Les composantes principales autorisent en outre la représentation graphique de grands tableaux de données trop complexes à décrire par les méthodes graphiques habituelles. C'est incontestablement cette dernière propriété qui est à l'origine de leur large utilisation. En toute rigueur, une ACP ne nécessite aucune condition de validité et s'applique à des variables quantitatives (Falissard 1998).

- **Comparaisons de pourcentage : test du χ^2 de Pearson**

  Ce test est réalisé à partir des effectifs et n'est valable que si les effectifs calculés sont supérieurs ou égaux à cinq dans le tableau de contingence de données. Les effectifs théoriques sont obtenus en multipliant le total d'une ligne au total d'une colonne puis en divisant par le total général. Le degré de liberté se calcule par le produit du nombre de ligne moins 1 par le nombre de colonne moins 1. Pour un degré de liberté de 1, lorsque le $\chi 2$ calculé est inférieur au seuil critique α (0,05) = 3,841, les deux pourcentages ne sont pas significativement différents. Lorsque le $\chi 2$ calculé est supérieur à α, les deux pourcentages sont significativement différents. Le test est d'autant plus significatif que le seuil critique α est plus petit ou que le $\chi 2$ est plus grand (Falissard 1998).

- **Le produit matriciel**

  Ce calcul consiste à multiplier deux matrices B et C. Le produit de ces deux matrices est donc une nouvelle matrice qui a le même nombre de ligne que B et le même nombre de colonnes que C. L'élément dij dans la ligne i et la colonne j de la matrice résultat est le produit scalaire de la ligne i de B avec la colonne j de C (Legendre & Legendre,1984).

ROSELT/OSS
(Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme)
Centre IRD Roselt/OSS - BP 64501
F - 34394 Montpellier Cedex 5
Tél. : (33) 04 67 16 31 91
Fax : (33) 04 67 16 31 99
www.roselt-oss.teledetection.fr

OSS
(Observatoire du Sahara et du Sahel)
bd de l'Environnement BP 31 - 1080 Tunis Cedex - Tunisie
Tél. : (216) 71 80 65 22 ou (216) 71 80 68 91
www.unesco.org/oss/

IRD
(Institut de Recherche pour le Développement)
Chef de file de la coordination régionale ROSELT/OSS
Département Milieux et Environnement
213, rue Lafayette F- 75480 Paris Cedex 10
www.ird.fr