

APPORT DES ARCHIVES SPOT WORLD HERITAGE À L'ESTIMATION DES TENDANCES DE PRODUCTIVITÉ DES PRAIRIES DE MONTAGNE

PA Herrault¹, J. Tamayo¹, D. Ertlen¹

¹: Laboratoire Image Ville Environnement (LIVE), Strasbourg, France

Résumé

Le suivi à long terme de la productivité des prairies de montagne est crucial pour comprendre les réponses de ces écosystèmes au réchauffement climatique. Bien que les archives Landsat soient la référence pour ces analyses, leur fréquence temporelle (16 jours) et la couverture nuageuse fréquente limitent la capture du maximum annuel de NDVI ($NDVI_{max}$). Cette étude quantifie l'apport des archives SPOT World Heritage (SWH, de l'ordre de 2.6 scènes par an en moyenne sur la période étudiée) pour densifier les séries temporelles sur les prairies de montagne des Hautes Vosges (1985-2015). À l'aide d'une modélisation additive généralisée (GAM) sur 927 575 observations (pixels), nous démontrons que les différences d'estimations du pic de productivité ($NDVI_{max}$) sont pilotées par la disponibilité temporelle de SPOT (ΔDOY), permettant de corriger les sous-estimations systématiques de Landsat. Si la cohérence globale entre les deux stratégies est forte ($R^2 = 0,83$), l'ajout de SPOT modifie la significativité statistique des tendances pour 8 % des pixels, particulièrement dans les zones à dynamique rapide. Ces résultats soulignent l'importance des archives historiques pour stabiliser les diagnostics climatiques en zone de montagne et appellent à une généralisation des produits corrigés pour limiter les biais de calibration.

Mots clés : NDVI, SPOT World Heritage, Prairies de montagne, Séries temporelles, GAM

Abstract

Long-term monitoring of mountain grassland productivity is crucial for understanding these ecosystem's responses to climate change. Although Landsat archives are the commonly used archives for such analyses, their temporal frequency (16 days) and frequent cloud cover often complicate the capture of the annual peak vegetation ($NDVI_{max}$). This study quantifies the contribution of SPOT World Heritage (SWH, in average 2.6 satellite scenes per year over the studied period,) archives to densify time series over the Vosges Mountains Grasslands (1985-2015). Using a Generalized Additive Model (GAM) on 927,575 observations, we demonstrate that differences in peak productivity ($NDVI_{max}$) are dependent on the temporal availability of SPOT observations (ΔDOY), correcting systematic Landsat underestimations. While the overall consistency between Landsat-only and combined strategies (Landsat + SPOT) is high ($R^2 = 0.83$), the addition of SPOT modifies the statistical significance of trends for 8% of pixels, particularly in areas with rapid dynamics. These results highlight the importance of historical archives for stabilizing climate diagnostics in mountain areas and advocate for the wider availability of Level-2A products to mitigate calibration biases.

Keywords : NDVI, SPOT World Heritage, Mountain grassland, Time series,

1. INTRODUCTION

Le suivi à long terme des prairies de montagne est un enjeu majeur pour comprendre la réponses de ces écosystèmes au Réchauffement Climatique (Choler et al., 2021; Carlson et al., 2017). Les communautés d'espèces installées dans ces milieux disposent souvent de niches écologiques étroites (Dullinger et al., 2012); elles peuvent donc se retrouver dans l'incapacité de répondre à des changements rapides (que ce soit par la migration ou par une modification de leur physiologie) (Bektaş et al., 2021; Lenoir et al., 2008) et subissent alors une baisse de performance (quantité de biomasse produite ou intensité de productivité) en persistant sur place. Parmi les indicateurs de télédétection les plus utilisés, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) permet de suivre la productivité primaire et d'identifier les tendances de verdissement (greening) ou de brunissement (browning) sur

plusieurs décennies.

Disponibles depuis les années 1980, les archives Landsat constituent la source privilégiée des analyses sur le long terme grâce à leur résolution décamétrique, soit la résolution adaptée au projet ainsi que les bandes spectrales appropriées (Wulder et al., 2011, 2022). Cependant, en zone de montagne, l'utilisation exclusive de Landsat se heurte à une contrainte majeure : la fréquence temporelle d'acquisition modérée (cycle de 16 jours), souvent aggravée par une couverture nuageuse, particulièrement en zone de montagne, parfois de 1 mois ou plus. Cette rareté des observations peut limiter drastiquement la capacité à capturer le maximum annuel de végétation ($NDVI_{max}$, (Bayle et al., 2024; Berner et al., 2020)), une variable cruciale pour déterminer en partie la performance des communautés de plantes. Par ailleurs, la mise à disposition gratuite des archives liées aux missions satellitaires historiques offre aujourd'hui de nou-

velles synergies possibles (Barrou Dumont et al., 2025). Celles du programme Spot World Heritage (SWH) permettent potentiellement d'augmenter la densité d'observations sur une période marquée par le Réchauffement Climatique (de 1980s à aujourd'hui) et disposent de caractéristiques comparables aux observations Landsat (résolution spatiale = 10m, capteur multispectral ; (Dumont et al., 2023)).

Si l'apport de SPOT en termes de revisite a été quantifié en région de montagne (jusqu'à 36.6% de contribution dans certains secteurs entre 1996 et 2005 considérant également les missions Landsat et ASTER (Dumont et al., 2023), son impact réel sur la précision des indicateurs biophysiques et la fiabilité des tendances à long terme reste à démontrer. L'intégration de capteurs différents dans une même série temporelle soulève en effet des questions méthodologiques cruciales (Bayle et al., 2024) : Les différences de mesure dans les indicateurs biophysiques sont-elles liées à une vraie plus-value temporelle ou à des artefacts liés aux spécificités de chaque capteur ? Quels effets ont ces modifications sur l'estimation des tendances à long terme ?

L'objectif de cet article est de quantifier l'apport réel des archives SPOT SWH au suivi du $NDVI_{max}$ sur les prairies vosgiennes. Nous proposons une approche en deux étapes : 1. Une évaluation des facteurs contrôlant la différence d'estimation du $NDVI_{max}$ annuel via une modélisation additive généralisée (GAM). 2. Une analyse comparative des tendances de productivité sur 30 ans entre l'approche Landsat seule et l'approche combinée (Landsat + SPOT), afin d'identifier les secteurs où l'intégration de SPOT modifie le diagnostic de verdissement.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Constitution du jeu de données multi-capteurs

L'étude s'appuie sur une base de données consolidée de 927 575 observations sur la période 1985-2015, couvrant l'intégralité des prairies situées au dessus de 900m sur le territoire des Hautes Vosges (Figure 1). Ces prairies sont composées à la fois de communautés herbacées et de ligneux (landes) et sont parfois intégrées dans la rotation agricole des exploitations localisées dans cette région. Les températures diminuent en fonction de l'altitude avec une moyenne annuelle de 9°C à 400 m et de 5 °C à 1200 m. Sur les plus hauts sommets du massif (avoisinant mles 1400m), il y a en moyenne 160 jours de gelée par an, tandis qu'à 1 000 m, ce nombre tombe à 120 avec de nombreuses gelées tardives (Goepp, 2007).

Pour la sélection des pixels, nous avons premièrement utilisé une couche géographique des « Hautes Chaumes » contenue dans la base de données régionale du Grand-Est (CIGAL). En effet, les pixels Landsat intersectant cette couche à plus de 50% ont été sélectionnés et leur centroides calculés ($N = 52106$). Par conséquent, les pixels SPOT retenus pour l'analyse correspondent aux pixels intersectant ces centroides et sont de fait entièrement inclus dans un pixel Landsat. De cette manière, les valeurs

de NDVI relevés pour un pixel SPOT ont été associés aux séries de NDVI du pixel Landsat.

Les données sont issues de la fusion des archives Landsat (5, 7 et 8) et des archives SPOT World Heritage (SWH, niveau L1C). Cette intégration vise à pallier les contraintes d'échantillonnage propres aux zones de montagne, où la nébulosité réduit drastiquement le nombre d'images exploitables durant la saison de croissance. Pour chaque pixel, deux configurations ont été extraites : le $NDVI_{max}$ issu de Landsat seul et celui issu des deux séries fusionnées. La période du 1er Juin au 30 Septembre a été privilégiée pour calcul.

La détection des nuages a été adaptée aux spécificités de chaque archive. Pour les données Landsat, les masques de qualité natifs (QA bands) ont été utilisés pour exclure les pixels contaminés. En l'absence de masques de nuages opérationnels pour les produits SPOT L1C, un masque de qualité a été généré par détection des pixels saturés, complété par une étape de dilatation spatiale. Plus précisément, nous avons considéré les pixels ayant une valeur supérieure à 1 comme étant affectés par la présence de nuage à partir de la bande de saturation. Ensuite, une opération de dilatation morphologique d'une taille égale à 50 pixels est appliquée pour étendre cette zone marquée. Cette étape vise à éliminer les nuages, les ombres de nuage et les bordures de nuages semi-transparents.

2.2. Harmonisation radiométrique et calibration croisée

Afin d'assurer la comparabilité des données issues de différentes générations de capteurs (TM, ETM+ et OLI), un protocole d'harmonisation a été implémenté. En effet, des différences systématiques de réponse radiométrique, particulièrement dans le proche infrarouge (NIR) (différence moyenne entre les valeurs de NDVI SPOT L1C et Landsat 2A égal à $0,22 \pm 0,14$), peuvent introduire des tendances artificielles. De plus, les archives SWH étant délivrées au niveau L1C, des erreurs évidentes peuvent apparaître dans la restitution du signal de végétation.

(a) Calibration par Forêt Aléatoire (Random Forest) : Pour affiner la correspondance entre Landsat 5/8 et Landsat 7 (utilisé comme référence temporelle), un modèle d'apprentissage automatique a été entraîné. Le processus a impliqué l'identification d'années communes (toutes les années entre 1984 et 2014), le calcul de NDVI médians sur des fenêtres de 16 jours et l'exclusion des 5 % de valeurs extrêmes. Le modèle Random Forest a permis de prédire le NDVI "référence" en intégrant des covariables saisonnières (DOY) et spatiales (coordonnées), garantissant une cohérence radiométrique sur l'ensemble de la série chronologique.

(b) Application de la démarche générale à SPOT : Ce protocole de calibration croisée par Random Forest a été étendu aux capteurs SPOT en considérant à nouveau Landsat 7 comme référence. Cette étape est essentielle car les archives SPOT World Heritage (SWH)

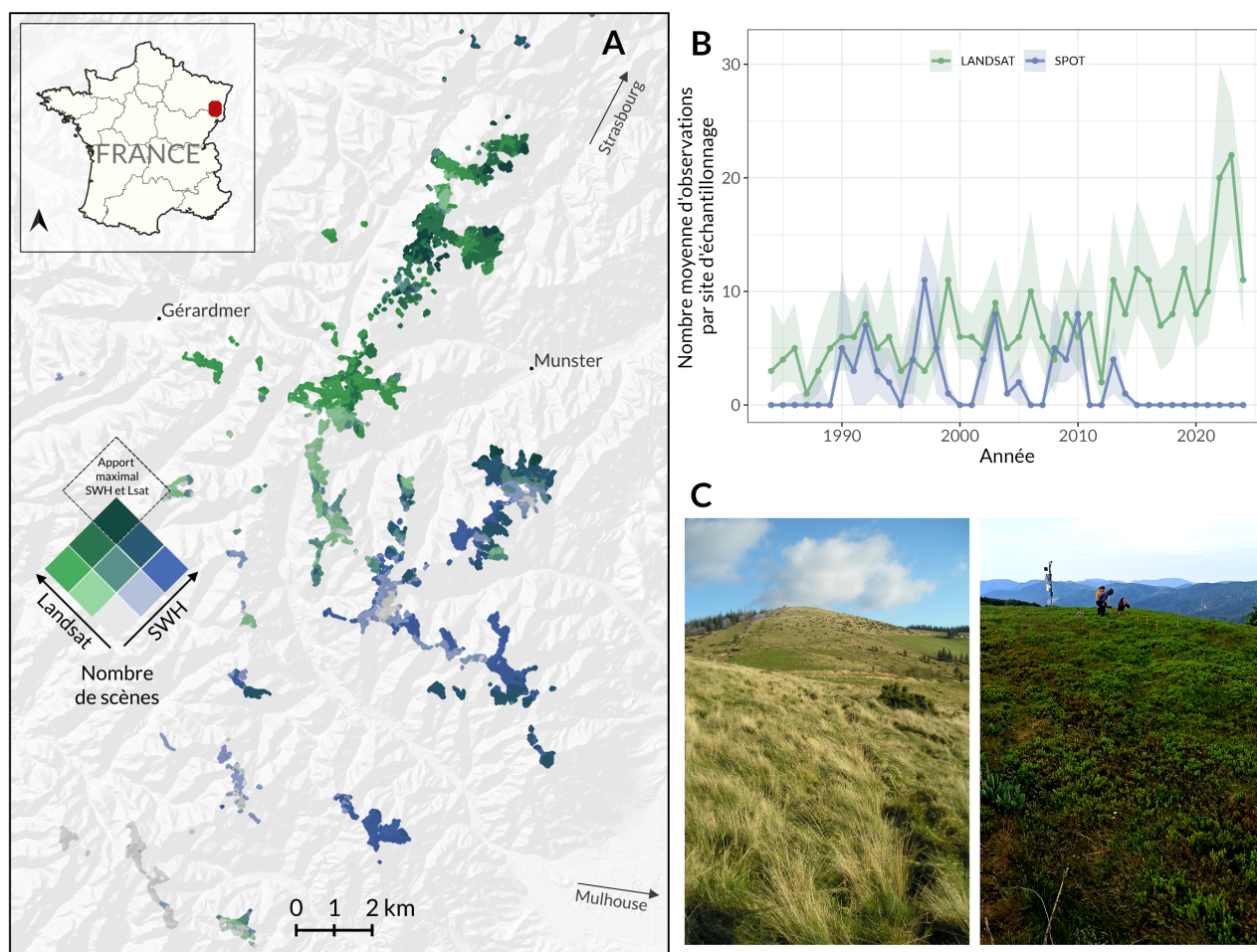


FIGURE 1: (A) Carte bivariable indiquant la disponibilité d'observations SPOT et Landsat sur les prairies de montagne (> 900 m) des Hautes Vosges. Les valeurs correspondent au nombre moyen de scènes disponibles après correction des nuages. Les valeurs moyennes minimales et maximales pour SWH et Landsat sont respectivement [2.8-4.2] et [4.5-10.8]. En conséquence, le quadrat situé au sommet du gradient bivariable correspond au cumul des scènes SWH et Landsat. **(B)** Évolution du nombre moyen d'observations par site de 1980 à aujourd'hui selon les deux missions. **(C)** Aperçu des communautés végétales des prairies de montagne : à gauche, communautés herbacées ; à droite, communautés mixtes (herbacées et landes).

sont distribuées en libre accès sous le format de produit Level 1C (L1C), soit des données de réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA). De fait, nous avons calculé le biais moyen entre les valeurs de NDVI obtenues à partir de SWH et Landsat. Puis, l'ajustement par Forêt Aléatoire, intégrant des covariables spatiales et saisonnières (DOY), permet d'assurer l'intégration de ces données L1C dans la série de NDVI Landsat harmonisée, en réduisant les écarts de NDVI calculés à partir des deux missions.

2.3. Estimation du $NDVI_{max}$ par ajustement phénologique

Le calcul du $NDVI_{max}$ à partir de séries hétérogènes implique des biais systématiques puisque les valeurs relevées ont tendance à être artificiellement basses lorsque peu de survols sont disponibles. Cela crée une fausse tendance positive au fil de l'acroissement du nombre d'observations. Pour résoudre ce problème, nous avons adopté l'approche de Berner et al. (2020) basée sur la modélisation de la phénologie typique.

Pour chaque point d'échantillonnage, une Spline cubique de 17 ans a été ajustée de manière itérative afin de représenter la courbe phénologique type du site. Ce processus permet de calculer, pour chaque jour de l'année (DOY), l'écart (Δy) entre le NDVI typique et le pic estival maximum. Chaque observation individuelle est ensuite corrigée en lui ajoutant ce facteur Δy , simulant ainsi la valeur qu'aurait eue l'indice s'il avait été mesuré exactement au pic de productivité. La valeur annuelle finale du $NDVI_{max}$ est calculée comme la médiane de ces observations ajustées.

Un protocole de filtrage a été appliqué. Nous avons appliqué un filtrage, excluant les observations aberrantes ($NDVI \leq 0,10$) et les sites présentant une complétude insuffisante (moins de 30 observations par fenêtre de 17 ans).

2.4. Variables explicatives

Pour quantifier les déterminants de l'apport d'information de SPOT, nous avons modélisé le gain de productivité ($Y = \Delta NDVI_{max}$), défini comme l'écart de maxi-

mum annuel entre la série fusionnée (SPOT+Landsat) et la série Landsat seule (Landsat). Cinq variables explicatives ont ensuite été calculées pour tester trois composantes majeures : (i) l'opportunité temporelle, à travers la densité d'images SPOT (X1) et le décalage calendaire entre les pics détectés ($X2 = \Delta \text{DOY}$, Table 1), supposant que SPOT capture des événements de pic manqués par le cycle de 16 jours de Landsat ; (ii) les effets de la correction radiométrique, mesurée par les résidus moyens du modèle Random Forest (X3) afin d'isoler les incertitudes de calibration ; et (iii) les contraintes géométriques, via la pente topographique pour contrôler d'éventuels biais de réflectance directionnelle (BRDF) liés au relief. La localisation spatiale Les coordonnées géographiques (latitude, longitude) ont enfin été calculées pour corriger les biais liés à l'auto-corrélation spatiale.

Code	Variable
X1	Nb Observation Spot : Nb Acquisitions annuelles.
X2	ΔDOY : Décalage temporel du pic observé avec Landsat ou Landsat + SPOT
X3	Résidus de correction : Résidus de correction radiométrique issus du random forest
X4	Pente topographique : Pente du pixel.
X5	Lat/Long : Coordonnées spatiales du pixel
Y	ΔNDVI_{max} : Différence de NDVI_{max} observé entre les deux stratégies (Spot Vs Spot-Landsat)

TABLE 1 : Variables explicatives du modèle GAM.

2.5. Modélisation par Modèles Additifs Généralisés (GAM)

Afin de mesurer les effets des variables influençant potentiellement le gain de NDVI_{max} , un Modèle Additif Généralisé (GAM) a été implémenté. Cette méthode permet de traiter les relations non-linéaires et d'intégrer un lissage spatial. Une analyse de robustesse a été menée en comparant un modèle global à un modèle robuste, ce dernier excluant les 5% d'observations présentant les résidus de correction (X3) les plus élevés. Ce seuil est motivé statistiquement après observation de la distribution des résidus de correction (Figure A.5). Cette étape garantit que le gain mesuré reflète une réalité biophysique et non un artefact lié aux incertitudes de correction liées à l'étalonnage des capteurs.

2.6. Analyse des tendances et évaluation de l'effort d'acquisition

Les tendances à long terme ont été calculées via l'estimateur de pente de Theil-Sen, robuste aux valeurs aberrantes. Les estimateurs obtenus en utilisant les archives SPOT et en utilisant les archives SPOT + Landsat ont été comparées au moyen d'une régression linéaire.

Le R2 et l'erreur moyenne quadratique (RMSE) ont été calculées pour quantifier cette relation. Par ailleurs, nous avons évalué le potentiel de changement de statut de signifiativité des pixels à l'aide d'une matrice de transition. Ceci avait pour objectif de vérifier si l'ajout des archives SPOT fait concrètement basculer l'assignation des pixels vers les groupes de tendances classiquement définies ("Non significatif", "Significativement positif", "Significativement négatif").

Enfin, nous avons produit une matrice du changement de statut de signifiativité pour quantifier la part de pixels dont la signifiativité statistique ($p < 0.05$) a été modifiée par l'apport de SPOT.

3. RÉSULTATS

Nous présentons ci-après les résultats de co-registation radiométrique ainsi que ceux issus de la modélisation statistique visant à évaluer les effets de l'apport de SPOT sur le gain de productivité annuel et sur l'estimation des tendances de productivité.

3.1. Résultats de la co-registation radiométrique

L'utilisation du Random Forest pour la co-registation radiométrique a permis de corriger les biais radiométriques systématiques entre les générations de capteurs Landsat. Avant correction, les capteurs Landsat 5 et 8 présentaient une sous-estimation du NDVI_{max} de -4,2% et -2,1% par rapport à Landsat 7 (référence). Après calibration, ce biais est devenu quasi nul pour Landsat 5 et a été réduit à 0,2% pour Landsat 8. La robustesse de l'approche mise en œuvre est confirmée par des coefficients de détermination élevés (R^2 de 0,89 à 0,90) et une Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) située entre 0,015 et 0,017. Concernant la correction des valeurs de NDVI_{max} issus de SPOT précisément, l'analyse des données révèle un biais systématique important, avec une sous-estimation du NDVI_{max} de 60% pour SPOT 1-4 et de 73,9% pour SPOT 5. L'application du modèle d'apprentissage a permis de corriger sensiblement ce biais puisque la relation entre les valeurs corrigées et originales affichent des coefficients de détermination égaux respectivement à 0,77 pour Spot 1-4 et 0,74 pour Spot 5. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) après calibration reste particulièrement faible avec des erreurs comprises entre 0,021 et 0,023. Comme l'illustre la comparaison des densités de points (Figure 2), le modèle parvient à corriger la dispersion initiale pour repositionner le cœur des mesures SPOT sur la bissectrice (1 :1).

3.2. Analyse des facteurs de modification du NDVI_{max}

L'apport de SPOT au NDVI_{max} a d'abord été évalué sur l'intégralité du jeu de données ($n = 927\,575$, Table 2). Ce diagnostic initial montre que le modèle explique 56% de la déviance du gain observé (ΔNDVI_{max}). L'examen des fonctions de lissage (F-stat) révèle une

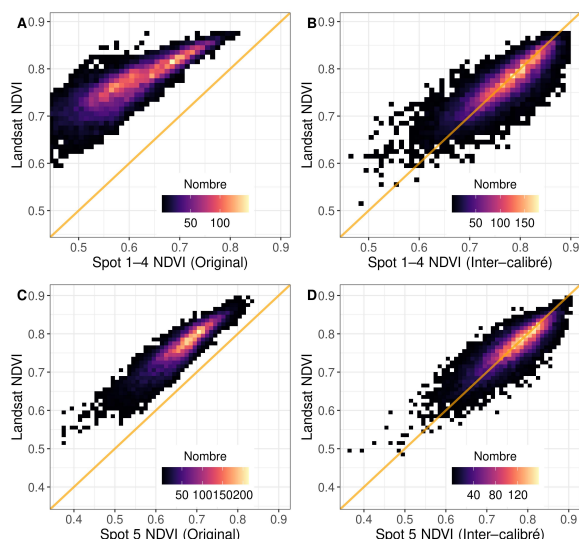


FIGURE 2: Nuage de points illustrant les relations entre les valeurs de $NDVI_{max}$ observées au sein des images SPOT (L1C) et au sein des images Landsat 7 (Niveau 2A, considéré comme la référence). La colonne de gauche représente la relation avant correction alors que la colonne de droite représente la relation après correction, c'est à dire à partir des valeurs prédites par le Random Forest. Chaque point de donnée correspond à une estimation de la médiane du NDVI sur 15 jours, calculée à partir des observations acquises lors des années de chevauchement entre les paires de capteurs pour chaque site d'échantillonnage. Chaque site d'échantillonnage contribue par un point de donnée unique, la période de 15 jours étant sélectionnée de manière aléatoire parmi les périodes disponibles durant les étés disposant d'au moins cinq observations. Les lignes orange diagonales représentent la relation 1 : 1 (Berner et al., 2020)

dépendance de la variable réponse à l'erreur de correction (F-stat=38961.2, $p < 0.001$) et au ΔDOY_{max} (F-stat=35856.1, $p < 0.001$). Le nombre d'observations SPOT affiche aussi un effet significatif mais sa contribution est presque 10 fois inférieure (F-stat = 4166.7, $p < 0.001$). Par ailleurs, la pente topographique et les coordonnées des pixels démontrent un effet quasi négligeable sur la variable réponse (F-stat respectivement égal à 83.98 et 274.4). Pour mieux comprendre l'apport temporel de SPOT, un modèle a été ajusté sur 881 196 observations après exclusion des 5% de données présentant les plus forts résidus de correction. Dans cette configuration, la déviance expliquée est de 49%. La hiérarchie des facteurs confirme que l'apport de SPOT est avant tout d'ordre phénologique. En effet, le décalage temporel (ΔDOY_{max}) devient le prédicteur dominant (F-stat = 45874.1, $p < 0.001$), suivi des résidus de correction mais avec une contribution quatre fois moins importante que ΔDOY_{max} (F-stat=9965.1, $p < 0.001$). La contribution des autres variables demeure dans le même ordre de grandeur que le précédent modèle. Par ailleurs, les courbes de dépendance partielle (Figure 3) montrent un effet positif non-linéaire du ΔDOY_{max} sur le gain de productivité $\Delta NDVI_{max}$ indiquant que ce dernier s'accroît à mesure que l'écart entre les observations Landsat et SPOT s'ac-

croît et atteignant un plateau au-delà de 80 jours (en haut à droite). De manière remarquable, cette relation présente des oscillations périodiques marquées. Ces fluctuations traduisent la haute sensibilité du signal à la synchronisation capteur/phénologie. Chaque pic de l'oscillation représente une fenêtre temporelle où SPOT capture une information de productivité que Landsat manque systématiquement à cause de sa fréquence temporelle modérée et de la couverture nuageuse en zone de montagne.

Variable	DLL	DLLR	F-stat	p-value
<i>Modèle "global" (N = 927 575) - $R^2 = 0,56$</i>				
Nb. obs Spot (X1)	3,999	4,000	4166,7	<0,001
Delta DOY (X2)	8,997	9,000	35856,1	<0,001
Residus corr. (X3)	8,995	9,000	38961,2	<0,001
Pente topo (X4)	8,282	8,862	83,98	<0,001
Lat, Long (X5)	28,917	29,00	274,4	<0,001
<i>Modèle "filtré" (N = 881 196) - $R^2 = 0,49$</i>				
Nb. obs Spot (X1)	3,999	4,000	4308,9	<0,001
Delta DOY max (X2)	8,998	9,000	45874,1	<0,001
Residus corr. (X3)	8,991	9,000	9965,1	<0,001
Pente topo (X4)	8,017	8,751	43,61	<0,001
Lat, Long (X5)	28,893	28,999	225,2	<0,001

TABLE 2: Résumés statistiques du modèle GAM global (N = 927 575) et du modèle GAM "filtré". Ce tableau présente les coefficients paramétriques et l'importance relative des termes de lissage (F-stat) expliquant la variance du gain de $NDVI_{max}$ ($\Delta NDVI_{max}$) sur l'ensemble du jeu de données. DLL correspond aux degrés de libertés de référence ; DLLR correspond aux degrés de libertés de référence ; F-stat correspond à la valeur du test de Wald

3.3. Effets sur la significativité des tendances

La comparaison des pentes de tendance de Theil-Sen (Figure 3) montre une forte cohérence globale le long de la droite d'ajustement ($R^2 = 0.832$, $p < 0.001$). On note toutefois des résidus plus importants pour les points situés tout à droite ou tout à gauche du graphique disposant des plus forts coefficients de tendance (négatifs ou positifs). Cela indique que pour ces points, les coefficients de tendance obtenus avec les archives Landsat sont sous-estimés ou bien surestimés par rapport à ceux obtenus en combinant les deux missions. Par ailleurs, l'analyse des scores de significativité montre que l'intégration de SPOT modifie le diagnostic statistique pour 7,9% des pixels (Tableau 4). Le passage à une série combinée permet un gain de puissance pour 4.3% des pixels, dont la tendance devient significative. À l'inverse, un effet de filtrage est observé pour 3.6% des pixels, pour lesquels SPOT invalide des tendances précédemment jugées significatives par Landsat seul. Pour la majorité du territoire (92%), le diagnostic demeure inchangé, témoignant de la robustesse de la série LANDSAT tout en soulignant l'apport de SPOT pour corriger les analyses localement, là où on observe des dynamiques rapides.

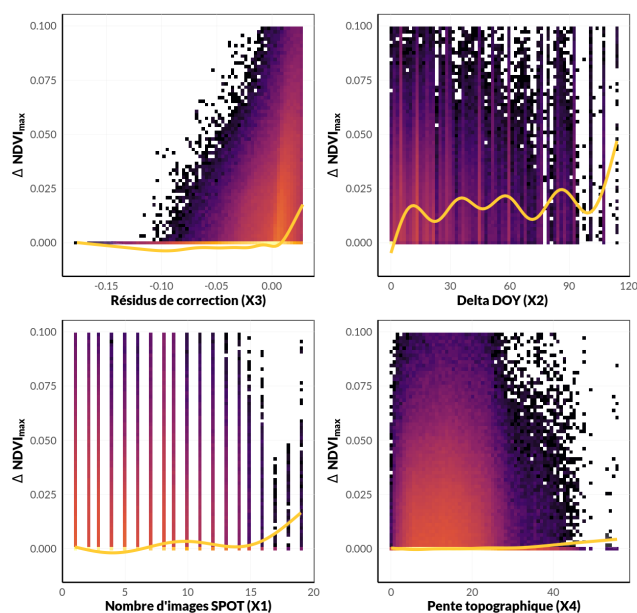


FIGURE 3: Fonctions de lissage (splines) du modèle GAM à partir du jeu de données filtré. Les graphiques représentent l'effet partiel (courbe jaune) de chaque variable sur la différence de $NDVI_{max}$ ($\Delta NDVI_{max}$). Le gradient de couleur indique le nombre de pixels allant du noir (<1000 pixels) au jaune (>4000 pixels)

Sign. ($p < 0.05$)	(Lst+S) NON	(Lst+S) OUI	Total (Lst)
(Lst) NON	78,6%	4,3%	82,9%
(Lst) OUI	3,6%	13,4%	17,0%
Total (Lst+S)	82,2%	17,7%	100%

TABLE 3: Matrice de contingence de la significativité statistique des tendances (Theil-Sen). Comparaison en nombre et en pourcentage des pixels dont la tendance change de statut (significatif vs non-significatif) entre l'approche Landsat seule et l'approche combinée Landsat+SPOT

4. DISCUSSION

4.1. La complémentarité temporelle de SPOT dans l'estimation du pic de productivité des prairies de montagne

Nos résultats démontrent que l'apport de SPOT est quasi exclusivement observé à travers le facteur temporel (ΔDOY_{max}) suggérant l'interdépendance entre la fréquence d'acquisition et la détection du pic de productivité. Plus précisément, nous avons constaté que les oscillations périodiques révélées par le modèle GAM (Figure 3) illustrent un décalage entre le cycle de 16 jours de Landsat et la rapidité des cycles végétatifs des prairies de montagne. En effet, la fenêtre du pic de végétation étant souvent étroite en raison de conditions climatiques variables, nos résultats montrent que la différence de $NDVI_{max}$ observé ($\Delta NDVI_{max}$) est maximal lorsque le capteur SPOT s'insère dans les lacunes temporelles de l'archive Landsat accentuées par la couverture nuageuse. De fait, les résultats que nous montrons viennent confirmer l'hypothèse du timing phénolo-

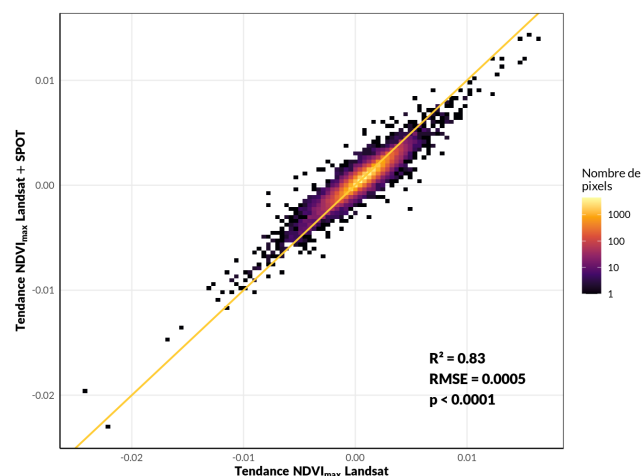


FIGURE 4: Résultats de régression illustrant la relation entre les coefficients de tendances calculées à partir des deux stratégies testées (Landsat Vs Landsat+SPOT)

gique proposée en introduction, où la disponibilité d'observations SPOT à des périodes clés vient significativement corriger une sous-estimation du pic par les archives Landsat. Plus globalement, ces travaux illustrent la valeur des archives satellitaires historiques pour le suivi des écosystèmes, qu'elles soient systématiques ou bien non systématiques du point de vue de l'acquisition. Dans le cas de SWH, elles apportent une complémentarité évidente pour stabiliser les séries temporelles sur plusieurs décennies.

4.2. Un apport d'autant plus important pour les prairies en mutation rapide

L'analyse de la relation entre les pentes de Theil-Sen (Figure 4) démontre une très forte corrélation entre les deux stratégies. Cela indique que l'introduction des observations SPOT pour densifier les séries temporelles a un impact globalement modéré sur l'estimation des tendances. Nos résultats montrent toutefois que la valeur ajoutée de SPOT s'exprime principalement là où la dynamique de changement est la plus forte, qu'il s'agisse d'un verdissement ou d'un brunissement. Dans notre site d'étude, les tendances au brunissement correspondent aux prairies situées aux altitudes les plus basses, principalement composées de graminées et très fortement intégrées à la gestion agricole (cf (Herrault et al., 2025)). Cette dynamique traduit un stress évident lié à l'élévation des températures dont elles ne profitent plus. Les pixels en verdissement rapide sont, a contrario, les communautés installées les plus hautes (> 1300 m), davantage caractérisées par la présence d'espèces alpines ou de landes subalpines. Pour ces dernières, les précipitations et la dynamique de couverture neigeuse leur permettent toujours de profiter de ce réchauffement (Herrault et al., 2025). Par ailleurs, pour 8% des pixels, cet apport est tel qu'il modifie radicalement le diagnostic statistique. Ce constat souligne donc une implication majeure pour le suivi des écosystèmes de montagne là où les modifications sont les plus fortes. Avec l'accélération

du réchauffement, nous faisons l'hypothèse que ces apports pourraient être statistiquement plus marquées au fur et à mesure que les sites et les périodes d'études s'accroissent

4.3. Un cadre d'intégration multi-capteurs flexible et robuste

L'utilisation conjointe de capteurs de générations différentes sur trois décennies implique le plus souvent l'introduction de biais systématiques liés aux caractéristiques de capteurs (par exemple la géométrie de visée de SPOT) ou au nombre d'observations disponibles dans l'estimation des tendances. Nos résultats montrent qu'il est possible de tenir compte de ces biais dans les approches utilisées pour établir des diagnostics. D'une part, l'effet de la pente topographique s'est avéré marginal dans les différences de pic de productivité ($\Delta NDVI_{max}$) observées avec les deux approches ($F=43,6$). Ceci valide que la correction du pic de productivité n'est pas le résultat d'erreurs de réflectance directionnelle (BRDF) ou d'ombres portées inhérentes aux visées déportées de SPOT. D'autre part, nous démontrons que l'augmentation progressive de la constellation SPOT au fil des années n'induit pas un pic de productivité artificiel. Notre modèle souligne que la densité d'images disponibles (X_1) exerce une influence négligeable sur le gain de productivité ($\Delta NDVI_{max}$) par rapport au facteur de synchronisation temporelle (X_2) et souligne dans le même temps que la procédure d'ajustement à partir des Splines Cubiques est efficace. Enfin, l'analyse du modèle global souligne que les résidus de correction radiométrique (X_3) peuvent induire des effets importants sur la différence de pic ($\Delta NDVI_{max}$). Ils peuvent être partiellement supprimés en retirant une part des pixels affichant les plus grosses erreurs de correction bien que l'approche de calibration que nous avons mis en oeuvre reste globalement suffisante pour une grande majorité de pixels. Afin de limiter ces biais potentiels et de s'affranchir des incertitudes liées aux procédures de correction, nous suggérons la mise à disposition systématique des archives satellitaires au niveau 2A.

5. CONCLUSION

Notre étude s'est appuyée sur un jeu de données massif (> 900 000 observations) répartis sur environ 30 années de suivi dans les Hautes Vosges pour estimer le potentiel apport des archives SWH dans l'estimation du pic de productivité annuel des prairies de montagne. Nos analyses révèlent plusieurs points. Premièrement, le timing de l'observation SPOT ($\Delta NDVI_{max}$) est la variable clé pour expliquer des différences de pic de productivité annuel. En effet, son apport dépend de la date de la scène qui doit s'intercaler dans une fenêtre de sous-estimation de Landsat pour contribuer significativement à l'ajustement de la valeur du pic. Deuxièmement, l'introduction de ces archives dans une approche intégrant uniquement la mission Landsat modifie à la marge les estimations de tendances de productivité sur la période

étudiée, en modifiant le statut de significativité de certains sites. Les zones concernées sont marquées par des changements rapides indiquant qu'il peut exister un gradient de vulnérabilité en lien avec ce changement de stratégie, à travers le massif. Troisièmement, l'approche mise en oeuvre pour aligner les archives de différents capteurs ou missions s'est avérée efficace et transposable. Elle renforce l'intérêt du traitement et de la mise à disposition des archives satellitaires corrigées de longue durée au niveau le plus abouti (topographiquement et atmosphériquement).

Annexe A. Annexe 1

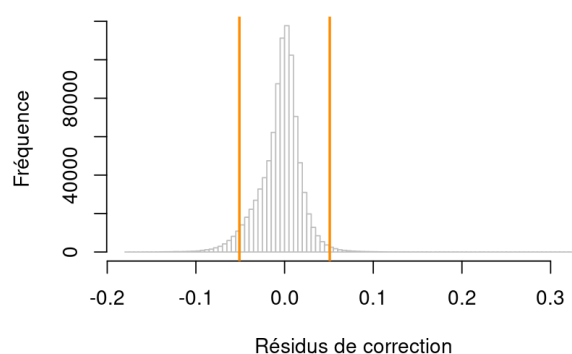


FIGURE A.5: Histogramme de distribution des valeurs de résidus de correction du NDVI. Les lignes oranges matérialisent le seuil de 5% d'exclusion des valeurs absolues.

Références

- Barrou Dumont, Z., Gascoin, S., Inglada, J., Dietz, A., Köhler, J., Lafaysse, M., Choler, P., 2025. Trends in the annual snow melt-out day over the French Alps and Pyrenees from 38 years of high-resolution satellite data (1986–2023). *The Cryosphere* 19 (7), 2407–2429.
URL <https://doi.org/10.5194/tc-19-2407-2025>
- Bayle, A., Gascoin, S., Berner, L. T., Choler, P., 2024. Landsat-based greening trends in alpine ecosystems are inflated by multidecadal increases in summer observations. *Ecography* 2024 (12), e07394.
URL <https://doi.org/10.1111/ecog.07394>
- Bektaş, B., Thuiller, W., Saillard, A., Choler, P., Renaud, J., Colace, M. P., Della Vedova, R., Münkemüller, T., 2021. Lags in phenological acclimation of mountain grasslands after recent warming. *Journal of Ecology* 109 (9), 3396–3410.
URL <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13727>
- Berner, L. T., Massey, R., Jantz, P., Forbes, B. C., Macias-Fauria, M., Myers-Smith, I., Kumpula, T., Gauthier, G., Andreu-Hayles, L., Gaglioti, B. V., Burns, P., Zetterberg, P., D'Arrigo, R., Goetz, S. J., 2020. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. *Nature Communications* 11 (1), 1–12.
URL <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18479-5>

- Carlson, B. Z., Corona, M. C., Dentant, C., Bonet, R., Thuiller, W., Choler, P., 2017. Observed long-term greening of alpine vegetation — a case study in the French Alps. *Environmental Research Letters* 12 (11), 114006.
URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AA84BD>
- Choler, P., Bayle, A., Carlson, B. Z., Randin, C., Filippa, G., Cremonese, E., 2021. The tempo of greening in the European Alps : Spatial variations on a common theme. *Global Change Biology* 27 (21), 5614–5628.
URL <https://doi.org/10.1111/GCB.15820>
- Dullinger, S., Gatttringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N. E., Guisan, A., Willner, W., Plutzer, C., Leitner, M., Mang, T., Caccianiga, M., Dirnböck, T., Ertl, S., Fischer, A., Lenoir, J., Svenning, J. C., Psomas, A., Schmatz, D. R., Silc, U., Hülber, K., 2012. Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change* 2 (8), 619–622.
URL <https://doi.org/10.1038/nclimate1514>
- Dumont, Z. B., Gascoin, S., Inglada, J., 2023. Contribution de SPOT World Heritage aux séries temporelles d'observation satellitaires des montagnes françaises. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 225 (1), 1–8.
URL <https://rfpt.sfpt.fr/index.php/RFPT/article/view/725>
- Goepp, S., 2007. Origine, histoire et dynamique des hautes-chaumes du massif vosgien. déterminismes environnementaux et actions de l'homme. PhD thesis, Université Louis Pasteur - Strasbourg I.
URL <https://theses.hal.science/tel-00200831>
- Herrault, P.-A., Ullmann, A., Ertlen, D., 2025. Combined effects of topography, soil moisture, and snow cover regimes on growth responses of grasslands in a low-mountain range (vosges, france). *Biogeosciences* 22 (3), 705–724.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., Brisse, H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320 (5884), 1768–1771.
URL <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1156831>
- Wulder, M. A., Roy, D. P., Radloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., Cook, B. D., 2022. Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment* 280, 113195.
URL <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.113195>
- Wulder, M. A., White, J. C., Masek, J. G., Dwyer, J., Roy, D. P., 2011. Continuity of Landsat observations : Short term considerations. *Remote Sensing of Environment* 115 (2), 747–751.
URL <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2010.11.002>