

Indicateurs de durabilité écologique des agroécosystèmes dérivés de la télédétection satellitaire : revue systématique

Mikhaïl J.D.D. Padonou^{1,2,*}, Antoine Denis², Yvon-Carmen H. Hountondji³, Bernard Tychon² et Gérard N. Gouwakinnou¹

¹ Laboratoire d'Écologie, de Botanique et de Biologie végétale, Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, 03 BP 123 Parakou, Bénin

² Laboratoire Eau Environnement Développement, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Arlon Campus Environnement, Faculté des Sciences, UR SPHERES, Université de Liège, 185 avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgique

³ Laboratoire d'Études et de Recherches Forestières (LERF), Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, 03 BP 123 Parakou, Bénin

Résumé – Le suivi de la durabilité écologique des agroécosystèmes est nécessaire pour atténuer les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement. Le développement de l'observation de la terre par satellite permet ce suivi sur de larges zones. Plusieurs indicateurs dérivés de la télédétection satellitaire permettent de le faire. Cette étude propose un inventaire des indicateurs de durabilité écologique (IDE) des agroécosystèmes dérivés de la télédétection satellitaire. Les bases de données *Web of Science* et *Environmental Science Collection* ont été explorées à partir d'une équation de recherche. Huit cent articles et revues de littérature scientifiques évalués par les pairs et publiés entre 1990 et 2022 ont été analysés et 49 ont été retenus pour la revue systématique de littérature. Respectivement 12 % et 42 % de ces publications proposaient des IDE dont le calcul dépendait intégralement ou partiellement de données de télédétection satellitaire. Les 46 % restants proposaient des IDE qui, bien que ne dépendant pas actuellement de données de télédétection satellitaire, pouvaient en être dérivés. À partir des 49 publications, 101 IDE des agroécosystèmes dérivés de la télédétection satellitaire ont été inventoriés, dont 32 % étaient basées sur l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol. Cinquante-deux pour cent des IDE évaluaient la capacité des agroécosystèmes à préserver les écosystèmes naturels. Cette étude met en évidence que la disponibilité de données et d'indicateurs dérivés de la télédétection satellitaire peut favoriser un suivi à long terme et à moindre coût de la durabilité écologique des agroécosystèmes. Les particularités des différents agroécosystèmes peuvent nécessiter des indicateurs spécifiques pour le suivi efficace de leur dynamique.

Mots clés : observation satellitaire / agroécosystèmes / couverture du sol / indicateurs / environnement

Abstract – Agroecosystem ecological sustainability indicators derived from satellite remote sensing: a systematic review. Monitoring the ecological sustainability of agroecosystems is essential for mitigating the negative impacts of agriculture on the environment. The development of earth observation by satellite allows this monitoring over a large area. Several indicators derived from satellite remote sensing make it possible to monitor agroecosystems. This study proposes an overview of ecological sustainability indicators (ESI) for agroecosystems derived from satellite remote sensing. The *Web of Science* and *Environmental Science Collection* databases were explored using a research equation. Eight hundred peer-reviewed scientific articles and reviews published between 1990 and 2022 were analyzed, and only 49 were selected for the systematic literature review. Respectively 12% and 42% of these publications proposed ESI based entirely or partially on satellite remote sensing. The remaining 46% proposed ESI which, while not currently dependent on satellite remote sensing data, can be derived from it. From the 49 publications, 101 ESI of agroecosystems derived from satellite remote sensing were inventoried, of which 32% were based on analysis of land cover and land use map. Fifty-two percent of the ESI assessed the capacity of agroecosystems to preserve natural ecosystems. This study shows that the availability of data and indicators derived from satellite remote sensing can facilitate long-term, low-cost monitoring of the ecological sustainability of agroecosystems. The particularities of different agroecosystems may also require specific indicators for effective monitoring of their dynamics.

Keywords: satellite observation / agroecosystems / land cover / indicators / environment

*Auteur de correspondance : dotou.padonou@gmail.com

1 Introduction

Les changements de couverture et d'utilisation des terres, causés notamment par l'expansion de l'agriculture et de l'élevage, sont l'un des principaux facteurs de la perte de biodiversité dans le monde au cours des dernières décennies (Jaureguiberry *et al.*, 2022). Les projections montrent que la population mondiale pourrait atteindre 11 milliards en 2100, avec un quadruplement de la population africaine entre 2013 et 2100 (DeSA, 2013), alors qu'il est admis que la croissance démographique augmente la demande en aliments et autres produits agricoles (Lanz *et al.*, 2018). Pour répondre à cette demande croissante de produits agricoles, l'expansion des terres agricoles de 25 % dans les pays en développement, situés surtout en régions tropicale et subtropicale riches en biodiversité, sera vraisemblablement nécessaire (Balmford *et al.*, 2005). Dans ce contexte, la protection de l'environnement et de la biodiversité dans les agroécosystèmes implique donc l'adoption d'une agriculture durable.

L'agriculture durable vise à développer de nouvelles pratiques agricoles plus sûres et plus conservatrices de la biodiversité (Lichtfouse *et al.*, 2009). Cependant, l'adoption d'une telle agriculture reste encore difficile à cause du manque d'information fiable, des barrières sociales, du régime foncier et de l'incompatibilité des infrastructures (Mohamed *et al.*, 2019). Procéder à une évaluation globale des agroécosystèmes, intégrant les dimensions économique, sociale et écologique, peut faciliter la transition vers une agriculture durable (Gliessman *et al.*, 1998).

L'évaluation de la durabilité des agroécosystèmes a stimulé le développement de plusieurs indicateurs et méthodologies (De Olde *et al.*, 2016), relatifs surtout à la dimension écologique (Lampridi *et al.*, 2019). Au cours des dernières décennies, des recherches ont été menées pour orienter le choix des indicateurs de durabilité (Latruffe *et al.*, 2016). Ces indicateurs se définissent comme une composante ou une mesure de l'état de l'environnement ou de son évolution pouvant servir à son suivi (Heink et Kowarik, 2010). Les recherches réalisées se rapportaient soit à des analyses comparatives en vue d'identifier les meilleures méthodes d'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes sur la base de différents critères (Lampridi *et al.*, 2019), soit à l'élaboration d'une typologie d'indicateurs de durabilité écologique (IDE) (Bockstaller *et al.*, 2015). Ces méthodes d'évaluation, qui sont pour la plupart tributaires de collectes de données de terrain à travers des enquêtes, ont été utilisées largement pour évaluer les agroécosystèmes des zones tempérées (Bockstaller *et al.*, 2009). Cependant, l'indisponibilité de données régulièrement actualisées est une limite à l'utilisation des dites méthodes (Latruffe *et al.*, 2016). Dans les régions tropicales, les moyens manquent souvent pour évaluer la durabilité écologique des agroécosystèmes (Burke *et al.*, 2021). Le développement durant ces dernières décennies de la télédétection satellitaire, qui s'est traduite par la disponibilité d'images satellites à haute résolution spectrale, spatiale et temporelle, permet de combler ces lacunes (Onojeghuo *et al.*, 2018). L'utilisation de cette source d'information permet de

rendre disponible des données spatio-temporelles actualisées pour l'analyse de la production agricole et la surveillance de l'impact environnemental associé à l'agriculture (Weiss *et al.*, 2020). Cependant, ces données restent encore faiblement utilisées du fait des connaissances limitées sur leur utilisation et sur leur efficacité dans la prise de décision (Burke *et al.*, 2021). Dans l'optique de combler ces lacunes, des recherches se sont penchées sur l'identification des IDE des agroécosystèmes calculés à partir des données de télédétection satellitaire (Hunt *et al.*, 2019). Au regard des multiples études menées, il est impératif d'établir un inventaire des IDE des agroécosystèmes qui sont dérivés ou potentiellement dérivables de la télédétection satellitaire. Notre étude vise à répondre à ce besoin. Elle est structurée autour des deux questions de recherches suivantes :

- quelle est la couverture spatio-temporelle des articles et revues de littérature scientifiques portant sur les IDE d'agroécosystèmes qui sont dérivés ou potentiellement dérivables de la télédétection satellitaire ?
- quelles sont les méthodes d'analyse et les données de télédétection satellitaire qui sont utilisées dans la détermination des IDE d'agroécosystèmes ?

2 Méthodologie

2.1 Inventaire des IDE d'agroécosystèmes dérivables de la télédétection satellitaire

La revue systématique de littérature est une méthode de synthèse de la connaissance rigoureuse, structurée et reproductible (Rother, 2007). Le cadre de revue systématique de littérature « Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses » (PRISMA) (Page *et al.*, 2021) a été utilisé.

Les bases de données et dépôts de littérature scientifique *Web of Science* et *Environmental Science Collection* (ProQuest) ont été utilisées pour rechercher les articles et revues de littérature scientifiques. Le choix de ces deux bases de données se justifie par le fait qu'elles permettent d'utiliser des termes de recherche complexes et qu'elles assurent une bonne couverture de plusieurs disciplines des sciences environnementales ainsi qu'une haute qualité des publications qu'elles regroupent (McRae, 2017; Mongeon et Paul-Hus, 2016).

La revue systématique a été basée sur les articles ou revues de littérature scientifiques évalués par les pairs, publiés entre 1990 et 2022. 1990 correspond au début de l'émergence des besoins d'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes (UN, 1992).

Les domaines conceptuels autour desquels la revue systématique a été articulée sont : Ecological; Sustainability; Agroecosystem; Remote sensing; Indicator. En tenant compte de ces domaines, une équation de recherche a été utilisée et son articulation se présente comme suit : (*ecological OR environmental OR ecofriendly OR green*) AND (*sustainability OR durability OR viability*) AND (*agroecosystem OR "agro-ecosystem" OR "agro ecosystem" OR agri* ecosystem OR agrosystem OR farm* system*)

Tableau 1. Critères d'inclusion et d'exclusion.**Table 1.** *Inclusion/exclusion criteria.*

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
Le type de publication est : article ou revue de littérature scientifique	Le type de publication est autre que : article ou revue de littérature scientifique
Focus sur les agroécosystèmes	Focus sur écosystèmes autres que les agroécosystèmes (ex. : savanes, forêts, etc.)
Focus sur la durabilité écologique	Focus sur durabilités autres qu'écologiques (ex. : sociale, économique)
Le texte comprend des détails pour identifier et caractériser les IDE d'agroécosystèmes	Le texte ne contient pas de détails pour identifier et caractériser les IDE d'agroécosystèmes

Tableau 2. Données extraites des articles et revues de littérature scientifique.**Table 2.** *Data extracted from scientific articles and reviews.*

Données	Description
IDE	Indicateur utilisé pour évaluer la durabilité écologique incluant des détails sur : <i>Métriques ; Unités de mesure ; Données d'observation de la terre utilisées ; Note descriptive de l'IDE</i>
Méthode d'obtention de l'IDE	<i>Classification de couverture et d'utilisation des terres ; Métriques paysagères ; Équation ; Indice spectral</i>
Zones climatiques	<i>Tempérée ; Sec ; Tropical ; Toutes zones climatiques</i>
Échelle spatiale (Zhen et Routray, 2003)	<i>Exploitation agricole/ferme ; Local ; Régional ; National</i>
Type d'indicateur (Smith <i>et al.</i> , 1999)	<i>Biologique ; Physique ; Chimique ; Paysager</i>

OR farmsystem OR agroecolo OR agroforest*) AND (global satellite OR RS OR remote sensing OR satellite OR image* OR drone OR UAV OR space OR spatial) AND (indicator*).*

Les articles et revues de littérature sélectionnés sur la base de l'équation de recherche ont fait l'objet d'un examen initial consistant à supprimer les doublons (Totin *et al.*, 2018). Ceux retenus au terme de l'examen initial ont fait l'objet d'une seconde analyse selon 4 critères d'inclusion et d'exclusion (Tab. 1). Hormis le critère relatif au type de publication (article et revue de littérature scientifique), deux critères se rapportent aux objets des publications qui doivent être directement liés à la durabilité écologique des agroécosystèmes avant d'être inclus dans la revue systématique. Le quatrième critère est lié à l'existence d'informations détaillées dans le texte qui permettent d'identifier et de décrire des IDE dérivés ou dérivables de la télédétection satellitaire. Ces critères ont été appliqués à l'examen des titres et des résumés.

Au terme des deux examens précédents, une lecture complète de chacun des articles ou revues de littérature retenus a été effectuée afin d'extraire les données à analyser (Tab. 2). Cinq types de données ont été extraits pour la revue systématique de littérature :

- les IDE inventoriés dans l'article ou la revue de littérature, avec une description de la mesure et des images satellitaires utilisées pour évaluer ou quantifier la durabilité écologique ;
- les approches d'analyse des images satellitaires pour obtenir les IDE ; ces approches impliquent soit la classification des pixels ou objets des dites images pour en déduire des types de couverture ou d'utilisation des terres, soit l'utilisation de métriques pour évaluer l'état

- écologique et la dynamique d'un paysage agricole, soit des équations mettant en relation plusieurs indices ou indicateurs dérivés des images satellitaires, soit le calcul d'indices spectraux calculés à partir de combinaisons spécifiques de bandes spectrales d'images satellites ;
- les zones climatiques où les IDE sont évalués ;
- l'échelle spatiale sur laquelle l'IDE est évalué. Quatre niveaux spatiaux sont considérés : l'exploitation agricole (intégrant plusieurs champs), le niveau local (incluant plusieurs exploitations formant un paysage agricole), régional (incluant plusieurs paysages agricoles) et national (incluant plusieurs régions agricoles) ;
- le type d'indicateur, qui peut être soit biologique en se basant sur des caractéristiques biologiques des organismes vivants (telles que la richesse et la diversité spécifique), soit physique en évaluant des paramètres physiques des agroécosystèmes (tels que pente, structure des sols, érodabilité des sols), soit chimique en se basant sur l'analyse des flux des nutriments et des toxines dans l'agroécosystème, soit paysager en reliant la configuration des paysages agraires aux processus écologiques (Smith *et al.*, 1999).

2.2 Analyse des données

La statistique descriptive a été utilisée pour synthétiser les données quantitatives relatives aux pays d'utilisation des IDE.

Le test de Mann-Kendall a été utilisé pour détecter les tendances d'évolution du nombre d'articles et de revues de littérature scientifiques par année, après qu'ils ont été convertis

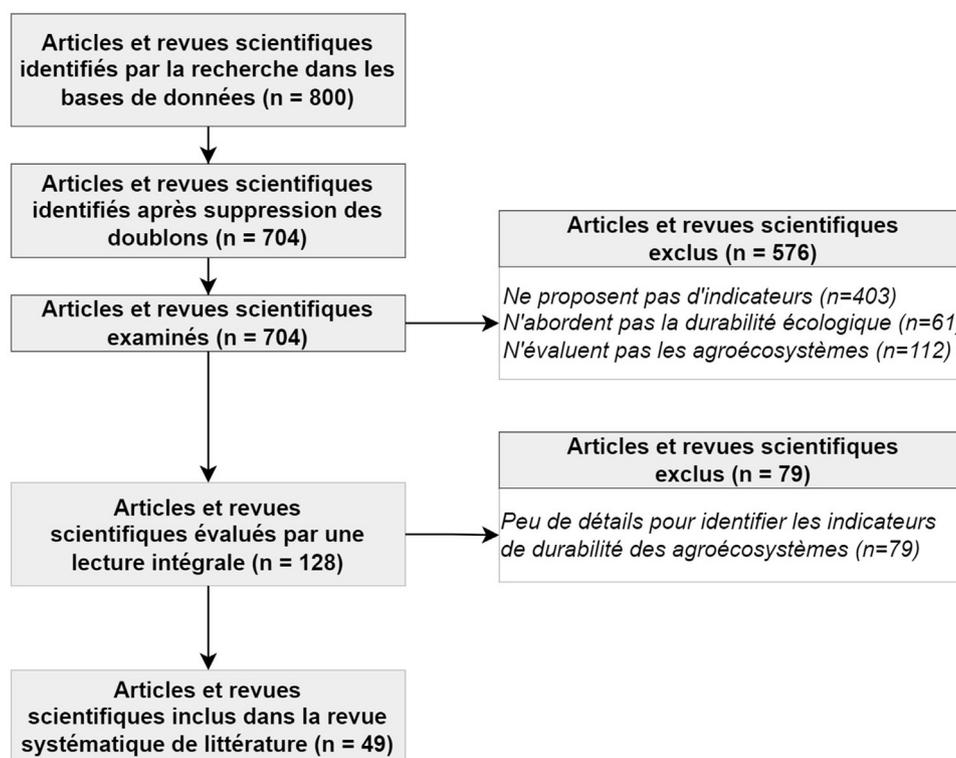


Fig. 1. Étapes de la revue systématique de littérature. “n” est le nombre d’articles et de revues de littérature scientifique.
Fig. 1. Stages of the systematic literature review. “n” is the number of scientific articles and reviews.

en série temporelle. Ce test calcule une mesure de corrélation nommée tau (τ), qui lorsqu’elle est proche de 1 indique une forte tendance croissante, tandis qu’une valeur proche de -1 indique une forte tendance décroissante. La valeur du p-value associée à cette mesure indique si la tendance observée est statistiquement significative.

Un diagramme a été réalisé pour représenter le nombre d’IDE se rapportant aux zones climatiques, échelles spatiales, type d’indicateurs et méthodes d’obtentions des IDE.

Une analyse de contenu thématique a été effectuée à l’aide du logiciel libre Taguette ([Dessus et al., 2022](#)) pour catégoriser et décrire les logiques qui sous-tendent les IDE inventoriés en fonction des approches d’analyse.

3 Résultats

3.1 Analyse de la littérature

La revue systématique de littérature dans les deux bases de données explorées a abouti à l’identification de 800 articles et revues de littérature scientifiques : 465 (58 %) dans *Web of Sciences* et 335 (42 %) dans *Environmental Science Collection* ([Fig. 1](#)). Après la suppression des doublons (96 articles et revues de littérature), l’examen à partir des titres et des résumés a permis d’exclure 576 articles et revues de littérature, dont 403 (70 %) n’abordent pas les indicateurs de durabilité écologique et 112 (19 %) n’évaluent pas les agroécosystèmes. Les 128 restants ont fait l’objet d’une lecture complète, à l’issue de laquelle 49 (38 %) ont finalement été retenus pour cette revue systématique.

Parmi les 49 articles et revues de littérature inclus, 45 (92 %) sont des articles et 4 (8 %) des revues de littérature scientifique ; 6 (12 %) sont intégralement fondés sur des données de télédétection satellitaire pour la détermination d’IDE ; 21 (42 %) proposent des IDE où les données de télédétection satellitaires sont utilisées partiellement ; et 22 (46 %) n’utilisent pas de données de télédétection satellitaire bien que certains IDE proposés puissent être dérivés des dites données.

Ces 49 articles et revues de littérature présentent des IDE évalués à diverses échelles spatiales : régionale (28), de l’exploitation agricole (11), nationale (9) et à toutes les échelles (1 article).

3.2 Répartition spatio-temporelle des publications

Les années de publication sont comprises entre 1994 et 2022 ([Fig. 2](#)). De 1994 à 2003, on trouve en moyenne une publication par an sur le sujet. De 2004 à 2015, la moyenne des publications est de 2,5 et entre 2016 et 2022 de 3,83. De 2016 à 2022, on note un accroissement du nombre de publications avec un pic en 2020 (8 articles et revues de littérature). Il résulte du test de Man-Kendall une valeur de tau ($\tau=0,548$) suggérant une forte tendance croissante statistiquement significative ($P\text{-value}=0,00015 < 0,05$) des publications entre 1994 et 2022.

La Chine ($n=14$, 32 %) et l’Italie ($n=4$, 11 %) totalisent le plus grand nombre de publications. En revanche, aucune publication n’a été inventoriée dans la plupart des pays d’Afrique, d’Asie ou d’Amérique du Sud ([Fig. 3](#)).

Tableau 3. Exemple d'indicateurs de durabilité écologique d'agroécosystèmes regroupés par thématique.*Table 3. Example of agroecosystem ecological sustainability indicators grouped by theme.*

Thématiques et échantillon d'IDE	Nombre d'IDE	Pourcentage des IDE
Conservation de la végétation non cultivée et de la faune sauvage	55	53 %
Ratio zone boisée/terres cultivées		
Physionomie et statut des habitats naturels		
Diversité fonctionnelle et réponse		
Corridors écologiques		
Connectivité		
<i>Plus d'information en matériel supplémentaire, tableau I</i>		
Maintien de production et préservation des écosystèmes naturels	26	27 %
Durabilité de l'utilisation des terres		
Années de rotation		
Capacité de stabilité de l'exploitation agricole		
<i>Plus d'information en matériel supplémentaire, tableau II</i>		
Couverture du sol par l'agriculture	12	12 %
Terres arables		
Intensité des cultures		
<i>Plus d'information en matériel supplémentaire, tableau III</i>		
Dégradation des ressources naturelles	8	8 %
Érosion potentielle		
Sols et topographie		
<i>Plus d'information en matériel supplémentaire, tableau III</i>		

La [Figure 4](#) présente un diagramme de répartition des IDE en fonction du type d'indicateurs, de leur mode de calcul, de l'échelle spatiale ou encore de leur zone climatique. Ainsi, les IDE de type paysagers sont largement dominants (67 %) ; 62 % des IDE évaluent la durabilité des agroécosystèmes à une échelle régionale ; 50 % des IDE ont été implémentés dans des zones à climat tempéré.

3.4 Approches d'analyse de données de télédétection satellitaire utilisées dans la détermination des IDE

Pour l'analyse des IDE, les jeux de données Landsat et les modèles numériques de terrain sont les plus utilisés dans les publications ([Tab. 4](#)).

Quatre approches d'analyse de données de télédétection satellitaire sont utilisées dans la détermination des IDE des agroécosystèmes. Il s'agit de l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol (n=32 ; 31,8 %), de métriques paysagères (n=37 ; 36,6 %), d'équations (n=27 ; 26,7 %), et d'indices spectraux (n=5 ; 4,9 %).

3.4.1 Analyse de la couverture et de l'utilisation des sols

Les approches regroupées dans l'analyse de la couverture et de l'utilisation des sols impliquent la détermination et la comparaison des proportions de différentes classes de couverture et/ou d'utilisation des sols obtenues à partir de la classification supervisée des pixels ou objets des images satellitaires.

Trois thématiques réparties en 25 occurrences émergent de l'analyse de contenu des logiques sous-tendant les IDE qui sont fondées sur l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol.

La première thématique en terme d'occurrence est celle du niveau de préservation des habitats naturels ou semi-naturels au sein de l'agroécosystème (n=13, 52 %). Les IDE se rapportant à cette thématique évaluent les rapports entre la proportion d'habitats naturels (forêts, savanes, plan d'eau, etc.) et artificiels (zones agricoles, agglomération, etc.) d'un agroécosystème, afin d'évaluer son niveau de durabilité écologique. L'état hémérobioïque ([Peterseil et al., 2004](#)) et l'indicateur de stress environnemental ([Focardi et al., 2008](#)) sont deux IDE représentatifs de cette première thématique. Le premier consiste à pondérer des coefficients d'anthropisation relatifs à chaque classe d'usage des terres par les pourcentages surfaciques des dites classes au sein d'une entité spatiale cible (limites administratives, entités paysagères, etc.). Le second procède à la fusion des classes d'usage des terres en macro-classes, qui sont ensuite pondérées par un pool d'expert en fonction de la pression environnementale perçue. Ainsi, selon ces deux IDE, les agroécosystèmes qui sont dominés par les classes d'usage des terres naturelles sont écologiquement plus durables.

La deuxième thématique est relative à l'analyse du niveau de couverture des sols de l'agroécosystème par des pratiques agricoles durables (n=10 ; 40 %). Les IDE liés à cette thématique évaluent les classes d'usage des zones agricoles afin de déterminer le niveau d'adoption de pratiques agricoles durables (rotation culturale, diversité d'assolement, agroforesterie) au sein des agroécosystèmes. L'intensité des cultures ([Gómez-Limón et Riesgo, 2009](#)) est un IDE représentatif de cette deuxième thématique. En évaluant la proportion des superficies dédiées aux cultures par rapport aux superficies effectivement cultivées ou ensemencées au cours d'une année, cet IDE détermine le niveau d'adoption de la jachère –une pratique agricole durable– au sein d'un

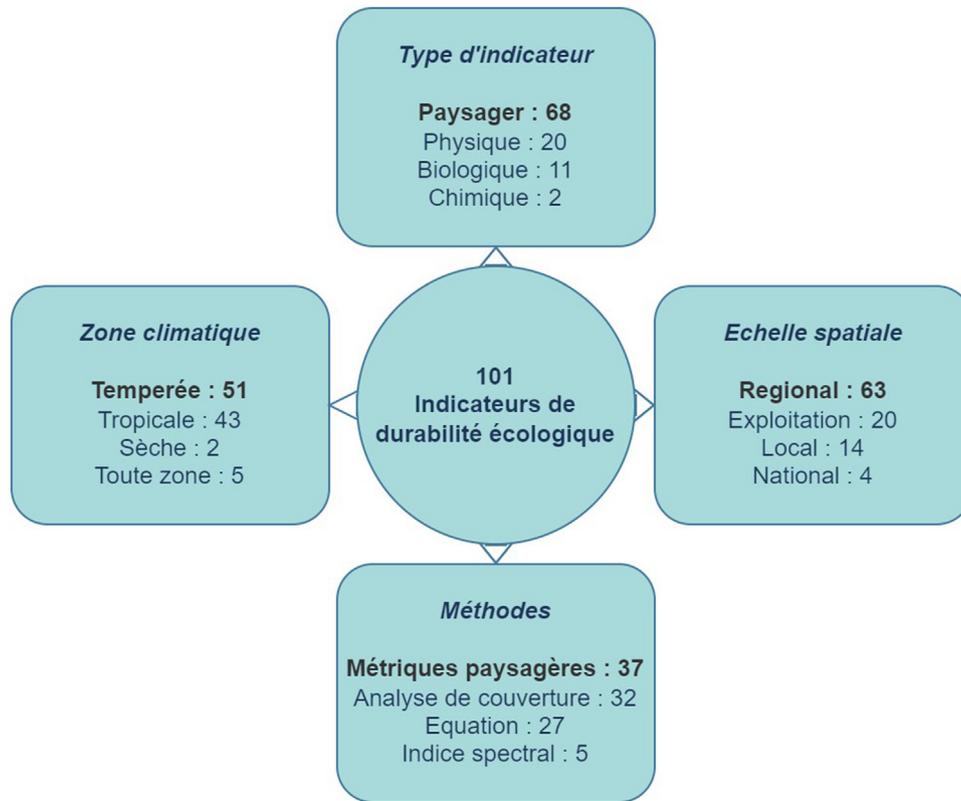


Fig. 4. Diagramme des 101 indicateurs de durabilité écologique inventoriés.

Fig. 4. Diagram of the 101 ecological sustainability indicators inventoried.

Tableau 4. Fréquence de citation des jeux de données satellitaires par les 26 articles et revues de littérature scientifique ayant utilisé ces données.

Table 4. Frequency of citation of satellite data sets by the 26 articles and reviews using these data.

Jeu de données	Nombre de publications	Pourcentage de publications
Landsat	13	48 %
Modèle numérique de terrain	8	31 %
Spot	3	12 %
Modis	3	12 %
Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)	1	4 %
Google Earth	1	4 %

agroécosystème. Un autre exemple est la durée moyenne de la rotation agricole dans un agroécosystème, déterminée à partir de l'analyse de la dynamique temporelle des types d'usage des terres (Pacini *et al.*, 2011).

La troisième thématique est liée à l'analyse des classes d'usage des zones agricoles pour évaluer le pourcentage de couverture du sol consacré à des usages agricoles (n=2, 8 %). La proportion de terres arables dans un agroécosystème (Fanelli, 2020) est un IDE représentatif de cette troisième thématique.

3.4.2 Métriques paysagères

Les approches basées sur les métriques paysagères impliquent de caractériser la structure spatiale et la composition

des agroécosystèmes en partant des classes de couverture et/ou d'utilisation des sols obtenues grâce à la classification supervisée des pixels ou des objets des images satellitaires.

Les trois thématiques qui ressortent de l'analyse de contenu des logiques sous-tendant les IDE basés sur les métriques paysagères sont, par ordre d'importance d'occurrence : hétérogénéité des éléments paysagers de l'agroécosystème (n=12, 63 %); intensité d'utilisation des terres agricoles (n=5, 26 %); et niveau de fragmentation de l'agroécosystème (n=2, 11 %).

Les IDE fondés sur les métriques rendant compte de l'hétérogénéité des agroécosystèmes partent généralement des cartes d'analyse de l'utilisation des sols pour évaluer le degré de diversité des taches paysagères. L'un des IDE représentant

cette thématique est le pourcentage d'éléments paysagers (haies, rangées d'arbres, murs de pierre, etc.) au sein d'un agroécosystème (Uthes *et al.*, 2020).

Les IDE dérivés des métriques qui analysent l'intensité d'utilisation des terres agricoles sont basés spécifiquement sur l'évaluation de la complexité des formes des taches paysagères de l'agroécosystème comme indicateur de durabilité écologique des agroécosystèmes. C'est le cas de l'indice de forme qui mesure la complexité globale de la forme des taches et de l'indicateur de densité des bordures qui est le rapport moyen entre les périmètres et les surfaces des taches d'un agroécosystème (Mancinelli *et al.*, 2018).

3.4.3 Équations combinant plusieurs indicateurs

L'approche fondée sur les équations consiste à intégrer deux ou plusieurs indicateurs ou indices dérivés des images satellitaires pour évaluer la durabilité écologique d'un agroécosystème. Ainsi, l'indice de qualité des terres agricoles (Wang *et al.*, 2021) détermine le niveau de durabilité écologique des agroécosystèmes *via* l'intégration d'une part d'indicateurs géomorphologiques (pente, topographie, rugosité) et écologiques (configuration des terres agricoles et forestières, etc.) dérivés de la télédétection satellitaire, et d'autre part d'indicateurs pédologiques (pH, matière organique, humidité du sol, etc.) et socio-économiques (capacité d'irrigation, accessibilité, etc.) non dérivés de la télédétection satellitaire.

L'analyse de contenu des logiques sous-tendant les IDE inventoriés dans la catégorie équation fait ressortir une seule thématique: la préservation et l'utilisation durable des ressources naturelles utiles pour soutenir durablement la production agricole (eau, sol, paramètres climatiques, etc.) au sein de l'agroécosystème.

3.4.4 Indices spectraux

Les indices spectraux sont obtenus à partir de la combinaison des réflectances spectrales issues de deux ou plusieurs longueurs d'onde qui permettent de caractériser la surface étudiée.

Les indices spectraux répertoriés comme IDE sont orientés vers la caractérisation des pratiques agricoles durables telles que la couverture du sol par la végétation (normalised vegetation index [Focardi *et al.*, 2008]); intensité de travail du sol (indice de différence normalisé pour le travail du sol [Van Deventer *et al.*, 1997]) au sein des agroécosystèmes.

4 Discussion

La présente revue montre une tendance statistiquement significative à la hausse des articles et revues de littérature scientifiques relatives à l'utilisation d'IDE dérivés de données de télédétection satellitaire au cours des dernières décennies. Elle démontre un fort intérêt pour la définition d'IDE des agroécosystèmes basés sur les données de télédétection satellitaire. Cependant, ces articles et revues de littérature couvrent très peu les pays d'Afrique subsaharienne. De plus, ces indicateurs évaluent inégalement les différentes composantes et paramètres déterminant la durabilité écologique des agroécosystèmes. Les indicateurs basés sur l'analyse

de la couverture et de l'utilisation des sols, les métriques paysagères, les équations et les indices spectraux sont principalement mesurés à une échelle régionale.

L'essor de ces articles et revues de littérature pendant les dix dernières années pourrait s'expliquer par deux facteurs principaux. Le premier est la recherche croissante de solutions aux problèmes de la faim, de l'utilisation non durable des terres et des changements climatiques (Whitcraft *et al.*, 2019). Le second correspond au changement de politique en faveur de l'accès libre aux données de télédétection satellitaire, au plus grand nombre de satellites fournissant des informations de qualité, de manière régulière, dans la durée et gratuitement, ainsi qu'à l'accroissement des performances des infrastructures de mise à disposition (serveurs de géodonnées), de calcul et d'analyse de ces données (Azzari et Lobell, 2017).

La télédétection satellitaire génère des données fiables et comparables pour le suivi de la durabilité des agroécosystèmes à différentes échelles spatio-temporelles (Hunt *et al.*, 2019). La diversité des données de télédétection satellitaire offre ainsi une multiplicité de possibilités pour la caractérisation des agroécosystèmes et le suivi permanent de leur durabilité. Un grand nombre d'IDE basés partiellement ou intégralement sur les données de télédétection satellitaire ont ainsi été conçus et utilisés. Cependant, l'utilisation de la télédétection satellitaire pour le suivi de la durabilité des agroécosystèmes reste inégale à travers le monde. En effet, plusieurs pays en développement et plus particulièrement ceux d'Afrique subsaharienne n'utilisent que faiblement ces données, malgré les efforts pour les rendre accessibles gratuitement (Nakalembe *et al.*, 2021). Ce constat confirme les conclusions de Carletto *et al.* (2015) et s'explique par plusieurs obstacles qu'il est nécessaire de lever. L'un des obstacles relève de la mauvaise connexion à internet ou des coûts associés à cette connexion (Nakalembe *et al.*, 2021). D'autres obstacles sont liés à l'essor relativement récent de cette technologie, au manque de précision (réel ou perçu par les potentiels utilisateurs) et d'interprétabilité des modèles basés sur les données de télédétection satellitaire, ainsi qu'à l'intérêt persistant pour les méthodes conventionnelles de collecte de données dans certains contextes (Burke *et al.*, 2021). Les méthodes conventionnelles sont basées sur des enquêtes de terrains ou de ménages par les agences nationales et autres organisations. Utilisées depuis plusieurs années, ces méthodes conventionnelles ont été progressivement standardisées par les institutions qui les utilisent systématiquement malgré les coûts et les biais qui leur sont inhérents (Kubitza *et al.*, 2020). Le manque de capacités techniques, d'infrastructures informatiques et d'investissements nécessaires au déploiement des données de télédétection satellitaire, combinés à l'inexistence de cadres politiques incitatifs, expliquent aussi leur faible utilisation dans certains pays (Nakalembe *et al.*, 2021).

Les impacts négatifs causés par les techniques agricoles modernes ont conduit à un besoin croissant d'une gestion écologiquement durable des agroécosystèmes (Mancinelli *et al.*, 2018). Des quatre approches d'analyse de données de télédétection satellitaire utilisées dans la détermination des IDE des agroécosystèmes, celles fondées sur l'analyse de la couverture et de l'utilisation des sols et sur les métriques paysagères sont les plus importantes. Elles sont cependant tributaires de la disponibilité de cartes de couverture et d'utilisation des sols de bonne qualité, cartes qui jouent un rôle

clé dans l'évaluation des questions environnementales en général (Xiuwan, 2002). Heureusement, ces dernières années, la disponibilité des images satellitaires à haute résolution spatiale, temporelle, radiométrique et spectrale d'une part et l'amélioration des techniques de classification d'images d'autre part, permettent d'améliorer la fiabilité et la précision des cartes d'occupation des terres (Macarringue *et al.*, 2022). Cette amélioration contribuera à une hausse qualitative de l'efficacité et de la précision des IDE dérivés de l'analyse de la couverture et de l'utilisation des sols et des métriques paysagères.

En outre, les IDE basés sur les métriques paysagères permettent d'inclure les hétérogénéités compositionnelles et configurationnelles des paysages et leur variation temporelle, qui sont essentielles dans la caractérisation de la durabilité écologique des agroécosystèmes (dos Santos *et al.*, 2021).

Contrairement aux approches fondées sur l'analyse de la couverture et de l'utilisation des sols et des métriques paysagères, les approches basées sur les équations permettent d'intégrer différents facteurs biophysiques (issus ou non de la télédétection) et socio-économiques (non issus de la télédétection) pour déterminer la durabilité écologique des agroécosystèmes.

Les IDE basés sur les indices spectraux connaissent également une hausse de précision et de fiabilité du fait de la disponibilité des images à haute résolution spatiale, temporelle, radiométrique et spectrale d'une part et de l'amélioration de la technologie des capteurs et de l'intégration de l'intelligence artificielle d'autre part (Martos *et al.*, 2021).

L'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes implique la prise en compte de trois composantes (Meyer *et al.*, 1992) :

- la durabilité, conçue comme la capacité des agroécosystèmes à maintenir la production agricole dans le temps sans menacer les fonctions et les structures des écosystèmes ;
- la contamination des ressources naturelles, qui se traduit par la dégradation de la qualité de l'air, du sol, de l'eau et de la biodiversité par les résidus issus des pratiques agricoles tels que les engrais, les pesticides, les agents pathogènes et les sédiments ;
- la qualité des agroécosystèmes, conçue comme leur capacité à soutenir la végétation non cultivée et la faune sauvage.

L'analyse des IDE dérivés de la télédétection satellitaire suivant les quatre approches inventoriées dans le cadre de la présente revue systématique de littérature – analyse de la couverture et de l'utilisation des sols, métriques paysagères, équations et indices spectraux – révèle une prépondérance des indicateurs évaluant la qualité des agroécosystèmes et leur durabilité. Par contre peu d'indicateurs prennent en compte la composante relative à la contamination des ressources naturelles. Cette composante, qui est l'objet de l'écotoxicologie des paysages (dos Santos *et al.*, 2021), est essentielle pour caractériser de façon holistique la durabilité écologique des agroécosystèmes. L'augmentation du nombre de satellites thématiques générant des images à très haute résolution, telle que notée par Navalgund *et al.* (2007), pourrait induire dans les prochaines années une croissance des indicateurs évaluant cette composante.

Par ailleurs, les facteurs socio-économiques, psychologiques et culturels à la base de la dynamique des agroécosystèmes (dos Santos *et al.*, 2021) sont faiblement pris en compte dans la détermination des IDE. Il est alors important de développer des IDE intégrant ces facteurs, qui peuvent être mobilisés par des études socioécologiques approfondies.

En termes d'échelle spatiale, la présente étude révèle que les IDE sont conçus majoritairement pour une évaluation à un niveau régional. L'augmentation des images satellitaires à très haute résolution permettant le passage d'une cartographie des terres agricoles par pixel à une cartographie par objet (Blaschke *et al.*, 2014) et offrant l'avantage de l'extraction des informations détaillées à une échelle très fine (Castillejo-González *et al.*, 2009) pourrait induire dans les prochaines années un essor des IDE pour évaluer plus précisément la durabilité écologique à l'échelle des champs.

La présente revue systématique de littérature a permis d'inventorier des indicateurs de durabilité écologique des agroécosystèmes dérivés de la télédétection satellitaire. Elle a mis en exergue les disparités en termes de couverture géographique des publications relatives à ces indicateurs. Ainsi, elle a permis d'identifier les zones où les IDE d'agroécosystème dérivés de la télédétection satellitaire ont besoin d'être testés. Elle a également identifié un certain nombre d'indicateurs et de jeux de données qui sont traditionnellement mobilisés pour la mise en place d'un cadre d'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes essentiellement basé sur la télédétection satellitaire.

L'une des limites de la présente revue réside dans les critères d'inclusion et d'exclusion des publications scientifiques. En effet, pour circonscrire le cadre de cette revue systématique, seules deux bases de données ont été explorées pour identifier les publications scientifiques pertinentes. Il est fort probable qu'en utilisant des bases de données bibliographiques supplémentaires, une plus grande variété de travaux de recherche, et donc d'indicateurs, pourraient être recensés.

5 Conclusion

Cette revue de littérature met en évidence une augmentation au cours des dernières décennies des publications traitant de l'utilisation de données de télédétection satellitaire pour le suivi de la durabilité écologique des agroécosystèmes. Cependant, ces publications ne sont pas uniformément réparties à l'échelle mondiale, avec un accent moindre sur les pays d'Afrique subsaharienne.

Les images à haute et très haute résolution spatiale, disponibles grâce à la télédétection satellitaire, émergent comme une alternative prometteuse pour suivre la durabilité écologique des agroécosystèmes. Les jeux de données Landsat et les modèles numériques de terrain sont les données les plus utilisées dans l'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes en Europe et en Asie. Les indicateurs de durabilité écologique qui en découlent se concentrent principalement sur des aspects paysagers, impliquant une analyse approfondie de la couverture et de l'utilisation des terres, des métriques paysagères, des équations et des indices spectraux.

Ces indicateurs répertoriés offrent une base solide pour le développement d'un cadre d'évaluation de la durabilité écologique des agroécosystèmes, principalement ancré dans l'utilisation de données de télédétection satellitaire. Cependant, le développement opérationnel de ce type de cadre d'évaluation nécessite une analyse de faisabilité pour évaluer la praticabilité du calcul des indicateurs dans les contextes spécifiques des agroécosystèmes à évaluer.

Matériel supplémentaire

Tableau supplémentaire I : Indicateurs de durabilité écologique d'agroécosystèmes inventoriés pour la thématique « conservation de la végétation non cultivée et de la faune sauvage » (ACS : Analyse de la couverture du sol ; MP : Métrique paysager ; EQ : Equation ; IS : Indices spectraux).

Tableau supplémentaire II : Indicateurs de durabilité écologique d'agroécosystèmes inventoriés pour la thématique « Maintien de production et préservation des écosystèmes naturels » (ACS : Analyse de la couverture du sol ; MP : Métrique paysager ; EQ : Equation ; IS : Indices spectraux).

Tableau supplémentaire III : Indicateurs de durabilité écologique d'agroécosystèmes inventoriés pour la thématique « Couverture du sol par l'agriculture » et « Dégradation des ressources naturelles » (ACS : Analyse de la couverture du sol ; MP : Métrique paysager ; EQ : Equation ; IS : Indices spectraux).

Le matériel supplémentaire est disponible sur <https://www.cahiersagricultures.fr/10.1051/cagri/2024022/olm>.

Remerciements

Nous remercions le projet Observatoire pilote des paysages et des dynamiques agricoles du Bénin (OBSYDYA, <https://www.obsydy.org/>) pour avoir soutenu financièrement cette recherche via une bourse de thèse du premier auteur.

Conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts. Le financeur n'a joué aucun rôle dans la conception méthodologique de l'étude, dans la collecte, l'analyse ou l'interprétation des données, dans la rédaction du manuscrit ou dans la décision de publier les résultats.

Contribution des auteurs

Conceptualisation : M.P., A.D. et G.G. ; méthodologie : M.P., A.D. et G.G. ; logiciel : M.P. ; analyse : M.P., A.D. ; investigation : M.P. ; rédaction – version originale : M.P. ; rédaction – révision et édition : M.P., A.D. et G.G. ; supervision : A.D., G.G., Y.H., B.T. ; administration du projet : A.D., Y.H., G.G. et B.T. ; acquisition du financement : A.D., Y.H. et B.T.

Références

Azzari G, Lobell D. 2017. Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring.

- Remote Sensing of Environment* 202: 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.025>.
- Balmford A, Green RE, Scharlemann JP. 2005. Sparing land for nature: Exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. *Global Change Biology* 11(10): 1594–1605. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001035.x>.
- Blaschke T, Hay GJ, Kelly M, Lang S, Hofmann P, Addink E, *et al.* 2014. Geographic object-based image analysis—towards a new paradigm. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 87: 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014>.
- Bockstaller C, Feschet P, Angevin F. 2015. Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 22(1): 1–12. <https://doi.org/10.1051/ocl/2014052>.
- Bockstaller C, Guichard L, Keichinger O, Girardin P, Galan MB, Gaillard G. 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for sustainable development* 29: 223–235. <https://doi.org/10.1051/agro:2008058>.
- Burke M, Driscoll A, Lobell DB, Ermon S. 2021. Using satellite imagery to understand and promote sustainable development. *Science* 371 (6535): eabe8628. <https://doi.org/10.1126/science.abe8628>.
- Carletto C, Jolliffe D, Banerjee R. 2015. From tragedy to renaissance: Improving agricultural data for better policies. *The Journal of Development Studies* 51(2): 133–148. <https://doi.org/10.1080/00220388.2014.968140>.
- Castillejo-González IL, López-Granados F, García-Ferrera A, Peña-Barragán JM, Jurado-Expósito M, de la Orden MS, *et al.* 2009. Object-and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 68(2): 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.004>.
- De Olde EM, Oudshoorn FW, Sørensen CA, Bokkers EA, De Boer IJ. 2016. Assessing sustainability at farm-level: Lessons learned from a comparison of tools in practice. *Ecological Indicators* 66: 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.047>.
- DeSA UN. 2013. World Population Prospects: 2012 Revision. New York (USA).
- Dessus P, Dascalu M, Mandran N, Gutu-Robu GS, Dormoy-Fournier C, Ruseti SS. 2022. L'analyse sémantique automatique pour étudier les discussions visant la construction collaborative de connaissances. Dijon (France): Editions Raison et Passions, pp. 575–589. <https://doi.org/10.3917/rp.alber.2022.02.0578>.
- dos Santos JS, Dodonov P, Oshima JEF, Martello F, de Jesus AS, Ferreira ME, *et al.* 2021. Landscape ecology in the Anthropocene: An overview for integrating agroecosystems and biodiversity conservation. *Perspectives in Ecology and Conservation* 19(1): 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.11.002>.
- Fanelli RM. 2020. The spatial and temporal variability of the effects of agricultural practices on the environment. *Environments* 7(4): 33. <https://doi.org/10.3390/environments7040033>.
- Focardi S, Loiselle SA, Mazzuoli S, Bracchini L, Dattilo AM, Rossi C. 2008. Satellite-based indices in the analysis of land cover for municipalities in the province of Siena, Italy. *Journal of Environmental Management* 86(2): 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.08.011>.
- Gliessman SR, Engles E, Krieger R. 1998. Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture. CRC press.

- Gómez-Limón JA, Riesgo L. 2009. Alternative approaches to the construction of a composite indicator of agricultural sustainability: An application to irrigated agriculture in the Duero basin in Spain. *Journal of environmental management* 90(11): 3345–3362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.023>.
- Heink U, Kowarik I. 2010. What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological indicators* 10(3): 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2009.09.009>.
- Hunt ML, Blackburn GA, Rowland CS. 2019. Monitoring the sustainable intensification of arable agriculture: The potential role of earth observation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 81: 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.013>.
- Jaureguiberry P, Titeux N, Wiemers M, Bowler DE, Coscieme L, Golden AS, *et al.* 2022. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science advances* 8(45): eabm9982. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>.
- Kubitza C, Krishna VV, Schulthess U, Jain M. 2020. Estimating adoption and impacts of agricultural management practices in developing countries using satellite data. A scoping review. *Agronomy for Sustainable Development* 40: 1–21. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0610-2>.
- Lampridi MG, Sørensen CG, Bochtis D. 2019. Agricultural sustainability: A review of concepts and methods. *Sustainability* 11(18): 5120. <https://doi.org/10.3390/su11185120>.
- Lanz B, Dietz S, Swanson T. 2018. The expansion of modern agriculture and global biodiversity decline: An integrated assessment. *Ecological Economics* 144: 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.018>.
- Latruffe L, Diazabakana A, Bockstaller C, Desjeux Y, Finn J, Kelly E, *et al.* 2016. Measurement of sustainability in agriculture: A review of indicators. *Studies in Agricultural Economics* 118(3): 123–130. <https://dx.doi.org/10.7896/j.1624>.
- Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Véronique S, Alberola C. 2009. Sustainable agriculture. Paris (France): EDP Sciences, Springer, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8>.
- Macarringue LS, Bolfe É, Pereira PRM. 2022. Developments in land use and land cover classification techniques in remote sensing: A review. *Journal of Geographic Information System* 14(1): 1–28. <https://doi.org/10.4236/jgis.2022.141001>.
- Mancinelli R, Di Felice V, Karkalis K, Bari S, Radicetti E, Campiglia E. 2018. Assessment of the state of agroecosystem sustainability using landscape indicators: A comparative study of three rural areas in Greece. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 25(1): 35–46. <https://doi.org/10.1080/13504509.2016.1277377>.
- Martos V, Ahmad A, Cartujo P, Ordoñez J. 2021. Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences* 11(13): 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>.
- McRae J. 2017. ProQuest Environmental Science Collection. *The Charleston Advisor* 19(2): 44–47. <https://doi.org/10.5260/chara.19.2.44>.
- Meyer JR, Campbell CL, Moser TJ, Hess GR, Rawlings JO, Peck S, *et al.* 1992. Indicators of the ecological status of agroecosystems. *Ecological Indicators* 1: 629–658. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4659-7_35.
- Mohamed ES, Abu-hashim M, AbdelRahman MA, Schütt B, Lasaponara R. 2019. Evaluating the effects of human activity over the last decades on the soil organic carbon pool using satellite imagery and GIS techniques in the Nile Delta Area, Egypt. *Sustainability* 11(9): 2644. <https://doi.org/10.3390/su11092644>.
- Mongeon P, Paul-Hus A. 2016. The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics* 106: 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>.
- Nakalembe C, Becker-Reshef I, Bonifacio R, Hu G, Humber ML, Justice CJ, *et al.* 2021. A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa. *Global Food Security* 29: 100543. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543>.
- Navalgund RR, Jayaraman V, Roy P. 2007. Remote sensing applications: An overview. *current science* 93: 1747–1766. <https://www.jstor.org/stable/24102069>.
- Onojeghuo AO, Blackburn GA, Huang J, Kindred D, Huang W. 2018. Applications of satellite ‘hyper-sensing’ in Chinese agriculture: Challenges and opportunities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 64: 62–86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.005>.
- Pacini GC, Lazzarini G, Vazzana C. 2011. AESIS: A support tool for the evaluation of sustainability of agroecosystems. Example of applications to organic and integrated farming systems in Tuscany, Italy. *Italian Journal of Agronomy* 6(1): e3–e3. <https://doi.org/10.4081/ija.2011.e3>.
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, *et al.* 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *International journal of surgery* 88: 105906. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2021.105906>.
- Peterseil J, Wrba T, Plutzer C, Schmitzberger I, Kiss A, Szerencsits E, *et al.* 2004. Evaluating the ecological sustainability of Austrian agricultural landscapes—the SINUS approach. *Land use policy* 21(3): 307–320. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.011>.
- Rother ET. 2007. Systematic literature review X narrative review. *Acta paulista de enfermagem* 20: v–vi. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>.
- Smith O, Petersen G, Needelman B. 1999. Environmental indicators of agroecosystems. *Advances in agronomy* 69: 75–97. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60947-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60947-5).
- Totin E, Segnon AC, Schut M, Affognon H, Zougmore RB, Rosenstock T, *et al.* 2018. Institutional perspectives of climate-smart agriculture: A systematic literature review. *Sustainability* 10(6): 1990. <https://doi.org/10.3390/su10061990>.
- UN. 1992. Convention on biological diversity. <http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>.
- Uthes S, Kelly E, König HJ. 2020. Farm-level indicators for crop and landscape diversity derived from agricultural beneficiaries data. *Ecological Indicators* 108: 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105725>.
- Van Deventer A, Ward A, Gowda P, Lyon J. 1997. Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 63: 87–93.
- Wang L, Zhou Y, Li Q, Xu T, Wu Z, Liu J. 2021. Application of three deep machine-learning algorithms in a construction assessment model of farmland quality at the county scale: Case study of Xiangzhou, Hubei Province, China. *Agriculture* 11(1): 72. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010072>.
- Weiss M, Jacob F, Duveiller G. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of environment* 236: 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>.
- Whitcraft AK, Becker-Reshef I, Justice CO, Gifford LKavvada A, Jarvis I. 2019. No pixel left behind: Toward integrating Earth

- Observations for agriculture into the United Nations Sustainable Development Goals framework. *Remote Sensing of Environment* 235: 111470. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111470>.
- Xiuwan C. 2002. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International journal of remote sensing* 23(1): 107–124. <https://doi.org/10.1080/01431160010007051>.
- Zhen L, Routray JK. 2003. Operational indicators for measuring agricultural sustainability in developing countries. *Environmental management* 32: 34–46. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-2881-1>.

Citation de l'article : Padonou MJDD, Denis A, Hountondji Y-CH, Tychon B, Gouwakinnou GN. 2024. Indicateurs de durabilité écologique des agroécosystèmes dérivés de la télédétection satellitaire : revue systématique. *Cah. Agric.* 33: 27. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024022>