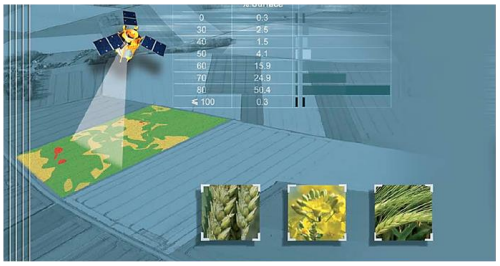


KIT Cycle terminal	Fiche SVT	Ref: CT-3-S	V2 Juin 2017

Enjeux planétaires contemporains

L'activité photosynthétique et son analyse par télédétection

Pistes d'apprentissage

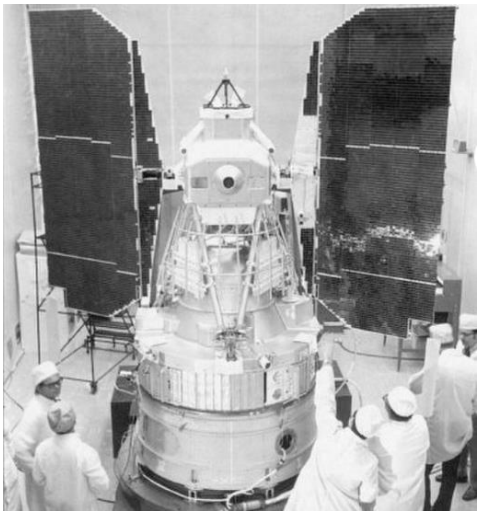
- Activité photosynthétique
- Identification de la signature spectrale de la végétation
- Détecter le changement des comportements spectraux de la végétation en fonction de différents états physiologiques et phytosanitaires

Introduction

Les végétaux sont des organismes dits autotrophes. Ils utilisent la lumière solaire et des éléments inorganiques (H_2O et CO_2) pour produire des glucides afin de se développer. Ce processus qui permet aux plantes de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique est la photosynthèse.

L'analyse de l'activité photosynthétique des plantes permet de décrire leur état de santé. En effet, plus l'activité photosynthétique est importante plus le végétal produira de la masse verte, et donc dans un contexte d'agriculture, une récolte potentiellement abondante.

Les satellites d'observation civils existent depuis 1972, si nous considérons le satellite Landsat-1 (premier d'une famille de 8 satellites) lancé en juillet 1972.



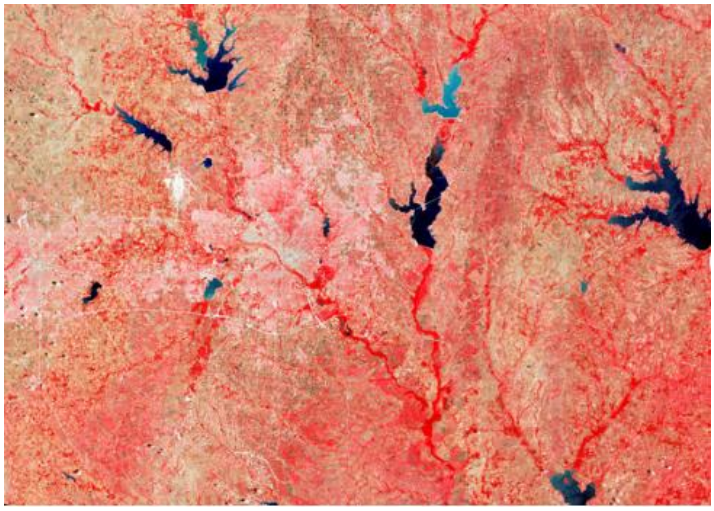
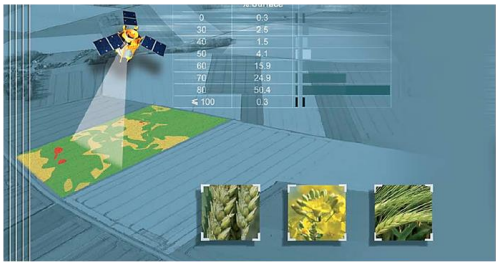


Figure 1: satellite Landsat-1 en cours d'intégration et première image « officielle » du 25/7/1972



Depuis ce premier lancement, les satellites d'observation se sont multipliés dans l'espace, proposant la mise à disposition d'images de plus en plus nombreuses, précises et adaptées à différents usages, dont le suivi de la végétation.

En 1977, la France décide de lancer un programme de fabrication de satellites d'observation. Le programme SPOT est réalisé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), en collaboration avec la Belgique et la Suède. Le 22 février 1986, la fusée Ariane-1 met sur une orbite à 832km d'altitude le premier satellite français d'observation, nomme SPOT-1.

Ce satellite offre des images dans 4 canaux différents :

- Le canal panchromatique → 0,50–0,73 µm à une résolution de 10m
- Les canaux multi spectraux à des résolutions de 20m :
  - La bande 1 vert → 500–590 nm
  - La bande 2 rouge → 610–680 nm
  - La bande 3 Proche Infra Rouge (PIR) → 780–890 nm

Depuis, de très nombreux satellites ont été lancés et mis en orbite (famille SPOT de 1 à 7, satellites Pléiades 1A et 1B, satellites SENTINEL etc …) offrant de plus en plus d'images, une meilleure résolution, une plus grande précision etc … Par ailleurs, les applications qui peuvent être faites à partir des images se sont développées et améliorées.

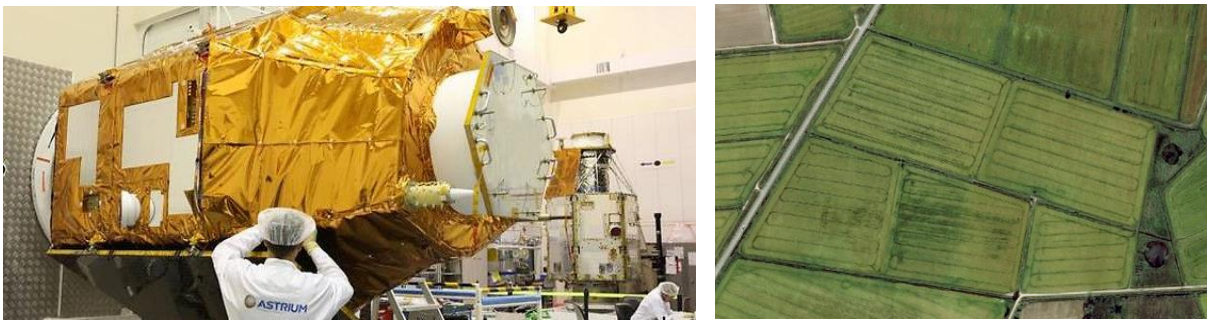
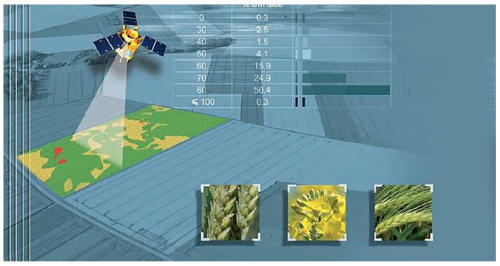


Figure 2: Satellite Pléiades-1A en cours d'intégration et extrait d'image Pléiades

Le lien entre télédétection et photosynthèse remonte au développement des premières applications de l'usage des images satellites. En effet, l'analyse des images satellites, en utilisant certaines bandes spectrales, donne de précieuses indications sur l'activité photosynthétique, et donc sur le niveau de « stress » de la culture. Le stress est défini comme la réponse d'un organisme à une agression extérieure (maladie) ou à une évolution de l'environnement (sécheresse par exemple).

Tout comme nous, les végétaux peuvent subir un stress, par exemple suite à une carence en azote ou en eau, à l'infestation par des agents nuisibles ou à l'importance des mauvaises herbes qui entrent en compétition avec les cultures, les empêchant d'absorber les éléments nutritifs dont elles ont besoin.



L'activité photosynthétique et les pigments foliaires

Cette fiche ne décrit pas précisément l'activité photosynthétique mais illustre comment cette activité est monitorée depuis l'espace par utilisation d'images satellites.

Le processus de photosynthèse se réalise au sein des chloroplastes grâce à la présence de pigments foliaires : les chlorophylles et les caroténoïdes. Ces pigments foliaires absorbent l'énergie lumineuse fournie naturellement par le soleil pour les plantes et sont capables de transformer cette énergie lumineuse en énergie chimique. Cette énergie chimique permet à la plante de transformer des molécules d'eau et de dioxyde de carbone qu'elle puise dans son environnement (sol et air) en glucides et oxygène. **La production glucides correspond à la croissance de la plante**.

Cinq types de chlorophylles sont présents dans les chloroplastes de la plante, mais les **chlorophylles a et b** sont prépondérantes. Par ailleurs, il existe aussi d'autres pigments nommés **caroténoïdes**, dans les chloroplastes.

Ces pigments absorbent une partie de l'énergie lumineuse fournie par le soleil et en réfléchissent une autre partie. Il est important de comprendre que ce que nous voyons avec nos yeux humains, correspond à la partie de la lumière réfléchie par un objet, dans le spectre visible.

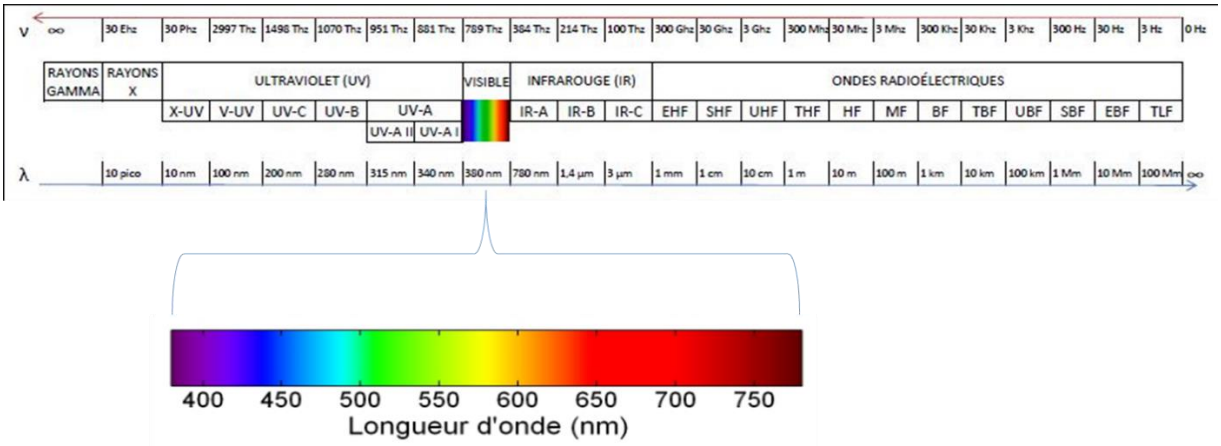
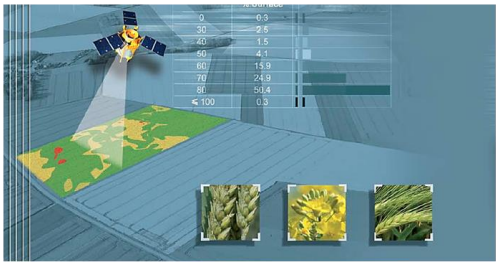


Figure 3: Spectre électromagnétique et domaine visible

Dans l'illustration ci-dessus, on peut voir que le spectre visible correspond à une toute petite partie du spectre électromagnétique, compris par convention entre 380 et 780 nm.

Dans le cas d'une feuille d'un végétal quelconque, éclairée par la lumière du soleil, la couleur que notre œil d'observateur perçoit correspond à la partie réfléchie de spectre de la lumière solaire, et appartenant au domaine visible.



Ainsi nous voyons généralement au printemps et en été, les feuilles vertes, car les autres longueurs d'ondes de la lumière solaire sont absorbées par la plante et principalement par les molécules de chlorophylle et de caroténoïdes.

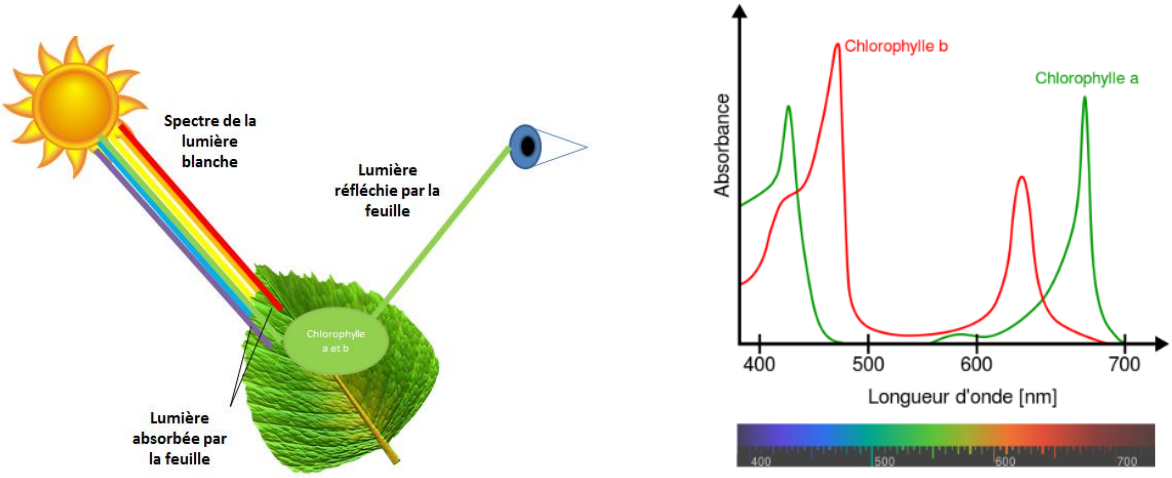


Figure 4: Spectre d'absorption des chlorophylles a et b et schéma d'absorption/réflexion de la lumière solaire

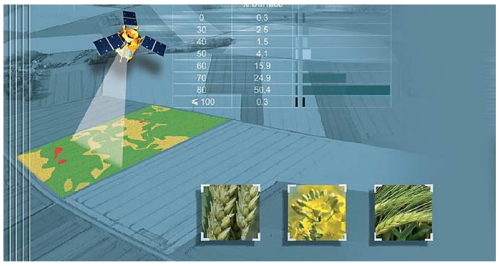
L'illustration ci-dessus montre que nous « voyons » les feuilles vertes quand elles sont éclairées par le soleil, car les chlorophylles présentes absorbent très largement les longueurs d'ondes comprises entre 380 et 500 nm d'une part et 600 à 780 nm d'autre part. En revanche, il n'y a quasiment aucune absorption, donc une grande réflexion entre 500 et 600 nm, ce qui correspond à la couleur verte.

En résumé, une végétation visuellement très « verte » signifie que les chlorophylles a et b absorbent beaucoup des autres longueurs d'ondes, donc que l'activité photosynthétique est très forte, donc que la culture est en bonne santé (bonne absorption de l'eau, pas de maladies, pas de concurrence avec d'autres espèces végétales, bonne absorption des éléments minéraux).

Les molécules de caroténoïdes sont différentes, car elles absorbent majoritairement entre 380 et 550 nm (donc du bleu au vert) et réfléchissent donc de 550 à 780 nm, c'est-à-dire dans l'orange et le rouge. Cependant, quantitativement, les caroténoïdes sont beaucoup moins présents que les chlorophylles au printemps et en été, elles sont donc « masquées » par celles-ci.

Si une feuille est stressée (voir définition en introduction) ou si elle ne reçoit plus une quantité d'énergie solaire lumineuse suffisante, l'activité des chlorophylles a et b va diminuer. Cette diminution va se traduire par une baisse de la production de masse verte végétale (donc potentiellement, une baisse de la quantité récoltée par l'agriculteur) et par un changement de couleur.

En effet, les chlorophylles a et b diminuent et les caroténoïdes deviennent alors majoritaires, réfléchissant la couleur rouge/orangée. C'est le phénomène naturel de changement de couleur des



feuilles auquel nous assistons en automne. Si un changement de couleur est détecté en dehors de cette période, ce sera une indication précieuse du stress des végétaux, constituant une alerte pour l'agriculteur.

La surveillance par télédétection

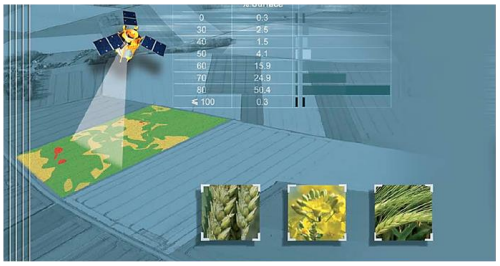
Le paragraphe ci-dessus démontre qu'il suffit de regarder avec nos yeux, dans le domaine visible, la couleur des feuilles des végétaux, pour déterminer si l'activité chlorophyllienne est correcte et donc si la photosynthèse se déroule normalement, gage de la croissance des plantes et d'une bonne récolte.

Avant l'arrivée des satellites et de leurs capteurs spécifiques, c'est ce que tous les agriculteurs faisaient. Après l'arrivée des satellites et de leurs images, une « photographie » de l'ensemble d'une parcelle vue depuis 800km d'altitude offre une aide précieuse pour déterminer les zones plus ou moins vigoureuses, donc plus ou moins « vertes ». C'est plus facile et plus pratique que de parcourir des kilomètres avec ses yeux à 1,8m de hauteur !

L'exploitation raisonnée des agrosystèmes est devenue un enjeu écologique et économique majeur. L'observation de l'activité photosynthétique d'une couverture végétale depuis l'espace permet d'obtenir des informations souvent difficiles à obtenir autrement. La modulation des intrants (engrais, pesticides) sur une parcelle agricole pour optimiser la production tout en diminuant la pollution des sols et des nappes phréatiques est une problématique trouvant sa réponse dans l'observation de la végétation depuis l'espace.

Les chlorophylles a et b, principaux pigments foliaires, servent d'indicateur pour évaluer le rendement potentiel d'une culture et pour détecter des carences nutritionnelles. Les caroténoïdes renseignent sur les conditions de développement de la végétation (stade de développement) et permettent de détecter les maladies.

Figure 5: Extrait d'une image satellite présentant quelques zones hétérogènes à l'intérieur d'une parcelle



L'observation en dehors du spectre visible

L'œil humain n'est pas le meilleur outil pour évaluer l'activité chlorophyllienne, et donc l'état de santé des végétaux. En effet, d'une part la végétation réfléchie aussi la lumière solaire dans des longueurs d'ondes qui n'appartiennent pas au domaine visible (380 – 780 nm), d'autre part il existe des capteurs de lumières qui sont sensibles en dehors du domaine visible.

Comme présenté en introduction, les capteurs embarqués sur les satellites d'observation sont sensibles à différentes longueurs d'ondes. Pour SPOT-6 et 7 par exemple (légèrement différent de SPOT-1) :

- La bande 1 bleu → 450 – 520 nm
- La bande 2 vert → 530 – 590 nm
- La bande 3 rouge → 625 – 695 nm
- La bande Proche Infra Rouge (PIR) → 760 – 890 nm

La bande PIR (760 – 890 nm) est particulièrement intéressante car elle se situe en dehors du spectre visible, elle donc sensible à des longueurs d'ondes que notre œil humain ne peut pas percevoir. PIR signifie Proche Infra Rouge, que l'on retrouve sous l'acronyme NIR (Near Infra Red) en anglais.

Par ailleurs, la végétation réfléchit très fortement la lumière solaire au-delà de 780 nm. La réflectance (la proportion de lumière réfléchie par la surface d'un matériau) dans le domaine du proche infra-rouge (entre 780 et 1100 nm) est proportionnelle à la vigueur et à la santé de la plante.

La bande PIR est donc utilisée et apporte des informations précieuses, afin d'évaluer l'état de santé des végétaux qui composent une culture.

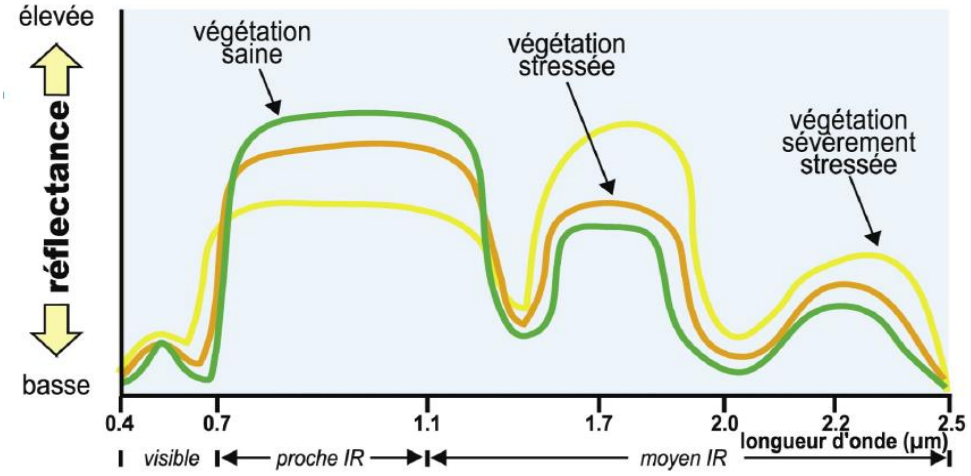
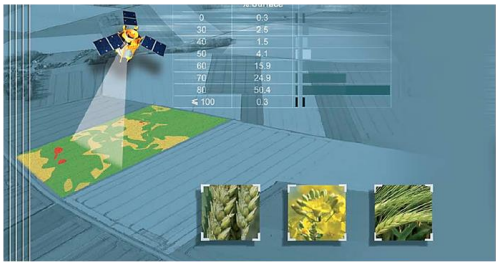


Figure 6: Effet de l'état sanitaire de la végétation sur la réflectance à différentes longueurs d'ondes



Un cas particulier, l'indice NDVI

NDVI signifie « Normalized Difference Vegetation Index », que l'on traduit par «Indice de végétation par différence normalisé ». Cette indice consiste à calculer, à partir d'une formule spécifique, un indice à partir des valeurs de réflectance des objets présents à la surface du sol (végétaux, sols nus, bâtiments, eaux etc…) dans les domaines spectraux du rouge et du proche infra-rouge. De nombreux logiciels de traitement d'image permettent d'effectuer le calcul de cet indice, dont le logiciel TerreImage proposé par le CNES.

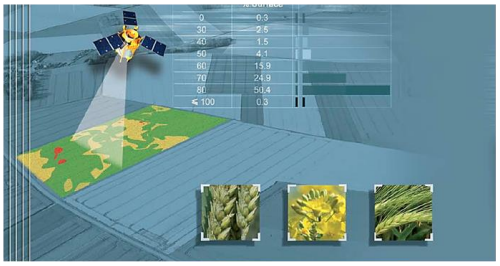
Une image satellite est composée de très nombreux pixels, qui sont les éléments unitaires constitutifs de l'image, et qui portent chacun d'entre eux plusieurs valeurs numériques comprises entre 0 et 255. Chacun de ces pixels reçoit donc un chiffre correspond à la quantité de lumière solaire qu'il a réfléchi, pour chaque bande spectrale enregistrée par les capteurs du satellite.

Une image satellite est donc, bien avant d'être une jolie illustration sur nos écrans ou sur Google Earth, un fichier numérique composé de millions de valeurs. Chaque valeur décrit une quantité de lumière captée par le satellite (donc réfléchie par la surface de la Terre).

Comme il peut y avoir plusieurs valeurs pour un même pixel (autant de valeurs qu'il existe de bandes spectrales), il est possible d'effectuer des opérations (addition, soustraction, quotient, produit) entre ces valeurs. Les scientifiques ont donc mis au point un indice, le fameux indice NDVI qui consiste, pour chaque pixel, à combiner les valeurs enregistrées dans les deux bandes suivantes : La bande 3 rouge (625 – 695 nm) et la bande PIR (760 – 890 nm)

Ainsi, l'indice NDVI est calculé selon la formule : NDVI = (PIR – bande rouge) / (PIR + bande rouge)

Figure 7: Image satellite traitée par calcul NDVI et représentation en 3 classes de couleur selon l'indice de végétation



A l'issue de ce calcul, pour chaque pixel d'une image (une image SPOT 7 mesure 60x60km, les pixels multispectraux sont de 6m, donc l'image comporte 10000x10000 pixels = 100M de pixels), on obtient une valeur NDVI issue de la combinaison ci-dessus.

Cet indice est un excellent indicateur de la vigueur et de la quantité de la végétation, car comme vu précédemment, il est sensible à la lumière réfléchie dans les longueurs d'ondes complémentaires à celles qui correspondent à l'activité chlorophyllienne, elle-même engendrant la photosynthèse et donc la production de matière végétale.

Cet indice permet de faire ressortir les différences de densité végétative au sein d'une parcelle et renseigne sur la santé de la culture. Il est compris entre -1 et 1. Plus l'index NDVI se rapproche de 1 plus l'activité chlorophyllienne est importante. Sur le terrain, cela se traduit par une densité végétative plus importante et par une bonne santé des plantes.

La cave des vignerons de Buzet, dans le Lot-et-Garonne (47)

Les vignerons dans ce secteur sont engagés dans une démarche d'agriculture raisonnée et durable.

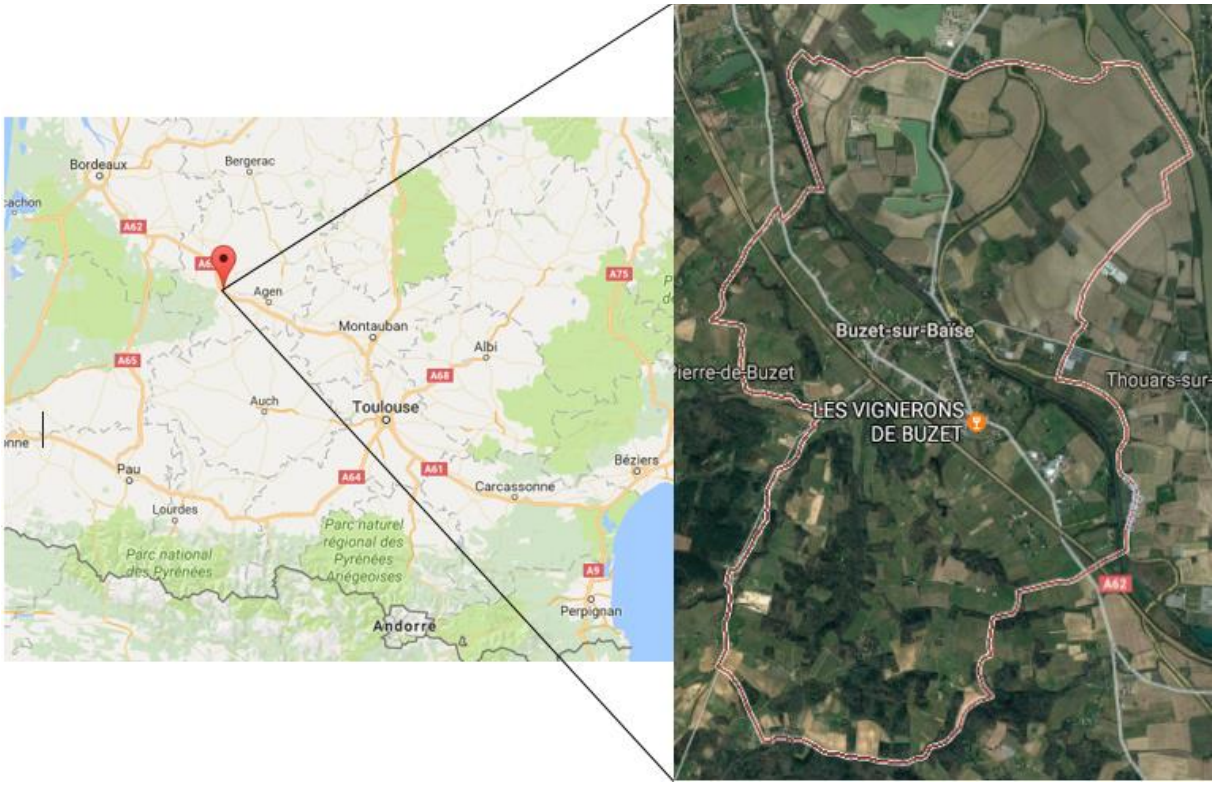
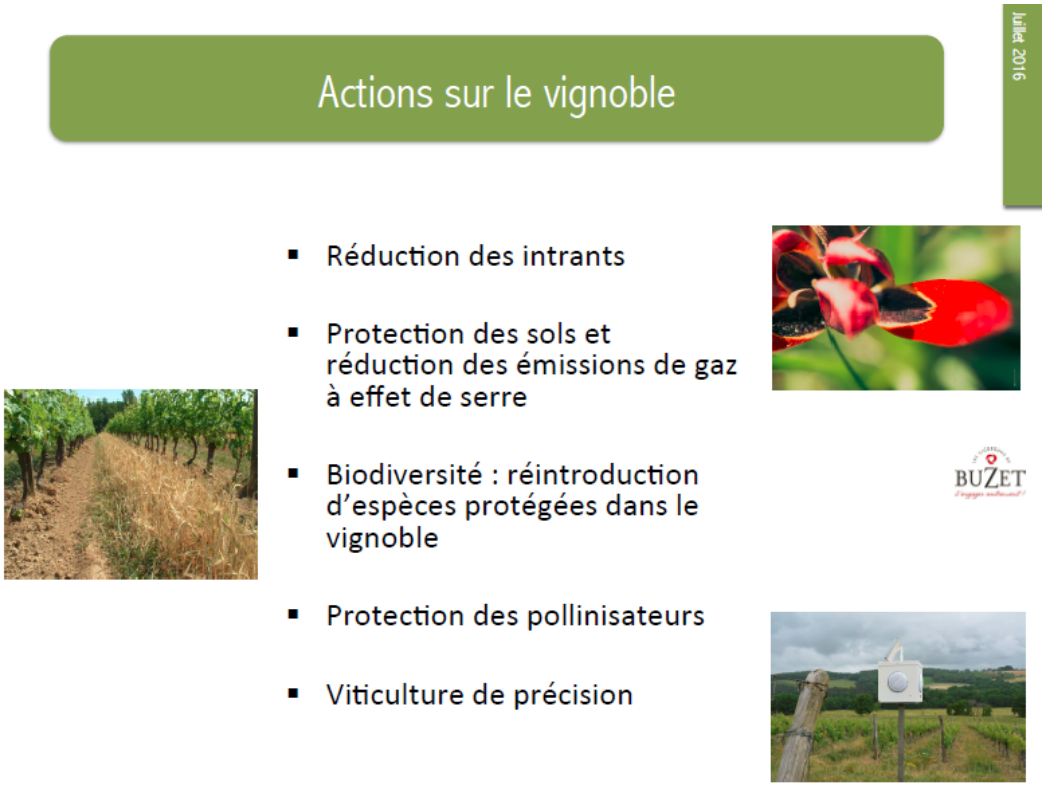
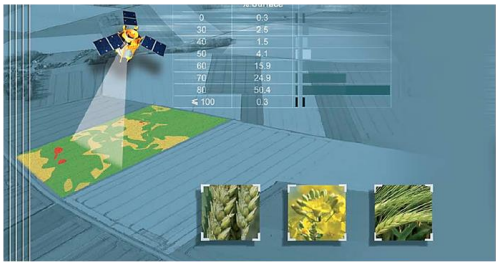


Figure 8: Situation géographique de Buzet-sur-Baïse

Figure 9: Vignoble de Buzet (47)

Cette démarche se traduit, sur le vignoble par les actions décrites dans cette infographie (source : Les vignerons de Buzet)



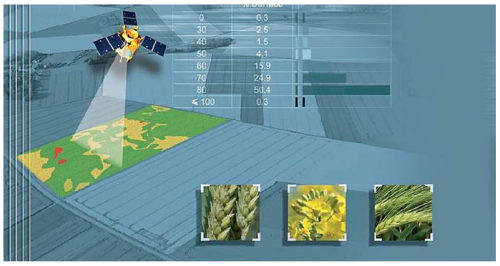


Grâce à l'utilisation de capteurs (installés sur des satellites ou des drones), les viticulteurs engagés dans cette démarche bénéficient de conseils et de cartes, directement réalisés à partir de l'analyse NDVI telle que décrite dans ce document.

Il s'agit donc de l'utilisation réelle et actuelle, des technologies spatiales en lien avec l'agriculture de précision, au niveau du vignoble de Buzet.

La compréhension de la photosynthèse, du rôle et des spécificités des chlorophylles a et b, la connaissance de la télédétection et de la constitution des images satellites, représentent donc les technologies qui sont utilisés au quotidien, pour gérer un vignoble dans un contexte de développement durable.

Selon un calendrier défini entre ingénieurs agronomes, viticulteurs et spécialistes de la télédétection, des images sont acquises au-dessus des parcelles de vigne et sont analysés selon la méthode décrite. Une fois que les résultats sont calculés, ils sont mis en forme et livrés sous forme de cartes, de fichiers numériques à intégrer dans les GPS des tracteurs, aux exploitants. Celui-ci dispose donc d'une vue synthétique de ses parcelles, mettant en évidence les endroits précis qui peuvent nécessiter un traitement ou une analyse plus fine.



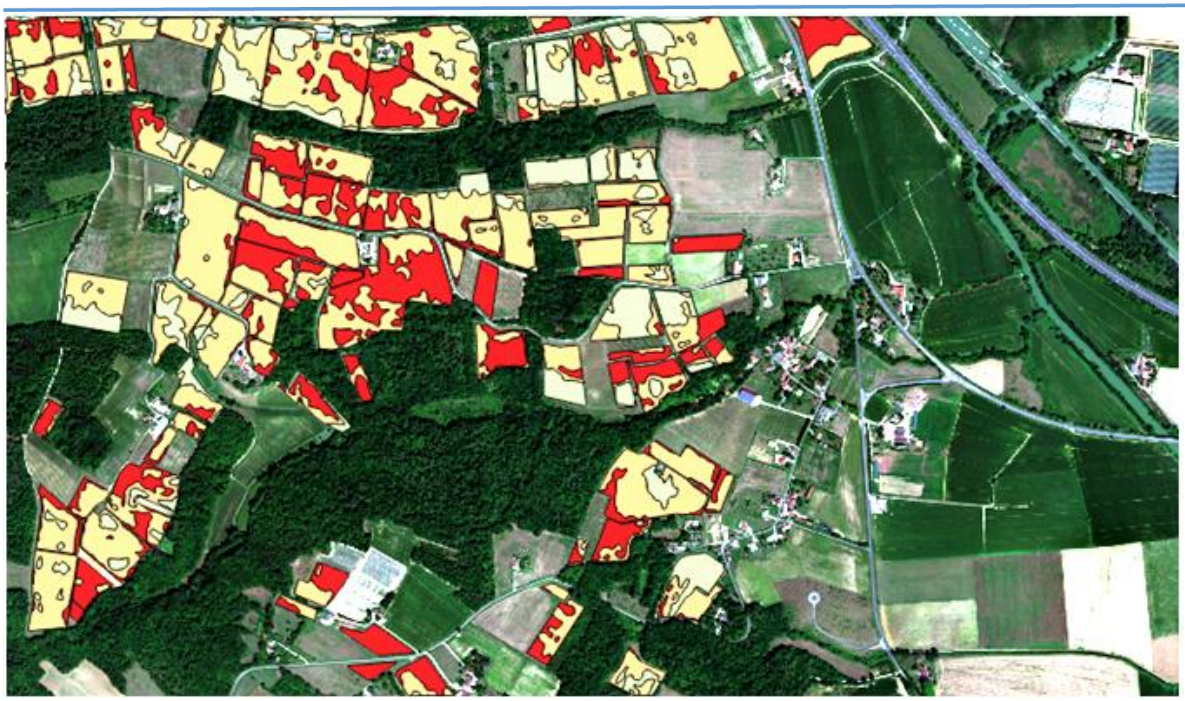
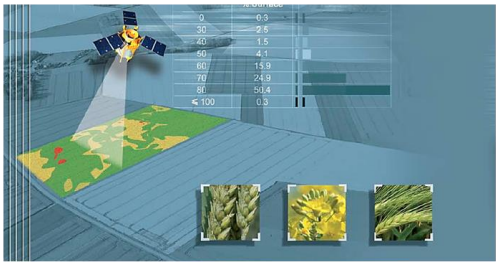


Figure 10: Image satellite (en haut) et carte de vigueur de la vigne (en bas) sur le domaine viticole « Cave des vignerons de Buzet »

Sources et pour aller plus loin :

- DOUMARD F., 2014. Suivre l'activité photosynthétique des végétaux depuis l'espace ? Une piste fluorescente. Séminaire national EIST. Disponible sur : http://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/minisites/EIST/20467/FD_EIST_14.05.14.pdf
- *http://eoedu.belspo.be/fr/profs/photosynthese.pdf*
- HAN S., COINTAULT F., 2013. Détection précoce de maladies sur feuilles par traitement d'images. AgroSup Dijon. Disponible sur : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00829402/document. (Consulté le 24/04/17).
- Frédéric Cointault « Détection de foyers infectieux de flavescence dorée par imagerie par drone », Les Rencontres du Végétal, 8ème édition, Session Sciences et technologies de l'information et de la communication au service du végétal spécialisé, 12-13 janvier 2015, Angers.
- COINTAULT F., 2015. Des drones pour surveiller les foyers infectieux de la flavescence dorée de la vigne. INRA Science et Impact. Disponible sur : http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Biologie-vegetale/Tous-les-dossiers/flavescence-doree-de-la-vigne/flavescence-doree-de-la-vigne/(key)/5 (consulté le 24/04/17).
- *http://www.earthlab-galaxy.com/thematiques/terre-2/*
- *https://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/viticulture-raisonnee-biologique-biodynamique.php*