

## DIMINUTION ALTITUDINALE DU STRESS HYDRIQUE ESTIVAL DE LA VEGETATION MEDITERRANEENNE D'APRES LE NDVI

**V. CESARI ET A. DOUGUEDROIT**

*Institut de Géographie, Université de Provence (Aix-Marseille I)  
29 Av. Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence cedex 1, France  
Tel : 33 4 42 95 38 71 - Fax : 33 4 42 64 01 58  
[v-cesari@up.univ-aix.fr](mailto:v-cesari@up.univ-aix.fr) — [annick.douguedroit@up.univ-aix.fr](mailto:annick.douguedroit@up.univ-aix.fr)*

### Résumé

A partir des NDVI décennaires (NOAA-AVHRR14) d'avril à septembre, de 1995 à 1997, croisés avec deux cartes des groupements végétaux et des altitudes dans un SIG, nous avons obtenu quatre groupements végétaux aux signaux satellitaires significativement différents en Basse Provence calcaire : deux forêts et deux garrigues. Leurs NDVI décennaires augmentent tous avec l'altitude. Les corrélations significatives et élevées entre les NDVI décennaires de chaque groupement végétal et les altitudes correspondantes ont permis de calculer les gradients estivaux pour 100 mètres de chaque groupement végétal.

### Abstract

With decade NDVI (NOAA-AVHRR14), from April to September from 1995 to 1997, crossed with two maps of the vegetation and the altitudes in a GIS, four plant communities with significant satellite signals have been obtained in the limestone Lower Provence : two forests and two garrigues. All their NDVI increase with altitude. Significant and high correlations between the decade NDVI of each plant community and corresponding altitudes allowed to compute summer NDVI gradients per 100 meters for each plant community.

**Mots-clés :** Végétation méditerranéenne, NDVI, Altitude, Stress hydrique estival.

**Keywords :** Mediterranean vegetation, NDVI, Altitude, Summer water stress

### Introduction

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation index) selon la formule 
$$NDVI = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1}$$
 où  $C_2$  et  $C_1$  représentent les réflectances dans les canaux 1 et 2 de NOAA (Rouse et al. 1974), est un indicateur satellitaire de l'activité photosynthétique de la végétation (Tucker 1979, Choudhury 1987). Il est donc sensible aux facteurs climatiques limitants de cette activité : radiation solaire (dont dépend la température) et disponibilité en eau (Cihlar et al. 1991). En région méditerranéenne il dépend, au printemps, de l'accroissement de la radiation solaire (et des températures associées) et de l'augmentation de la biomasse de la végétation annuelle ou décidue, minoritaire dans ce milieu par rapport à la végétation sempervirente; en été, il baisse sous l'influence du stress hydrique (Gouyet et al. 1989, Proper-Laget et al. 1998).

Notre objectif est ici d'étudier la relation entre le NDVI des groupements végétaux méditerranéens de la Basse-Provence Calcaire (**figure 1**) et l'altitude en saison chaude. Cette relation n'a pas été étudiée systématiquement jusqu'à présent.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Données

Nous avons utilisé les données quotidiennes NOAA-AVHRR 14 d'avril à septembre, de 1995 à 1997, sur l'ensemble de la région étudiée. Les images quotidiennes venant du JRC (Joint Research Center d'Ispra, Italie) étaient prétraitées par le logiciel SPACE II. Elles avaient subi des corrections

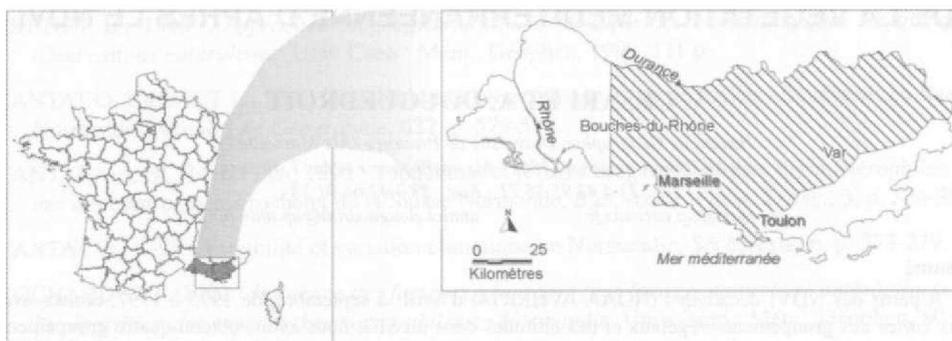


Figure 1 : Localisation de l'aire d'étude.

radiométriques, géométriques et atmosphériques mais posaient des problèmes de navigation. Elles ont été toutes recalées dans l'espace à l'aide de points d'amer côtiers.

Le NDVI a été calculé en utilisant la formule de Rouse et al. (1974), appliquée aux réflectances des canaux 1 et 2 de NOAA-A VHRR 14. Les images utilisées, aux pixels de  $1.1 \text{ km}^2$  de résolution sont le résultat de synthèses décennales élaborées selon la méthode M V C (Maximum Value Composite, Holben 1986) qui minimise la perte de signal due aux effets des angles de visée et de la contamination nuageuse. On a ainsi obtenu 3 décades par mois, d'avril à septembre, pendant 3 ans, de 1995 à 1997. Mais certaines d'entre elles, trouageuses, en particulier sur le département du Var, ont été éliminées du travail.

La carte des groupements végétaux a été réalisée d'après les cartes de la végétation au 1/200 000 de la zone d'étude (Ozenda 1951, 1956, 1972, Molinier et Lavagne 1976). Une fois numérisée en mode raster à partir des fonds de cartes papier puis recalée et géo-référencée, elle a été actualisée d'après les types de couverts des cartes de l'Inventaire Forestier National (IFN 1983, 1986 et 1999). Ce croisement a permis de distinguer 10 groupements végétaux. La résolution de la carte ainsi obtenue a été dégradée jusqu'à celle de NOAA. L'algorithme déplace, sur la carte de végétation d'une résolution initiale de 250m, une fenêtre de résolution NOAA et calcule les proportions de chaque groupement végétal il ne retient que les pixels contenant un seul groupement.

La carte des altitudes est également une carte raster, obtenue à partir du modèle numérique de terrain Visual DEM dont la résolution a été dégradée par krigeage jusqu'à celle des scènes NOAA.

## 1.2. Traitements

Les trois types de cartes, NDVI décennales, groupements végétaux et altitudes ont été géoréférencées dans un SIG (IDRISI). Ce logiciel en mode raster est bien adapté à l'étude de données de télédétection. Le croisement des couches a permis de lier entre eux pixels de NDVI, de types de couvert et de localisation altitudinale.

La première étape a consisté dans la recherche de groupements végétaux aux signatures satellitaires significativement différentes à toutes les altitudes à l'échelle de la résolution NOAA, soit  $1.1 \text{ km}^2$ . Nous avons comparé les différences entre les moyennes des NDVI des groupements végétaux par tranches d'altitude de 200 m afin de déterminer quelles signatures étaient significativement différentes au regard du type de groupement et de l'altitude simultanément selon le test de comparaison des moyennes.

Ensuite nous avons recherché la relation entre les groupements végétaux ainsi retenus et l'altitude. Sur des séries de NDVI classées par altitude croissante, nous avons effectué un lissage en moyennant par groupe de 20 les valeurs de NDVI et les altitudes correspondantes. Nous avons ensuite calculé par décade les corrélations entre ces NDVI et altitudes lissés. Seules les décades pour lesquelles les coef-

ficients de détermination étaient supérieurs à 50% ont été retenues. Elles ont servi à calculer une série de gradients décennaires du NDVI pour 100m pour chaque groupement végétal entre avril et septembre, de 1995 à 1997. Il a ensuite été recherché s'il existait un gradient unique.

## 2. Groupements végétaux au signal satellitaire significativement différents

En Basse-Provence calcaire nous avons d'emblée éliminé les forêts localisées dans le Haut-Var, de pins sylvestres et landes non méditerranéennes et de surface réduite.

Pour chacun des dix groupements végétaux initiaux, nous avons groupé les pixels de NDVI de chaque décade par tranches de 200m d'altitude. Nous avons ainsi obtenu le NDVI moyen et la distribution du NDVI de chaque groupement, pour chaque décade et par tranche de 200 m d'altitude (**figure 2**). La comparaison entre les moyennes obtenues pour chaque groupement dans chaque tranche altitudinale a amené des fusions entre groupements initiaux aux NDVI moyens non significativement différents (Cesari et Douguédroit, 2001). Seulement 4 groupements végétaux sont retenus : chênaie pubescente, chênaie verte, garrigue à pin d'Alep et garrigues à romarin ou à chêne kermès. On peut noter que l'étude faite précédemment au niveau régional, sans tenir compte de l'altitude, avait conclu à l'existence de 5 groupements; s'ajoutaient aux précédents les forêts mixtes de chênes et pins (Cesari et Douguédroit, 1999, Cesari, 2001). La prise en compte de l'altitude a amené à différencier celles-ci entre forêts mixtes avec chênes pubescents ou chênes verts et les a rapproché des forêts non mixtes, le caractère altitudinal devenant prépondérant du fait de la différence d'altitude générale entre les deux types de forêts de chênes et donc de forêts mixtes associées.

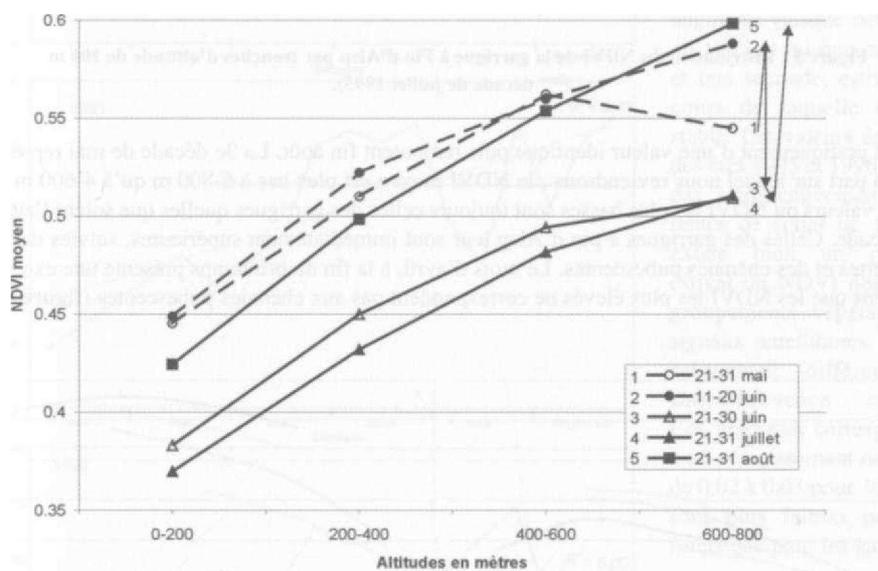


Figure 2 : NDVI moyens de la garrigue à Pin d'Alep par tranches d'altitude de 200 m pendant 5 décades de la saison chaude (1995).



Figure 2 : NDVI moyens de la garrigue à Pin d'Alep par tranches d'altitude de 200 m pendant 5 décades de la saison chaude (1995).

Tout au long des trois saisons chaudes étudiées, les valeurs du NDVI de chacun des quatre groupements végétaux augmentent avec l'altitude, avec des évolutions temporelles parallèles selon l'altitude (**figure 3**). On voit ainsi que la garrigue à pin d'Alep a, début juin, un NDVI moyen de 0.44 entre 0 et 200m d'altitude qui croît jusqu'à 0.6 à 6-800 m. Fin juin et en juillet, toutes les valeurs du NDVI

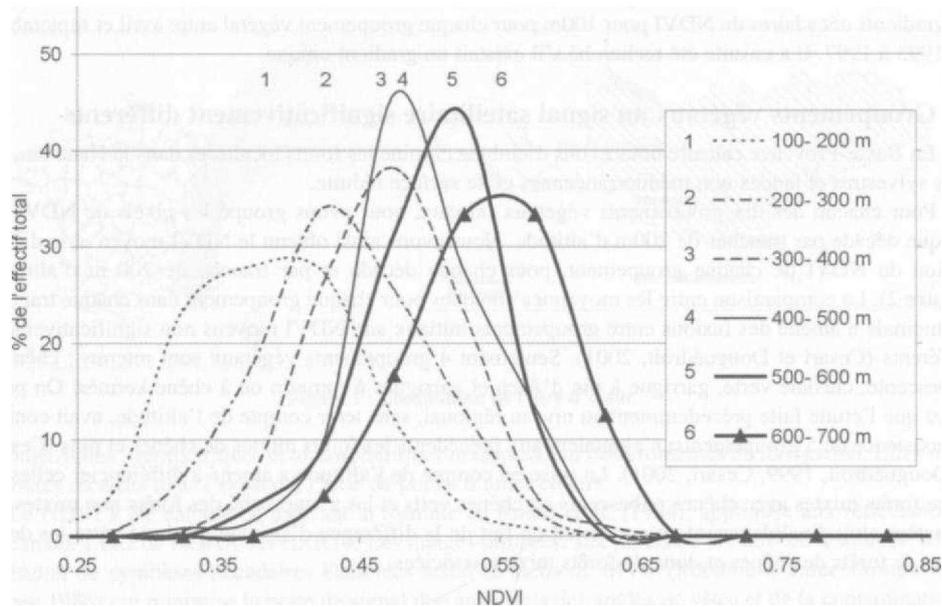


Figure 3 : Distribution du NDVI de la garrigue à Pin d'Alep par tranches d'altitude de 100 m (3<sup>e</sup> m<sup>e</sup> décade de juillet 1995).

baissent pratiquement d'une valeur identique puis remontent fin août. La 3<sup>e</sup> décade de mai représente un cas à part sur lequel nous reviendrons : le NDVI moyen est plus bas à 6-800 m qu'à 4-600 m.

Les valeurs du NDVI les plus basses sont toujours celles des garrigues quelles que soient l'altitude et la décade. Celles des garrigues à pin d'Alep leur sont immédiatement supérieures, suivies des chênaies vertes et des chênaies pubescentes. Le mois d'avril, à la fin du printemps présente une exception en ce sens que les NDVI les plus élevés ne correspondent pas aux chênaies pubescentes (figure 4).

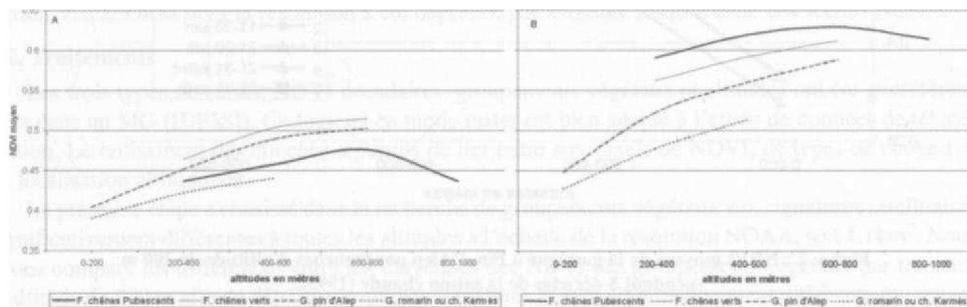


Figure 4 : NDVI moyens par tranches d'altitude de 200m des 4 principaux groupements végétaux durant deux décades A : Printemps (lière décade d'avril 1995) B : été (2<sup>e</sup>me décade de juin 1995).

1 : Forêt de chênes pubescents, 2 : Forêt de chênes verts, 3 : Garrigue à pin d'Alep, 4 : Garrigue à romarin ou chêne kermès.

### 3. Gradients altitudinaux du NDVI

Les corrélations calculées par décade entre les séries lissées des valeurs de NDVI de chacun des quatre groupements végétaux et les altitudes moyennes correspondantes ont un coefficient de corrélation significatif généralement élevé. La variance exprimée est comprise majoritairement entre 75 et 80% et peut dépasser 90%. Les chênaies pubescentes présentent un cas particulier : les coefficients de corrélation ne sont pas significatifs en avril quelle que soit l'année. Nous y reviendrons plus loin.

Pour chaque décade où les coefficients de détermination précédents sont significatifs, un gradient de NDVI par 100m a été calculé par régression linéaire entre NDVI et altitudes d'avril à septembre pendant les années 1995 à 1997. Les gradients obtenus varient selon les décades mais présentent tous

deux situations différentes selon les années, 1995 et 1996 d'une part et 1997 d'autre part (figure 5). Dans le premier cas le gradient augmente significativement de début avril à fin septembre, à la différence du cas de 1997. Mais en 1995 et 1996, on peut aussi diviser la période en deux, la première pendant laquelle le gradient augmente (jusque début juin en 1995 et mi-mai en 1996) et une seconde, estivale, au cours de laquelle il reste stable. Les valeurs de NDVI des étés 1995 et 1996 ne sont pas significativement différentes de celles de 1997. Il existe bien un gradient estival du NDVI des quatre groupements végétaux aux signaux satellitaires significativement différents en Basse-Provence calcaire. Ces gradients correspondent à un accroissement de NDVI de 0.02 à 0.03 pour 100m; ils sont plus faibles pour les forêts que pour les garrigues.

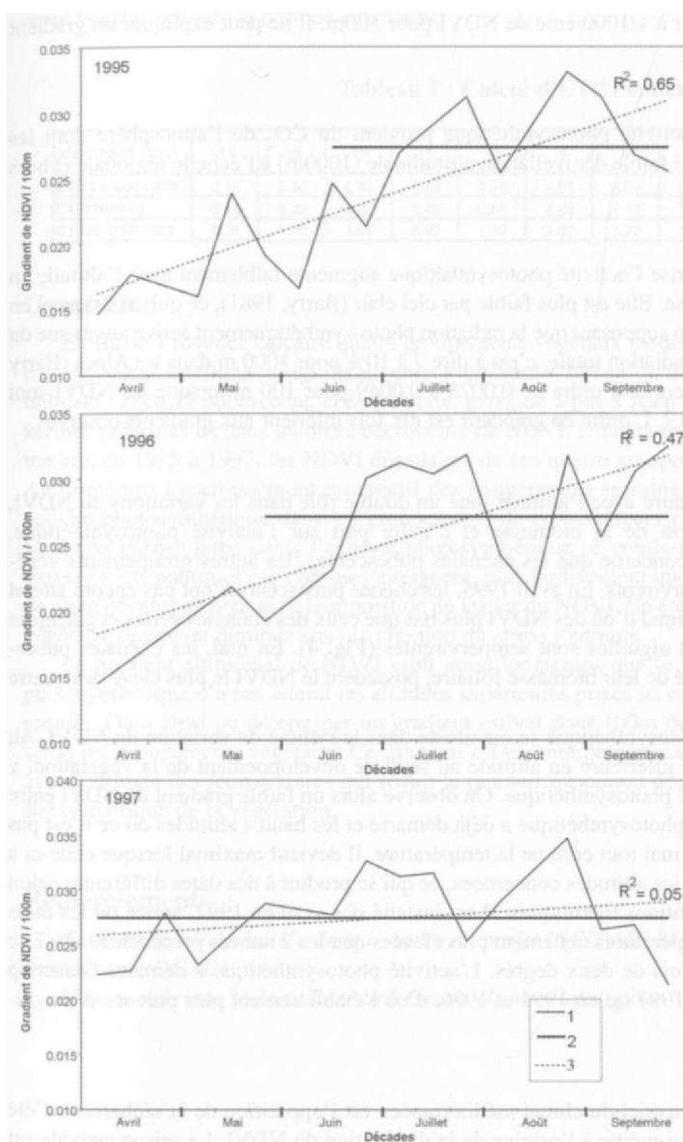


Figure 5 : Evolution temporelle des gradients décennaux par 100m de NDVI de la garrigue à romarin ou à chêne Kermès (1995-1997)

- 1 : Gradients décennaux,
- 2 : Gradient moyen estival et
- 3 : Tendances des gradients décennaux.

#### 4. Facteurs de la diminution du NDVI avec l'altitude

Les facteurs peuvent avoir deux origines, soit le signal satellitaire, soit l'activité photosynthétique de la végétation conditionnée par trois facteurs, la disponibilité en carbone et en eau, en présence de radiation solaire.

##### 4.1. Le signal satellitaire

Une expérience appliquée aux données LANDSAT TM a été conduite pour calculer l'effet de la traversée de l'atmosphère sur le signal de NDVI (Teillet et Santer 1991). Différentes simulations ont permis d'estimer la différence de NDVI entre 0 et 1200m à 0.0092 soit un gradient de NDVI de 0.00077 pour 100 m (Cesari 2001). L'ordre de grandeur de l'effet de la traversée de l'atmosphère sur le gradient de NDVI est inférieur à 1/1000ième de NDVI pour 100m. Il ne peut expliquer un gradient de NDVI de l'ordre de 1/100.

##### 4.2. Le carbone

Le carbone nécessaire à l'activité photosynthétique provient du  $C O_2$  de l'atmosphère dont les quantités ne varient pas sur une si faible dénivellation altitudinale (1000m) à l'échelle régionale et hors de tout milieu urbanisé.

##### 4.3. La radiation solaire

La radiation solaire qui favorise l'activité photosynthétique augmente faiblement avec l'altitude en fonction de la couverture nuageuse. Elle est plus faible par ciel clair (Barry, 1981), ce qui est fréquent en été en région méditerranéenne. En supposant que la radiation photo-synthétiquement active augmente du même ordre de grandeur que la radiation totale, c'est à dire 7 à 10% pour 1000 m dans les Alpes (Barry 1981), on obtient un accroissement de l'ordre de 0.0028 à 0.0049 pour 100 m lorsque les NDVI sont compris comme ici entre 0.4 et 0.7. L'ordre de grandeur est dix fois inférieur aux gradients observés.

##### 4.4. La température

La diminution de la température avec l'altitude joue un double rôle dans les variations du NDVI, d'une part sur le développement de la biomasse et d'autre part sur l'activité photosynthétique. L'influence sur la biomasse ne concerne que les chênaies pubescentes, les autres groupements végétaux méditerranéens étant sempervirents. En avril 1995, les chênes pubescents n'ont pas encore atteint leur développement foliaire maximal d'où des NDVI plus bas que ceux des chênaies vertes et garrigues à pin d'Alep dont les feuilles et aiguilles sont sempervirentes (**Fig. 4**). En mai, les chênaies pubescentes, une fois acquise la totalité de leur biomasse foliaire, possèdent le NDVI le plus élevé des quatre groupements végétaux.

L'influence sur l'activité photosynthétique se manifeste dans le rythme de variation du NDVI. Au printemps, la faible température inférieure en altitude au seuil de développement de la végétation, y ralentit le démarrage de l'activité photosynthétique. On observe alors un faible gradient de NDVI entre les basses altitudes où l'activité photosynthétique a déjà démarré et les hautes altitudes où ce n'est pas le cas. Ce gradient augmente en mai tout comme la température. Il devient maximal lorsque celle-ci a suffisamment augmenté à toutes les altitudes concernées, ce qui se produit à des dates différentes selon les années, en fonction des conditions thermiques. Il est installé dès avril en 1997, année où les mois de février et mars ont eu des températures nettement plus élevées que les 2 années précédentes. Au Luc (Var), la différence est chaque fois de deux degrés. L'activité photosynthétique a démarré beaucoup plus tôt à toutes les altitudes en 1997 qu'en 1995 et 1996, d'où l'établissement plus précoce d'un gradient stable.

##### 4.5. La disponibilité en eau

Pour la végétation le trait essentiel du climat méditerranéen est l'apparition de la sécheresse d'été génératrice du stress hydrique, lui-même à l'origine de la diminution du NDVI. La saison estivale est

la période d'une baisse générale du NDVI en Basse-Provence calcaire (Cesari et Douguédroit 1999, Cesari 2001). Il s'agit d'une diminution générale des valeurs avec persistance d'une augmentation avec l'altitude pour les quatre groupements végétaux (**figure 3**). En effet le stress hydrique diminue parallèlement avec l'altitude à cause de la diminution du déficit hydrique.

L'E TP Penman a été calculée pour le Luc (80 m), au pas de temps quotidien pour les dix jours de la seconde décade de juillet 1997 et déduite 1000 m d'altitude plus haut, soit à 1080 m, en faisant varier la seule température supposant le vent constant et sachant qu'il n'a pas plu (Tabl. 1). La différence est de 11 mm pour cette seule décade. Puisque le pouvoir évaporant de l'atmosphère diminue avec l'altitude, l'écart avec la quantité d'eau disponible diminue. On a bien une réduction du déficit hydrique et donc du stress hydrique. C'est la raison de l'augmentation du ND VI avec l'altitude de chaque groupement végétal pendant la période végétative.

**Tableau 1 : Calcul d'ETP Penman**

| Jour (Juillet 1977) | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19    | 20   | Ecart          |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|----------------|
| E TP Le Luc (80m)   | 6.10 | 6.35 | 6.97 | 6.46 | 7.78 | 5.51 | 8.34 | 9.29 | 10.29 | 7.46 | Décadaire (mm) |
| ETP(1080m)          | 5.14 | 5.33 | 5.89 | 5.49 | 6.60 | 4.69 | 7.12 | 7.98 | 8.93  | 6.39 |                |
| ETP80-ETP1080       | 0.96 | 1.02 | 1.08 | 0.97 | 1.19 | 0.83 | 1.22 | 1.31 | 1.36  | 1.07 |                |

11.01

## Conclusion

En Basse-Provence calcaire quatre groupements végétaux méditerranéens ont des ND VI montrant des signatures satellitaires significativement différentes lorsqu'on tient compte de leur répartition altitudinale : chênaie pubescente, chênaie verte, garrigue à pin d'Alep et garrigues à romarin ou à chêne kermès présentés ici dans un ordre décroissant de N D V I . Pendant toute la saison chaude, d'avril à septembre, de 1995 à 1997, les ND VI décadaires de ces quatre groupements augmentent avec l'altitude. Au printemps l'accroissement progressif des températures entraîne celui du NDVI, reflet de la seule activité photosynthétique dans les groupements de type sempervirent. En revanche, dans le cas des forêts de chênes pubescents l'activité photosynthétique se combine à un développement de la biomasse ; c'est pourquoi ces chênaies atteignent, plus tardivement que le reste de la végétation, le stade de plein développement avec leur position de leader du NDVI. En été, le ND VI des quatre groupements végétaux stagne ou diminue sous la pression du stress hydrique.

Le gradient altitudinal de NDVI croît aussi longtemps que le plein développement de l'activité photosynthétique n'a pas atteint les altitudes supérieures prises ici en considération puis reste constant ensuite. On a ainsi pu déterminer un gradient estival pour 100m du NDVI de l'ordre de 0.02 à 0.03 selon les groupements végétaux. Ce gradient est essentiellement causé par la diminution progressive avec l'altitude des températures qui réduit le pouvoir évaporant de l'atmosphère et par conséquent le stress hydrique de la végétation.

## Remerciements

*Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet INFLAME ENV4-98-07000 financé par l'Union Européenne (DGXII).*

*Nous remercions le Joint Research Centre (Ispra- Italie) pour le jeu de données NOAA.*

### Bibliographie

- BARRY R.G., 1981: *Mountain weather and climate*, Ed. Methuen, 313 p.
- CESARI V. et DOUGUEDROIT A., 2001 : Le signal satellital NOAA-AVHRR du stress hydrique estival de la végétation méditerranéenne, *Puhl. Assoc. Intern. Climatol.*, 14, p.371-378.
- CESARI V., 2002 : *Interprétation par SIG du signal satellitaire estival de la végétation méditerranéenne (Basse Provence calcaire)*, Thèse de doctorat, 194 p.
- CESARI V. and DOUGUEDROIT A., 1999 : Influence of altitude on Mediterranean plant communities NDVI with NOAA - AVHRR 14 data, *Proceed. Delft Symposium*, p. 110-114.
- CHOUDHURY B.J., 1987 : Relationship between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis, *Remote Sensing of Environment*, 22, p. 209-233.
- CIHLAR J., ST LAURENT L. and DYER J.A., 1991 : Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables, *Remote Sensing of Environment*, 35, p. 279-298.
- GOUYET J.F., KING C. et MALON J.F, 1989 : Apport des données satellitaires NOAA-AVHRR dans le suivi de la végétation forestière, *Rapport BRGM*, 37 p.
- HOLBEN B.N., 1986: Characteristics of Maximum Value Composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7, p. 1417-1434.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN), 1983 : Carte des types de formations végétales du Varau 1/200000, *ed. IFN*.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN), 1986 : Carte des types de formations végétales des Bouches-du-Rhône au 1/200000, *ed. IFN*.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN), 1999 : Carte des types de formations végétales du Varau 1/200000, *ed. IFN*
- MOLINIER R. et LAVAGNE A., 1976 : Carte de la végétation au 1/200000 de Marseille, *Ed. CNRS*.
- OZENDA, 1951: Carte de la végétation au 1/200000 de Antibes, *Ed. CNRS*.
- OZENDA, 1956: Carte de la végétation au 1/200000 de Digne, *Ed. CNRS*.
- OZENDA, 1972: Carte de la végétation au 1/200000 de Nice, *Ed. CNRS*.
- PROSPER-LAGET V, DOUGUEDROIT A. and GUINOT J.P., 1998 : A satellite index of risk of forest fire occurrence in summer in the Mediterranean area, *Internat. J. of Wildland fire*, 8, p. 173-182.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W. and HARLAN J.C. (1974) : *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*, NASA/ GSFC, Type II, Final report, Greenbelt, MD, 371 p.
- TUCKER C.J., 1979 : Red and Photographic Infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8, p. 127-150.