

Manuel des indicateurs et indices de sécheresse



Programme de gestion intégrée des sécheresses



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 1173

TEMPS CLIMAT EAU



Global Water
Partnership

Towards a water secure world



L'**Organisation météorologique mondiale** (OMM) est une institution spécialisée des Nations Unies. Elle fait autorité pour tout ce qui concerne l'état et le comportement de l'atmosphère terrestre, son interaction avec les terres émergées et les océans, le temps et le climat qu'elle engendre et la répartition des ressources en eau qui en résulte. Elle compte actuellement 191 États et territoires Membres.

public.wmo.int



Le **Partenariat mondial pour l'eau** (GWP) est un réseau international qui aspire à un monde dans lequel la sécurité en eau est assurée. Sa mission est de faire progresser la gouvernance et la gestion des ressources en eau dans l'optique d'un développement durable et équitable. Il est ouvert à toutes les organisations qui souscrivent aux principes de la gestion intégrée des ressources en eau telle qu'elle est promue par le réseau.

www.gwp.org



Le **National Drought Mitigation Center** (NDMC) a été créé en 1995 à l'Université du Nebraska à Lincoln. Il aide les populations et les institutions à formuler et à appliquer des mesures qui réduisent la vulnérabilité à l'égard de la sécheresse par la préparation et la gestion des risques plutôt que par la gestion des crises. Le Centre collabore avec de nombreuses instances nationales (autorités fédérales et États) et organisations internationales.

www.drought.unl.edu

Le **Programme de gestion intégrée des sécheresses** a été lancé par l'Organisation météorologique mondiale et le Partenariat mondial pour l'eau en mars 2013, lors de la Réunion de haut niveau sur les politiques nationales en matière de sécheresse. Il collabore avec un large éventail de partenaires dans le but d'assister les intervenants à tous les niveaux. Le Programme coordonne à l'échelle du globe la production d'informations scientifiques et la diffusion de connaissances et de bonnes pratiques afin de donner des orientations sur les instruments de politique et de gestion propices à une démarche intégrée face à la sécheresse. Il concourt au Cadre mondial pour les services climatologiques, notamment aux domaines prioritaires que sont la réduction des risques de catastrophe, l'eau, l'agriculture et la sécurité alimentaire, l'énergie et la santé. Il entend surtout aider les régions et les pays à élaborer des politiques axées sur la prévention et à établir des mécanismes efficaces de prévision, ce à quoi devrait contribuer le présent manuel.

www.droughtmanagement.info

Manuel des indicateurs et indices de sécheresse

Programme de gestion intégrée des sécheresses



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 1173



Global Water
Partnership

Towards a water secure world

2016

Avis au lecteur:

La présente publication fait partie de la série «Integrated Drought Management Tools and Guidelines» établie au titre du Programme de gestion intégrée des sécheresses. Son contenu s'inspire autant que possible de textes publiés et de travaux pertinents et vise à répondre aux attentes des praticiens et des décideurs. Il s'agit d'un ouvrage de référence et d'un guide de nature pragmatique, non d'un texte théorique.

Ce document est appelé à évoluer afin de rendre compte de l'expérience acquise par les lecteurs. Les indicateurs et les indices décrits dans le chapitre 7 peuvent être consultés en ligne à l'adresse www.droughtmanagement.info. Le Programme encourage les responsables et experts des ressources en eau intéressés par la gestion des sécheresses dans le monde à contribuer à enrichir cette publication en transmettant leurs observations et toutes autres informations qu'ils pourraient détenir. L'auteur ou la source de ces contributions seront mentionnés comme il convient. Veuillez utiliser pour ce faire l'adresse courriel: idmp@wmo.int et citer en objet: Manuel des indicateurs et indices de sécheresse.

Source à citer:

Organisation météorologique mondiale (OMM) et Partenariat mondial pour l'eau (GWP), 2016: *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse* (M. Svoboda et B.A. Fuchs), Programme de gestion intégrée des sécheresses, Integrated Drought Management Programme Tools and Guidelines Series 2, Genève.

Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2

© Organisation météorologique mondiale et Partenariat mondial pour l'eau, 2016

ISBN 978-92-63-21173-6

ISBN 978-91-87823-31-2

Déni de responsabilité:

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et du GWP et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation météorologique mondiale et du Partenariat mondial pour l'eau aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM et le GWP les cautionnent ou les recommandent de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

Les constatations, interprétations et conclusions exprimées dans les publications de l'OMM et du GWP portant mention d'auteurs nommément désignés sont celles de leurs seuls auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'OMM et du GWP ou de leurs Membres respectifs.

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
REMERCIEMENTS.....	iv
1. INTRODUCTION	1
2. DÉFINITIONS: INDICATEURS ET INDICES	3
3. MÉTHODES DE SUIVI DE LA SÉCHERESSE ET D'APPUI À L'ALERTE PRÉCOCE ET À L'ÉVALUATION	4
4. CHOIX DES INDICATEURS ET INDICES.....	5
5. SOMMAIRE DES INDICATEURS ET INDICES	6
6. SOURCES D'INFORMATION SUR LES INDICATEURS ET INDICES	10
7. INDICATEURS ET INDICES	11
7.1 Météorologie	11
7.2 Humidité du sol	25
7.3 Hydrologie	28
7.4 Télédétection	32
7.5 Valeurs composites ou modélisées	38
APPENDICE: RÉSULTATS D'ENQUÊTE.....	42
BIBLIOGRAPHIE	44

REMERCIEMENTS

Le *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse* est le fruit d'une initiative relevant du Programme de gestion intégrée des sécheresses. Il a été élaboré par Mark Svoboda et Brian Fuchs, du *National Drought Mitigation Center* de l'Université du Nebraska à Lincoln.

La publication a bénéficié de la collaboration et des observations des personnes suivantes (par ordre alphabétique):

Kevin Anderson, Section des données et analyses climatiques, Environnement Canada
Chandrashekar Biradar, Centre international de recherche agronomique dans les régions sèches (ICARDA)
Siegfried Demuth, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)
Maxx Dilley, Organisation météorologique mondiale (OMM)
Allan Howard, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Rajeev Issar, Yuko Kurauchi et Francis Opiyo, Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD)
Dasarath Jayasuriya et Gary Allan, Bureau météorologique australien
Oluf Zeilund Jessen, DHI
Azmat Hayat Khan, Service météorologique pakistanais
Alexander Kleshchenko, Institut national de météorologie agricole de la Fédération de Russie
Mario López Pérez, Commission nationale de l'eau (CONAGUA) du Mexique
Bradfield Lyon, Institut international de recherche sur le climat et la société (IRI), Université Columbia
Sayed Masoud Mostafavi Darani et Masoud Haghighat, Organisation météorologique de la République islamique d'Iran
Masahiko Murase, Centre international de gestion des risques associés à l'eau (ICHARM), Institut de recherche sur les travaux publics (PWRI), Japon
Gabriele Quinti, CERFE, Italie
Vadlamudi U.M. Rao, Projet de recherche en agrométéorologie coordonné à l'échelle nationale (AICRPAM), Institut central de recherche sur l'agriculture en zone aride (CRIDA), Conseil indien de la recherche agronomique (ICAR)
Vladimir Smakhtin, Institut international de gestion des ressources en eau (IWMI)
Yanling Song, Administration météorologique chinoise
Roger C. Stone et Anthony Clark, Université du Queensland méridional
Marcus Wijnen et Natalia Limones Rodriguez, Banque mondiale
Donald Wilhite, Université du Nebraska à Lincoln

Robert Stefanski et Frederik Pischke, de l'Unité d'appui technique du Programme OMM/GWP de gestion intégrée des sécheresses, ont assuré la coordination d'ensemble.

1. INTRODUCTION

Pourquoi est-il important de surveiller la sécheresse? Il s'agit d'un phénomène normal qui peut survenir sous n'importe quel climat n'importe où dans le monde, même dans les déserts et les forêts tropicales. Les sécheresses se classent parmi les dangers naturels les plus coûteux d'une année sur l'autre; elles ont des conséquences considérables et étendues, qui touchent en même temps une multitude de secteurs économiques et une large population. Les superficies affectées sont généralement plus vastes que ce n'est le cas pour d'autres phénomènes, qui se cantonnent aux plaines d'inondation, aux régions côtières, aux trajectoires des tempêtes ou aux zones de faille, par exemple. C'est peut-être le danger naturel qui se prête le mieux à la surveillance car le phénomène est lent à s'installer, ce qui donne le temps d'observer l'évolution des précipitations, des températures et de l'état général des réserves d'eaux superficielles et souterraines dans le secteur menacé. Le suivi des sécheresses fait fréquemment appel à des indicateurs ou des indices qui varient selon la région et la saison.

Comme d'autres aléas, la sécheresse peut être décrite par son intensité, son emplacement, sa durée et son moment d'apparition. Elle est provoquée par divers processus hydrométéorologiques qui inhibent les précipitations ou limitent le volume des eaux superficielles et souterraines disponibles, créant des conditions beaucoup plus sèches que la normale ou réduisant autrement l'humidité disponible dans des proportions potentiellement dommageables. Les indicateurs et les indices de sécheresse présentés dans ce manuel permettent de déterminer l'intensité, l'emplacement, la durée, le début et la fin de ces conditions. Il faut savoir que les sécheresses ont des impacts aussi variés que leurs causes. Elles peuvent avoir une incidence néfaste sur l'agriculture et la sécurité alimentaire, la production d'hydroélectricité, les activités industrielles, la santé humaine et animale, la sécurité des moyens de subsistance et celle des personnes (quand les femmes doivent parcourir de grandes distances pour aller chercher de l'eau, par exemple) et l'accès à l'éducation (quand les filles ne vont plus à l'école car la corvée d'eau prend trop de temps). Les effets dépendent du contexte socio-économique dans lequel survient la sécheresse, c'est-à-dire des personnes ou des biens qui sont exposés et de leur degré particulier de vulnérabilité. D'où l'importance cruciale que revêt souvent, dans le choix des indicateurs, le type d'impacts à prendre en compte dans le cadre du dispositif de suivi et d'alerte précoce.

On entend ici par impact **un dommage ou un changement observable à un moment donné qui est dû à la sécheresse**. La gestion des risques exige l'évaluation des dangers, de l'exposition, de la vulnérabilité et des impacts, un système d'alerte précoce (suivi et prévision, voir l'encadré ci-après) et des mesures de préparation et d'atténuation (OMM, CNULCD et FAO, 2013). Il importe que les indicateurs ou les indices de sécheresse représentent avec exactitude les impacts subis. Ces derniers tendent à varier selon la région et la saison, à mesure que le phénomène évolue.

Plusieurs indicateurs et indices sont parfois nécessaires pour surveiller différents aspects du cycle hydrologique. Il est bon que ces outils et leur description correspondent aux impacts des conditions qui se dessinent sur le terrain et aux décisions de gestion que prennent les personnes, les groupes et les organismes concernés. Alors qu'un système d'alerte précoce doit s'intéresser avant tout aux effets de la sécheresse, l'évaluation des impacts fait cruellement défaut dans un grand nombre de systèmes en usage dans le monde. L'exercice est complexe car, outre la nature physique du phénomène, divers facteurs socio-économiques influent sur la gravité et sur la nature des impacts, selon l'exposition et la vulnérabilité. Il est essentiel de savoir comment les sécheresses touchent les personnes,

Les systèmes d'alerte précoce à la sécheresse

Ils servent à suivre et à évaluer les conditions climatiques et hydrologiques et l'état de l'approvisionnement en eau, et l'évolution de ces paramètres, et à transmettre les informations correspondantes. Il est souhaitable qu'ils comportent un volet suivi (y compris des impacts) et un volet prévision. L'objectif est de fournir des informations avant que survienne une sécheresse, ou dès le début de son apparition, afin de pouvoir déclencher (sur la base de valeurs seuils) les mesures d'un plan de gestion des risques destinées à réduire les impacts potentiels. La vigilance et la coordination sont vitales pour suivre ce phénomène à évolution lente.



Shutterstock / Eddie Hernandez

les communautés, les entreprises et les secteurs économiques si l'on veut prendre des mesures de nature à réduire les conséquences des épisodes à venir.

À la suite de la publication par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat d'un rapport spécial sur les phénomènes extrêmes (GIEC, 2012), il est apparu important de quantifier les pertes et les dommages causés par des événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse pour mettre en œuvre les politiques voulues, notamment au regard du programme de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Par ailleurs, vu l'ampleur des pertes liées aux sécheresses, l'amélioration du suivi et de la gestion est indispensable à l'application du Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015–2030) et à la réalisation des objectifs de développement durable. Une surveillance efficace et minutieuse des indicateurs hydrométéorologiques est essentielle pour cerner les risques, mettre en place des systèmes d'alerte précoce et gérer les impacts sectoriels. Face à ce constat, le Dix-septième Congrès météorologique mondial a adopté en juin 2015 la résolution 9 – Éléments de classification servant à répertorier les phénomènes extrêmes liés au temps, à l'eau et au climat. Cette résolution a lancé un processus de normalisation de l'information portant sur les risques et les aléas liés au temps, à l'eau, au climat, à la météorologie de l'espace et à l'environnement, et a accéléré la définition d'éléments de classification des phénomènes extrêmes. Le présent manuel contribuera de manière appréciable à cette démarche.

Le manuel présente les indicateurs et les indices les plus couramment employés dans les régions sujettes à la sécheresse dans le but de faire progresser le suivi, l'alerte précoce et la diffusion de l'information à l'appui des politiques de gestion des situations de sécheresse et des plans de préparation axés sur les risques. Les méthodes et les notions qui les accompagnent y sont brièvement exposées. Ce document est appelé à évoluer et à s'enrichir à mesure que de nouveaux indicateurs et indices seront élaborés et mis en pratique. Il intéressera les personnes qui souhaitent définir leurs propres indicateurs ou indices, comme celles qui désirent simplement utiliser des produits mis au point par d'autres. Le manuel s'adresse aux praticiens en général (services météorologiques ou hydrologiques, ministères, gestionnaires des ressources et autres décideurs à divers niveaux, par exemple) et se veut un point de départ qui décrit les indicateurs et les indices en usage dans le monde. L'optique retenue est celle de la gestion des risques de sécheresse, mais le propos n'est pas de recommander un ensemble «optimal» d'indicateurs ou d'indices. Le choix doit reposer sur les caractéristiques des sécheresses qui sont le plus étroitement liées aux impacts qui intéressent les parties prenantes.

Il ne s'agit pas ici d'analyser les impacts dans toute leur complexité ni les facteurs socio-économiques dans toute leur diversité. Les indicateurs et les indices présentés décrivent les caractéristiques hydrométéorologiques des sécheresses, sans considérer les facteurs socio-économiques et

environnementaux qu'il est parfois nécessaire de prendre en compte pour évaluer et anticiper les conséquences et les impacts. Le manuel est un ouvrage de référence qui donne un aperçu de la question et renvoie à des sources d'information complémentaire. Le Programme de gestion intégrée des sécheresses sera bientôt doté d'un service d'assistance technique.

2. DÉFINITIONS: INDICATEURS ET INDICES

Il est important de préciser ce que l'on entend par indicateurs et par indices de sécheresse.

Les **indicateurs** sont des variables ou des paramètres qui servent à décrire les conditions de sécheresse. Citons, par exemple, les précipitations, la température, l'écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l'humidité du sol et le manteau neigeux.

Les **indices** sont le plus souvent des représentations numériques de l'intensité des sécheresses, que l'on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques, dont les indicateurs précités. Ils mesurent l'état qualitatif d'une sécheresse à un emplacement donné pour une période donnée. Techniquement, ce sont eux aussi des indicateurs. La surveillance du climat à diverses échelles temporelles permet de détecter de brefs épisodes humides au sein de longues périodes de sécheresse ou de brefs épisodes secs au sein de longues périodes d'humidité. Les indices simplifient parfois certaines relations complexes et facilitent la communication d'informations à divers utilisateurs et parties prenantes, dont le public. Ils servent à établir l'intensité, l'emplacement, l'époque d'apparition et la durée d'un épisode de sécheresse. L'intensité désigne l'écart que présente un indice par rapport à la valeur normale. Un seuil d'intensité peut être fixé pour déterminer quand une sécheresse a commencé, quand elle s'est achevée et quelle zone a été touchée. L'emplacement désigne la zone géographique qui subit les conditions de sécheresse. L'époque d'apparition et la durée renvoient aux dates approximatives auxquelles ces conditions se sont installées et ont cessé. Les impacts dépendent de la conjonction du phénomène dangereux lui-même, des éléments qui y sont exposés (personnes, terres agricoles, réservoirs, sources d'approvisionnement en eau) et de la vulnérabilité de ces derniers. Les sécheresses antérieures peuvent avoir accentué la vulnérabilité, par exemple en provoquant la vente de biens de production pour parer à des besoins immédiats. L'époque d'apparition d'une sécheresse peut, autant que son intensité, déterminer les impacts subis. Une sécheresse de courte durée et d'intensité modérée qui survient alors qu'une culture bien établie est sensible à l'humidité a parfois un effet plus dévastateur sur le rendement qu'une sécheresse longue et intense qui survient à



un moment moins crucial du cycle de culture. Les indices de sécheresse – complétés par des informations sur les éléments exposés et sur leur vulnérabilité propre – sont donc essentiels pour suivre et anticiper les impacts. Certains présentent en outre l’immense avantage de fournir aux planificateurs et aux décideurs une valeur de référence historique qui donne une idée de la probabilité que survienne ou que se répète une sécheresse d’intensité particulière. Il faut savoir néanmoins que l’évolution du climat commencera à modifier les configurations passées.

Les informations tirées des indicateurs et des indices sont utiles pour planifier et concevoir des applications (évaluations des risques, systèmes d’alerte précoce, outils d’aide à la décision en vue d’atténuer la menace dans les zones touchées) à condition de connaître le régime climatique et la climatologie des sécheresses dans la région. De plus, divers indicateurs et indices peuvent servir à valider les résultats obtenus par modélisation, par assimilation ou par télédétection.

3. MÉTHODES DE SUIVI DE LA SÉCHERESSE ET D’APPUI À L’ALERTE PRÉCOCE ET À L’ÉVALUATION

Il existe essentiellement trois façons de surveiller les conditions de sécheresse et de faciliter l’alerte précoce et l’évaluation:

1. Utiliser un seul indicateur ou indice;
2. Utiliser plusieurs indicateurs ou indices;
3. Utiliser des indicateurs composites ou hybrides.

Par le passé, les décideurs et les scientifiques analysaient un seul indicateur ou indice car ils ne disposaient pas d’autres éléments de mesure ou manquaient de temps pour obtenir des données et calculer des indices dérivés ou d’autres valeurs. On observe depuis une vingtaine d’années, dans le monde entier, un intérêt grandissant pour la mise au point de indices construits à partir de divers indicateurs qui conviennent pour différentes applications et échelles spatio-temporelles. Ces nouveaux outils ont offert une plus grande palette de choix aux décideurs et aux dirigeants mais, jusqu’à récemment, on ne disposait toujours pas d’une méthode claire pour synthétiser les résultats sous la forme d’un message simple qui puisse être transmis au public. L’arrivée des systèmes d’information géographique et l’augmentation de la puissance de calcul et d’affichage des ordinateurs ont permis de superposer, de cartographier et de comparer plusieurs indicateurs ou indices. Pour une analyse plus poussée de la cartographie des indices et des indicateurs de sécheresse, on se reportera au chapitre 9 du *Guide d’utilisation de l’indice de précipitations normalisé* (OMM, 2012).



Le choix des indicateurs ou des indices peut être source de perplexité, surtout si ces valeurs s'inscrivent dans un plan global de lutte contre la sécheresse et doivent servir à déclencher des mesures de gestion. Il faut du temps, des essais et des erreurs pour déterminer ce qui convient le mieux pour tel ou tel emplacement, zone, bassin ou région. On a vu apparaître il y a une dizaine d'années une nouvelle catégorie d'indicateurs composites (parfois dits hybrides) qui offre la possibilité de fusionner plusieurs indicateurs ou indices, en procédant ou non à une pondération ou en recourant à la modélisation. L'idée est d'allier les avantages de diverses valeurs d'entrée tout en conservant une source d'information unique simple pour les décideurs, les dirigeants et le public. Sachant que l'évaluation de l'intensité d'une sécheresse est plus précise quand elle repose sur plusieurs indicateurs de la quantité d'eau disponible dans une zone ou une région donnée, la méthode composite ou hybride permet d'inclure davantage d'éléments dans la démarche.

L'objet de ce manuel n'est pas d'indiquer quels indicateurs ou indices particuliers il conviendrait d'intégrer ou d'appliquer pour orienter les mesures de gestion, mais il est important de comprendre leur fonction dans un système d'alerte précoce faisant partie intégrante d'une stratégie globale de gestion des risques de sécheresse. Les indicateurs ou indices fournissent en fait des valeurs seuils utiles pour guider l'action des décideurs et des dirigeants en vue de prévenir les risques.

Les seuils sont les valeurs d'un indicateur ou d'un indice qui servent à activer ou à suspendre chacun des niveaux d'un plan de lutte contre la sécheresse et les mesures d'atténuation ou d'intervention d'urgence qui y sont associées. Autrement dit, ils déclenchent l'action et permettent d'établir qui doit faire quoi et à quel moment, ce processus devant s'inscrire dans une politique ou un plan global de gestion de la sécheresse (OMM et GWP, 2014). Il est crucial de dresser une liste complète des valeurs seuils liées aux indicateurs ou indices et de les mettre en correspondance avec les éléments du plan d'action afin de coordonner l'intervention des différents organismes ou ministères. À défaut, on risque de beaucoup trop tarder à prendre les mesures nécessaires lorsqu'une sécheresse se profile dans une zone ou une région.

4. CHOIX DES INDICATEURS ET INDICES

Tout comme il n'existe pas de définition unique de la sécheresse, il n'existe pas d'indicateur ou d'indice qui correspondrait et conviendrait à tous les types de sécheresse, tous les climats et tous les secteurs touchés. Cet ouvrage n'a pas vocation à dire au lecteur quels sont les indicateurs et les indices les plus efficaces ni à quel moment il faut les employer; une multitude de facteurs doivent être pris en considération pour déterminer quel indicateur, indice ou seuil (séparément ou en combinaison avec d'autres) convient le mieux pour un besoin ou une application spécifique. La réponse aux questions suivantes pourra aider à faire apparaître les indicateurs et les indices les plus adaptés à la situation:

- Les indicateurs ou indices permettent-ils de déceler les conditions de sécheresse assez tôt pour qu'il soit possible de communiquer l'information et de coordonner les mesures de lutte ou d'atténuation?
- Les indicateurs ou indices sont-ils assez sensibles aux conditions climatiques, spatiales et temporelles pour établir le moment où débute et où cesse une sécheresse?
- Les indicateurs ou indices et les échelles d'intensité font-ils convenablement état des impacts observés sur place, dans la zone ou la région touchée?
- Utilise-t-on les mêmes indicateurs, indices et seuils pour le début et pour la fin d'une période de sécheresse? Il est crucial de rendre compte des deux situations.
- Emploie-t-on des indicateurs composites (hybrides) afin d'analyser un grand nombre de facteurs et de paramètres?
- Les données et les indices ou indicateurs qui en résultent sont-ils disponibles et stables? Autrement dit, détient-on une longue série de relevés qui donne aux planificateurs et aux décideurs de solides références historiques et statistiques?
- Les indicateurs ou indices sont-ils faciles à calculer? Les utilisateurs ont-ils assez de temps et de ressources humaines à affecter à l'exercice et ces moyens seront-ils maintenus en l'absence de sécheresse? Il est plus facile de justifier un tel dispositif s'il sert à surveiller tous les aspects du cycle hydrologique ou climatique, pas seulement les épisodes de sécheresse.

L'indicateur ou l'indice le plus simple à utiliser est sans doute celui qui est déjà produit en exploitation et qui est librement accessible, mais ce n'est pas forcément le meilleur ou le plus adapté. En dernier ressort, le choix revient aux utilisateurs à l'échelon régional, national ou local. Il est recommandé d'intégrer plusieurs indicateurs ou indices, ou un indicateur ou indice composite ou hybride, dans un système d'alerte précoce qui relève d'un plan global d'atténuation de la sécheresse. Cela suppose, en principe, de réaliser des analyses approfondies et d'adopter une approche expérimentale pour établir quels indicateurs sont le plus efficaces dans un régime climatique, une région, un bassin ou un lieu donné. Des recherches doivent également préciser pendant quelles saisons les indicateurs sont le plus adaptés et représentent le mieux les impacts observés sur le terrain. Les indicateurs ou indices choisis peuvent ensuite être recommandés ou intégrés dans un système d'alerte précoce, comme valeurs seuils reliées aux mesures d'atténuation ou d'intervention d'urgence prévues dans le plan de lutte contre la sécheresse.

5. SOMMAIRE DES INDICATEURS ET INDICES

On l'a dit, aucun indicateur ou indice ne peut, à lui seul, servir à définir les mesures qui s'imposent face à toutes les formes de sécheresse, compte tenu du nombre et de la diversité des secteurs touchés. Il est préférable d'utiliser des seuils différents qui analysent des valeurs d'entrée différentes. Le mieux est de déterminer, lors d'une étude préalable, quels indicateurs ou indices sont le plus adaptés au moment, à la zone et au type de climat et de sécheresse en cause. L'exercice prend du temps car on doit procéder par tâtonnements. La prise de décision en fonction des valeurs quantitatives d'un indice est essentielle pour évaluer convenablement et précisément l'intensité du phénomène et pour alimenter le système d'alerte précoce ou le plan global de lutte contre la sécheresse.

Les indicateurs et les indices cités dans le tableau 1 proviennent de documents publiés au titre du Programme de gestion intégrée des sécheresses ou par ses partenaires, ainsi que de recherches en ligne. Ils sont classés par type et facilité d'emploi et regroupés en cinq catégories: a) météorologie, b) humidité du sol, c) hydrologie, d) télédétection et e) valeurs composites ou modélisées. Bien que les indices soient classés par facilité d'emploi, il est possible que n'importe lequel ou l'ensemble d'entre eux convienne pour une application particulière, ou qu'aucun ne convienne, selon les connaissances et les besoins des utilisateurs et selon les données et les ressources informatiques à leur disposition. Les moyens à mettre en œuvre augmentent quand on passe du vert au jaune puis au rouge, comme cela est expliqué ci-après. Rappelons une fois encore que l'indicateur ou l'indice le plus simple n'est pas forcément le meilleur.

Un code de couleur indique la «facilité d'emploi» de chaque indicateur ou indice, comme suit:

Vert Un indice est codé vert si l'une au moins des conditions suivantes est remplie:

- Un logiciel ou programme d'exécution de l'indice est facilement et librement accessible;
- Il n'est pas nécessaire de détenir des données quotidiennes;
- Les données peuvent comporter des lacunes;
- La valeur de sortie est produite en exploitation et accessible en ligne.

Note: Bien que le codage vert de la «facilité d'emploi» puisse suggérer que l'indicateur ou l'indice est le plus simple à obtenir ou à utiliser, ce n'est pas nécessairement le meilleur pour une région ou une localité donnée. Il appartient à l'utilisateur de choisir les indicateurs ou les indices en fonction de l'application.

Jaune Un indice est codé jaune si l'une au moins des conditions suivantes est remplie:

- De multiples variables ou données d'entrée sont requises pour les calculs;
- Il n'existe pas de logiciel ou de programme d'exécution de l'indice dans le domaine public;
- Une seule variable ou donnée d'entrée est requise, mais il n'existe pas de logiciel;
- La production de l'indice exige des calculs de complexité minimale.

Rouge Un indice est codé rouge si l'une au moins des conditions suivantes est remplie:

- Un logiciel doit être élaboré pour calculer l'indice selon une méthode publiée;
- L'indice ou les éléments dérivés ne sont pas faciles à obtenir;
- L'indice est peu connu et peu employé, mais il pourrait convenir;
- L'indice renferme des données modélisées ou fait partie des calculs.

Tableau 1. Indicateurs et indices décrits dans le manuel

Météorologie	Page	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
AAI – Indice d'aridité anormale	11	Vert	P, T, EPT, ET	Disponible en exploitation pour l'Inde
Déciles	11	Vert	P	Facile à calculer; les exemples provenant de l'Australie sont utiles
KBDI – Indice de sécheresse de Keetch-Byram	12	Vert	P, T	Calculs fondés sur le climat de la zone visée
Rapport à la normale des précipitations	12	Vert	P	Calculs simples
SPI – Indice de précipitations normalisé	13	Vert	P	Recommandé par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
WASP – Anomalie pondérée des précipitations normalisées	15	Vert	P, T	Suivi de la sécheresse dans les régions tropicales à partir de données aux points de grille
AI – Indice d'aridité	15	Jaune	P, T	Peut aussi servir à la classification des climats
CMI – Indice d'humidité des cultures	16	Jaune	P, T	Valeurs hebdomadaires nécessaires
CZI – Indice Z chinois	16	Jaune	P	Destiné à améliorer le SPI
DAI – Indice de zone de sécheresse	17	Jaune	P	Donne une idée de la pluviosité pendant la mousson
DRI – Indice de détection de la sécheresse	17	Jaune	P, T	Requiert les valeurs mensuelles des températures et des précipitations
EDI – Indice de sécheresse efficace	18	Jaune	P	Programme disponible en contactant directement les concepteurs
HTC – Coefficient hydrothermique de Selyaninov	19	Jaune	P, T	Calculs simples, plusieurs exemples en Fédération de Russie
Indice Z de Palmer	19	Jaune	P, T, TED	Une des nombreuses valeurs produites par les calculs du PDSI
NDI – Indice de sécheresse de la NOAA	20	Jaune	P	Destiné surtout aux applications agricoles
PDSI – Indice de sécheresse de Palmer	20	Jaune	P, T, TED	Codé jaune en raison de la complexité des calculs et de la nécessité d'avoir des séries de données complètes
RAI – Indice d'anomalie de pluviosité	21	Jaune	P	Séries de données complètes requises
SAI – Indice d'anomalie normalisé	22	Jaune	P	Description des conditions régionales à l'aide de données ponctuelles
sc-PDSI – Indice de sécheresse de Palmer auto-étalonné	22	Jaune	P, T, TED	Codé jaune en raison de la complexité des calculs et de la nécessité d'avoir des séries de données complètes
SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé	23	Jaune	P, T	Séries de données complètes requises; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
ARID – Indice de référence pour la sécheresse agricole	23	Rouge	P, T, Mod.	Mis au point dans le sud-est des États-Unis d'Amérique, peu testé ailleurs
CSDI – Indice de sécheresse par type de culture	24	Rouge	P, T, Tr, V, Ray., TED, Mod., DC	Données de qualité requises pour de nombreuses variables, d'où une utilisation difficile
RDI – Indice de sécheresse du Bureau of Reclamation des États-Unis	25	Rouge	P, T, MN, RS, EF	Similaire au SWSI, mais intégrant la température

Humidité du sol	Page	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
SMA – Anomalie d'humidité du sol	25	Jaune	P, T, TED	Destiné à améliorer le bilan hydrique du PDSI
ETDI – Indice de déficit d'évapotranspiration	26	Rouge	Mod.	Calculs complexes et multiples valeurs d'entrée requises
SMDI – Indice de déficit d'humidité du sol	26	Rouge	Mod.	Valeurs hebdomadaires à différentes profondeurs; calculs compliqués
SWS – Stockage d'eau dans le sol	27	Rouge	TED, RS, TS, DHS	Interpolation difficile sur de vastes étendues en raison des variations du type de sol et de culture

Hydrologie	Page	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
PHDI – Indice de sécheresse hydrologique de Palmer	28	Jaune	P, T, TED	Séries de données complètes requises
SDI – Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial	28	Jaune	EF	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur l'écoulement
SRSI – Indice d'alimentation des réservoirs normalisé	29	Jaune	RS	Calculs similaires à ceux du SPI avec des données sur les réservoirs
SSFI – Indice d'écoulement fluvial normalisé	29	Jaune	EF	Utilise le programme du SPI avec des données sur l'écoulement fluvial
SWI – Indice de niveau d'eau normalisé	30	Jaune	ES	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur les eaux souterraines ou les niveaux dans les puits
SWSI – Indice d'apport d'eau de surface	30	Jaune	P, RS, EF, MN	Nombreuses méthodes et valeurs dérivées disponibles, mais la comparaison entre bassins est subordonnée à la méthode choisie
ADI – Indice de sécheresse agrégé	31	Rouge	P, ET, EF, RS, TED, MN	Pas de programme, calculs expliqués dans les articles scientifiques
SMRI – Indice de pluie et d'eau de fonte normalisé	32	Rouge	P, T, EF, Mod.	Peut être calculé avec ou sans données sur le manteau neigeux

Téledétection	Page	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
ESI – Indice de stress fondé sur l'évaporation	32	Vert	Sat., PET	N'est utilisé en exploitation que depuis peu
EVI – Indice de végétation amélioré	33	Vert	Sat.	Ne distingue pas le stress dû à la sécheresse des autres stress
NDVI – Indice de végétation par différence normalisé	33	Vert	Sat.	Calculé pour la plupart des emplacements
NDWI et LSWI – Indice de quantité d'eau par différence normalisé et indice de quantité d'eau en surface	34	Vert	Sat.	Produit en exploitation à partir des données de spectroradiomètres imageurs à moyenne résolution
TCI – Indice des conditions de température	35	Vert	Sat.	Généralement présenté avec les calculs du NDVI
VCI – Indice des conditions de végétation	35	Vert	Sat.	Généralement présenté avec les calculs du NDVI
VegDRI – Indice de réaction de la végétation à la sécheresse	36	Vert	Sat., P, T, TED, CT, ER	Prend en compte de nombreuses variables pour distinguer le stress dû à la sécheresse des autres stress subis par la végétation
VHI – Indice de santé de la végétation	36	Vert	Sat.	L'une des premières tentatives de suivre la sécheresse par téledétection

<i>Téledétection</i>	<i>Page</i>	<i>Facilité d'emploi</i>	<i>Paramètres d'entrée</i>	<i>Informations complémentaires</i>
WRSI et WRSI géospatial – Indice de satisfaction des besoins en eau	37	Vert	Sat., Mod., CC	Produit en exploitation pour de nombreux emplacements
SAVI – Indice de végétation ajusté pour le sol	38	Rouge	Sat.	N'est pas produit en exploitation

<i>Valeurs composites ou modélisées</i>	<i>Page</i>	<i>Facilité d'emploi</i>	<i>Paramètres d'entrée</i>	<i>Informations complémentaires</i>
CDI – Indicateur de sécheresse composé	38	Vert	Mod., P, Sat.	Utilise à la fois des données de surface et de téledétection
GIDMaPS – Système mondial intégré de suivi et de prévision de la sécheresse	39	Vert	Plus., Mod.	Produit opérationnel qui donne les valeurs mondiales de l'indice d'humidité du sol normalisé, du SPI et du MSDI
GLDAS – Système mondial d'assimilation des données sur les terres émergées	39	Vert	Plus., Mod., Sat.	Utile pour les régions où les données sont rares étant donné sa couverture mondiale
MSDI – Indice de sécheresse normalisé multivarié	40	Vert	Plus., Mod.	Disponible, mais une interprétation est nécessaire
USDM – Système américain de suivi de la sécheresse	41	Vert	Plus.	Disponible, mais une interprétation est nécessaire

Note: Les indicateurs et les indices sont classés par «facilité d'emploi» puis, à l'intérieur de chacune de ces catégories, par ordre alphabétique de leur désignation française ou de l'abréviation anglaise communément employée.

Légende:

CC = coefficient de culture
 CT = couverture terrestre
 DC = données de culture
 DHS = déficit hydrique du sol
 EF = écoulement fluvial
 ER = écorégion
 ES = eaux souterraines
 ET = évapotranspiration
 ETP = évapotranspiration potentielle
 MN = manteau neigeux

Mod. = valeur modélisée
 P = précipitations
 Plus. = plusieurs indicateurs
 Ray. = rayonnement solaire
 RS = réservoir
 Sat. = satellite
 T = température
 TED = teneur en eau disponible
 Tr = température de rosée ou point de rosée
 TS = type de sol
 V = vent

6. SOURCES D'INFORMATION SUR LES INDICATEURS ET INDICES

Il existe plusieurs sources d'information sur les nombreux indicateurs et indices qui sont employés aujourd'hui dans le monde. Le *National Drought Mitigation Center* (NDMC) de l'Université du Nebraska à Lincoln (États-Unis d'Amérique) compte une section spéciale qui décrit et explique certains indices d'usage courant; voir le site: <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro.aspx>.

L'OMM et le NDMC ont organisé en 2009, à l'Université du Nebraska à Lincoln, un atelier interrégional sur les indices et les systèmes d'alerte précoce applicables à la sécheresse. La Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse qui a été adoptée à cette occasion recommandait d'utiliser l'indice de précipitations normalisé pour établir l'existence d'une sécheresse météorologique (Hayes *et al.*, 2011). Le *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé* publié par l'OMM peut être téléchargé à l'adresse suivante: http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_fr_2012.pdf.

Par la suite, l'OMM et le Bureau des Nations Unies pour la prévention des catastrophes ont organisé, de concert avec la Confédération hydrographique du Segura et le Service météorologique espagnol, une réunion d'experts sur les indices de sécheresse appliqués à l'agriculture, qui s'est tenue à Murcie (Espagne) en 2010 (Sivakumar *et al.*, 2011). Des scientifiques du monde entier, représentant toutes les régions de l'OMM, ont analysé 34 indices qui servent à estimer les impacts de la sécheresse sur l'agriculture, en vue de mettre en lumière leurs points forts et leurs points faibles. Le compte rendu de leurs travaux, rassemblant 17 articles, a été publié sous le titre *Agricultural Drought Indices: Proceedings of an Expert Meeting* et est disponible à l'adresse suivante: <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm11/agm11.pdf>.

On consultera également avec profit les références données à la fin du présent ouvrage, par exemple Heim (2002), Keyantash et Dracup (2002) ou Zargar *et al.* (2011), qui passent en revue les indices de sécheresse utilisés aujourd'hui et par le passé.

Pour toute assistance concernant le choix, l'interprétation ou l'application d'indicateurs et d'indices, s'adresser au Programme de gestion intégrée des sécheresses par l'intermédiaire de son site Web (<http://www.droughtmanagement.info/>) ou par courriel (idmp@wmo.int).



7. INDICATEURS ET INDICES

7.1 Météorologie

Désignation de l'indice: AAI – Indice d'aridité anormale

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Élaboré en Inde par le Service météorologique national.

Caractéristiques: Indice en temps réel fondé sur le bilan hydrique. L'indice d'aridité (AI) est calculé pour une ou deux semaines. L'aridité réelle pendant la période étudiée est comparée à l'aridité normale pour la période. Une valeur négative indique un excès d'humidité, une valeur positive un déficit d'humidité.

Paramètres d'entrée: Évapotranspiration réelle et évapotranspiration potentielle calculée, ce qui exige des données sur la température, le vent et le rayonnement solaire.

Applications: Impacts de la sécheresse sur l'agriculture, en particulier dans les zones tropicales où le climat comporte des saisons sèches et humides marquées. La méthode convient aux saisons culturales d'été comme d'hiver.

Points forts: L'indice a été conçu pour l'agriculture, les calculs sont simples et la description de la sécheresse (légère, modérée, intense) renvoie à l'écart par rapport aux valeurs normales. La réaction est rapide grâce au pas de temps hebdomadaire.

Points faibles: L'indice ne convient pas pour les phénomènes qui s'étendent sur une longue période ou sur plusieurs saisons.

Sources d'information: <http://imdpune.gov.in/hydrology/methodology.html>.

Référence: http://www.wamis.org/agm/gamp/GAMP_Chap06.pdf.

Désignation de l'indice: Déciles

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Méthode mathématique simple décrite en 1967 par Gibbs et Maher dans le cadre de leurs travaux au Bureau météorologique australien.

Caractéristiques: La fréquence et la répartition des précipitations sont ordonnées sur l'ensemble de la période des relevés effectués à l'emplacement. Le premier décile renferme les hauteurs de précipitation les plus basses qui composent 10 % de l'ensemble des valeurs; le cinquième décile correspond à la médiane. Une échelle d'humidité est également fournie. La méthode peut être appliquée aux valeurs quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles, saisonnières ou annuelles, car elle offre une souplesse dans la comparaison des données récentes aux relevés anciens pour n'importe quelle période.

Paramètres d'entrée: Précipitations uniquement, échelle temporelle flexible.

Applications: Comme il est possible de choisir différentes échelles temporelles et différents pas de temps, la méthode des déciles s'applique aux différents types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique).

Points forts: Une seule variable étant analysée, la méthode est simple et s'adapte à de multiples situations. À l'aide de seuils soigneusement définis, les données récentes sont placées dans une

perspective historique afin de déterminer le degré de sécheresse. La méthode est utile dans les conditions d'humidité comme de sécheresse.

Points faibles: Comme d'autres indicateurs qui reposent uniquement sur les précipitations, il ne prend pas en considération l'impact des températures et d'autres variables sur l'évolution de la sécheresse. La méthode est plus efficace quand on détient une longue série de relevés, car un grand nombre de périodes sèches et de périodes humides sont incluses dans la distribution.

Sources d'information: Il n'existe pas de logiciel particulier mais plusieurs outils en ligne permettent de calculer les déciles. Il importe de connaître la méthodologie sous-jacente, car diverses techniques statistiques peuvent être employées avec les données météorologiques, <http://drinc.ewra.net/>.

Référence: Gibbs, W.J. et J.V. Maher, 1967: *Rainfall Deciles as Drought Indicators*, Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Melbourne (Australie).

Désignation de l'indice: KBDI – Indice de sécheresse de Keetch-Byram

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux menés à la fin des années 1960 par Keetch et Byram à la Division des services forestiers du Département de l'agriculture des États-Unis. Il s'agit avant tout d'un indice d'incendie.

Caractéristiques: Mis au point pour déceler les stades précoces de la sécheresse par une méthode uniforme adaptée au climat de la région. Il indique l'effet net de l'évapotranspiration et des précipitations sur le déficit d'humidité dans les couches superficielles du sol et donne une idée du volume de précipitations nécessaire pour saturer le sol et éliminer le stress hydrique.

Paramètres d'entrée: Valeurs quotidiennes des températures maximales et des précipitations. Des tableaux mettent l'indice en relation avec divers régimes de précipitations selon le climat local.

Applications: Destiné à surveiller les risques d'incendie dus à la sécheresse, il s'est avéré utile en agriculture car la mesure de l'humidité du sol présente un lien direct avec le stress hydrique que subissent les cultures.

Points forts: L'indice calcule le déficit d'humidité dans un secteur et l'échelle peut être ajustée pour connaître les conditions à un emplacement précis. Les calculs sont simples et la méthode est facile à utiliser.

Points faibles: L'indice suppose qu'il existe une limite à l'humidité disponible et que certaines conditions climatiques doivent être réunies pour que se développe une sécheresse, ce qui n'est pas forcément vrai à tous les emplacements.

Sources d'information: La méthode et les calculs sont bien décrits dans les articles scientifiques. De nombreuses cartes sont disponibles en ligne pour divers emplacements, <http://www.wfas.net/index.php/keetch-byram-index-moisture--drought-49>.

Référence: Keetch, J.J. et G.M. Byram, 1968: *A Drought Index for Forest Fire Control*, United States Department of Agriculture Forest Service Research Paper SE-38, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC).

Désignation de l'indice: Rapport à la normale des précipitations

Facilité d'emploi: Vert

Origine: La fraction d'une grandeur quelconque est une simple formule mathématique. L'origine exacte ou le premier cas d'emploi pour décrire les anomalies pluviométriques n'est pas connu.

Caractéristiques: Un simple calcul permet de comparer n'importe quelles périodes pour n'importe quel emplacement. L'indice peut être établi avec les valeurs quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles, saisonnières ou annuelles, ce qui convient à beaucoup d'utilisateurs. On l'obtient en divisant les précipitations réelles par les précipitations normales pour la période analysée et en multipliant le quotient par 100.

Paramètres d'entrée: Précipitations relevées au cours d'une période adaptée à l'échelle temporelle choisie. Il est préférable d'avoir des données sur 30 ans ou plus pour calculer les valeurs normales.

Applications: L'indice peut servir à détecter et à suivre divers impacts de la sécheresse.

Points forts: Il s'agit d'une méthode répandue, rapide et simple qui fait appel aux mathématiques élémentaires.

Points faibles: Certains utilisateurs peuvent confondre l'établissement des valeurs normales avec le calcul des valeurs moyennes des précipitations à un emplacement. Il est difficile de comparer des régimes climatiques différents, surtout lorsque les saisons humides et sèches sont marquées.

Référence: Hayes, M.J., 2006: *Drought Indices*, Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, John Wiley & Sons, Inc., doi:10.1002/0471743984.vse8593, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471743984.vse8593/abstract;jsessionid=CA39E5A4F67AA81580F505CBB07D2424.f01t04>.

Désignation de l'indice: SPI – Indice de précipitations normalisé

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Fruit des recherches et des travaux conduits en 1992 par McKee et ses collaborateurs à l'Université d'État du Colorado (États-Unis). Il a été présenté pour la première fois lors de la huitième Conférence sur la climatologie appliquée, en janvier 1993. L'indice repose sur les rapports de la fréquence et de la durée des sécheresses avec les échelles temporelles.

En 2009, l'OMM a recommandé d'utiliser principalement le SPI pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique (Hayes, 2011). En prônant un large emploi du SPI, elle montrait la voie aux pays qui cherchaient à se doter d'un certain niveau d'alerte rapide à la sécheresse.

Caractéristiques: L'indice utilise les relevés historiques de précipitations à un emplacement donné pour calculer la probabilité de précipitations à n'importe quelle échelle temporelle comprise entre 1 et 48 mois, voire plus. Comme avec d'autres indicateurs climatiques, la série chronologique servant aux calculs peut être plus ou moins longue. Guttman (1998, 1999) fait valoir que, si l'on dispose d'une longue série chronologique renfermant des données additionnelles, la distribution de probabilité sera plus fiable car davantage d'épisodes de sécheresse extrême et d'humidité extrême seront inclus. Il est possible de calculer l'indice SPI à partir de données sur 20 ans seulement, mais il est préférable d'avoir une série d'au moins 30 ans, même en tenant compte des valeurs manquantes.

L'indice comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives, qui sont en corrélation directe avec les épisodes humides et secs. Dans le cas d'une sécheresse, l'intérêt se porte avant tout sur les extrémités de la distribution de précipitations, en particulier les épisodes extrêmement secs, qui sont des phénomènes rares compte tenu du climat de la région à l'étude.

Quelle que soit la période visée, une sécheresse sévit quand l'indice SPI présente de façon continue une valeur négative et atteint -1 . On considère qu'elle se poursuit jusqu'à ce que l'indice remonte à 0. Selon McKee *et al.* (1993), la sécheresse commence à une valeur de -1 ou moins, mais il n'existe pas de norme en la matière; certains chercheurs fixent le seuil à moins de 0 mais sans descendre jusqu'à -1 , alors que d'autres considèrent qu'une sécheresse débute quand l'indice est inférieur à -1 .

Vu l'utilité et la souplesse de la méthode, l'indice peut être calculé même si la période de relevés comporte des lacunes pour un emplacement. En principe, la série devrait être aussi complète que possible, mais les calculs aboutissent à une valeur «nulle» s'il manque trop de données et ils

reprennent à mesure que les données sont disponibles. L'indice est généralement établi pour des périodes allant jusqu'à 24 mois et sa souplesse permet de multiples applications visant les conditions qui touchent l'agriculture, les ressources en eau et d'autres secteurs.

Paramètres d'entrée: Précipitations. La majorité des utilisateurs exploitent des données mensuelles, mais les programmes informatiques sont capables de fournir des résultats avec des valeurs quotidiennes et hebdomadaires. La méthode reste la même qu'il s'agisse de données quotidiennes, hebdomadaires ou mensuelles.

Applications: Du fait qu'il peut être calculé à diverses échelles temporelles, l'indice se prête à de nombreuses applications. Selon l'impact étudié, les valeurs SPI sur 3 mois ou moins sont utiles pour le suivi ordinaire des sécheresses, les valeurs sur 6 mois ou moins pour la surveillance des impacts agricoles et les valeurs sur 12 mois ou plus pour la détection des impacts hydrologiques. Il est possible de calculer l'indice avec des jeux de données de précipitations aux points de grille, de sorte que son emploi n'est pas réservé aux utilisateurs qui détiennent des données émanant de stations.

Points forts: Le plus grand avantage de l'indice SPI est qu'il repose uniquement sur les données de précipitations, ce qui le rend très facile à calculer et à utiliser. Il s'applique à tous les régimes climatiques et peut être comparé dans des climats très différents. La possibilité d'effectuer les calculs pour de courtes périodes dont les relevés sont incomplets est également appréciable pour les régions pour lesquelles on manque de données ou de jeux de données homogènes à long terme. Le programme de calcul est facile à obtenir et à exécuter. Le NDMC a fourni à plus de 200 pays un logiciel destiné aux ordinateurs personnels. La possibilité de calculer l'indice sur des échelles différentes permet un large éventail d'applications. Un grand nombre d'articles scientifiques ont été consacrés à l'indice SPI, dans lesquels l'utilisateur débutant trouvera une foule d'informations utiles.

Points faibles: Les précipitations étant les seules données d'entrée, l'indice ne tient pas compte des températures, qui conditionnent grandement le bilan hydrique global et l'utilisation de l'eau dans une région. Du fait de cet inconvénient, il est parfois délicat de comparer des événements dont les valeurs SPI sont similaires mais dont les scénarios de température diffèrent. Par ailleurs, la possibilité de procéder aux calculs avec des relevés qui s'étendent sur une courte période ou qui comptent de nombreuses lacunes risque de conduire à un emploi abusif, car le programme fournit une valeur quelles que soient les données d'entrée. L'indice suppose une distribution antérieure, ce qui ne convient peut-être pas dans tous les cas, surtout lorsqu'on étudie des épisodes de courte durée ou les phases d'installation, ou de régression, de la sécheresse. Il existe de nombreuses versions de l'indice SPI offertes dans divers logiciels, outre le code source procuré par le NDMC. Il importe de vérifier l'intégrité de ces algorithmes et la concordance des sorties avec les versions publiées.

Sources d'information: Le programme peut être exécuté avec des ordinateurs personnels sous Windows, <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

Références:

Guttman, N.B., 1998: «Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index», *Journal of the American Water Resources Association*, 34:113–121, doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.

Guttman, N.B., 1999: «Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm», *Journal of the American Water Resources Association*, 35:311–322, doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.

Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall et M. Widhalm, 2011: «The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4):485–488.

McKee, T.B., N.J. Doesken et J. Kleist, 1993: *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 janvier 1993, Anaheim, CA. Boston, MA, American Meteorological Society.

Organisation météorologique mondiale, 2012: *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé (OMM-N° 1090)*, Genève.

Wu, H., M.J. Hayes, D.A. Wilhite et M.D. Svoboda, 2005: «The effect of the length of record on the Standardized Precipitation Index calculation», *International Journal of Climatology*, 25(4):505–520.

Désignation de l'indice: WASP – Anomalie pondérée des précipitations normalisées

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Mis au point par Lyon pour suivre les précipitations dans les zones tropicales, jusqu'à 30° de latitude de l'équateur.

Caractéristiques: Il utilise les données mensuelles de précipitations aux points de grille, à une résolution de 0,5° × 0,5°, et repose sur les sommes mobiles sur 12 mois des anomalies de précipitations mensuelles normalisées et pondérées.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles et annuelles des précipitations.

Applications: Il est surtout employé dans les régions tropicales humides pour suivre le développement d'une sécheresse en tenant compte des périodes sèches et humides propres au régime climatique. Il peut servir à surveiller les sécheresses qui nuisent à l'agriculture et à d'autres secteurs.

Points forts: Les calculs sont assez simples car les précipitations sont les seules données d'entrée.

Points faibles: L'efficacité laisse à désirer dans les régions désertiques. Il peut être difficile d'obtenir les données de précipitations aux points de grille dans un cadre opérationnel.

Sources d'information: Les méthodes et les calculs sont décrits et expliqués dans les articles scientifiques, http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Precipitation/WASP_Indices.html.

Référence: Lyon, B., 2004: «The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought», *Geophysical Research Letters*, 31:L21204, doi:10.1029/2004GL020901.

Désignation de l'indice: AI – Indice d'aridité

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Issu des travaux de De Martonne en 1925; l'aridité est définie comme le rapport entre les précipitations et les températures moyennes.

Caractéristiques: L'indice peut servir à la classification des climats de diverses régions, car le rapport entre les précipitations et les températures permet d'établir le régime climatique d'un secteur. On peut le calculer sur une base mensuelle pour déterminer le début d'une sécheresse, car il tient compte de l'incidence des températures en plus de celle des précipitations.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des précipitations et des températures moyennes. Pour la classification des climats, on utilise les valeurs annuelles.

Applications: Il est surtout employé pour analyser le développement d'une sécheresse à des échelles temporelles assez courtes, ce qui aide à détecter et à suivre les impacts dans le domaine agricole et sur le plan météorologique.

Points forts: Les calculs sont simples, faisant intervenir deux paramètres seulement. La méthode est souple, car l'analyse peut porter sur plusieurs pas de temps.

Points faibles: L'indice ne tient pas compte du fait que les conditions de sécheresse se reportent d'une année à l'autre. Il peut être lent à réagir dans certains climats.

Références:

Baltas, E., 2007: «Spatial distribution of climatic indices in northern Greece», *Meteorological Applications*, 14:69–78.

de Martonne, E., 1925: *Traité de géographie physique*, 11^e édition, Paris, Colin.

Désignation de l'indice: CMI – Indice d'humidité des cultures

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Prolongement des travaux conduits par Palmer au début des années 1960, il est d'ordinaire calculé sur une base hebdomadaire, avec le PDSI (indice de sécheresse de Palmer), pour décrire les conditions de sécheresse à court terme influant sur l'agriculture.

Caractéristiques: Certaines des faiblesses du PDSI ayant été mises au jour, Palmer a tenté d'y remédier en élaborant cet indice, qui vise expressément les impacts de la sécheresse sur l'agriculture, dans la mesure où il réagit très vite à une évolution rapide des conditions. On calcule le déficit éventuel en soustrayant l'écart entre l'évapotranspiration potentielle et l'humidité.

Paramètres d'entrée: Précipitations hebdomadaires, températures hebdomadaires moyennes et valeur CMI de la semaine précédente.

Applications: L'indice sert à suivre les sécheresses lorsqu'on s'intéresse avant tout aux impacts sur l'agriculture.

Points forts: Le résultat est pondéré, ce qui permet de comparer différents régimes climatiques. L'indice réagit sans délai à une évolution rapide des conditions.

Points faibles: Comme il a été élaboré spécialement pour les régions céréalières des États-Unis, l'indice peut donner à tort l'impression d'un redressement après un long épisode de sécheresse, alors que les améliorations à court terme peuvent être insuffisantes pour compenser les problèmes à long terme.

Sources d'information: <https://www.drought.gov/drought/content/products-current-drought-and-monitoring-drought-indicators/crop-moisture-index>.

Référence: Palmer, W.C., 1968: «Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the Crop Moisture Index», *Weatherwise*, 21:156–161.

Désignation de l'indice: CZI – Indice Z chinois

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Mis au point en Chine, il s'appuie sur le SPI dont il accroît encore la simplicité de calcul. Le score statistique Z peut servir à déceler et à suivre les périodes de sécheresse. L'indice a été utilisé pour la première fois en 1995 par le Centre climatologique national chinois.

Caractéristiques: Il est similaire au SPI dans la mesure où les précipitations servent à déterminer l'existence de conditions sèches ou humides, en supposant que les valeurs suivent la loi de Pearson type III. Le pas de temps, de 1 à 72 mois, convient à des sécheresses de différentes durées.

Paramètres d'entrée: Précipitations mensuelles.

Applications: Elles sont comparables à celles du SPI et permettent de suivre les épisodes secs et humides à de multiples échelles temporelles.

Points forts: Les calculs sont simples et peuvent être répétés avec plusieurs pas de temps. L'indice s'applique à la fois aux périodes de sécheresse et aux périodes d'humidité et, comme le SPI, tolère des lacunes dans les données.

Points faibles: Les scores Z n'exigent pas d'ajustement en les adaptant à des distributions gamma ou Pearson type II; il pourrait en résulter une moins bonne représentation des échelles temporelles réduites qu'avec le SPI.

Sources d'information: Toutes les explications et méthodes de calcul de l'indice peuvent être consultées en ligne, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.658/pdf>.

Références:

Edwards, D.C. et T.B. McKee, 1997: «Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales», *Atmospheric Science*, 634:1–30.

Wu, H., M.J. Hayes, A. Weiss et Q. Hu, 2001: «An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-score», *International Journal of Climatology*, 21:745–758.

Désignation de l'indice: DAI – Indice de zone de sécheresse

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Élaboré à la fin des années 1970 par Bhalme et Mooley à l'Institut indien de météorologie tropicale.

Caractéristiques: Méthode visant à mieux comprendre les pluies de mousson en Inde; les précipitations mensuelles servent à déterminer les périodes de sécheresse et de crue. La comparaison des valeurs mensuelles pendant la période critique de la mousson indique l'intensité des épisodes secs et humides. La gravité de la sécheresse est déduite de l'apport des précipitations relevées chaque mois au total de la mousson.

Paramètres d'entrée: Précipitations mensuelles pendant la mousson.

Applications: L'indice sert à déterminer si la mousson a été normale ou insuffisante, ou si des inondations pourraient survenir. L'anticipation des conditions de sécheresse est un bon indicateur précoce des risques de famine.

Points forts: L'indice est nettement centré sur la mousson dans la zone tropicale de l'Inde.

Points faibles: Il ne peut guère être appliqué à d'autres régions ou régimes climatiques.

Sources d'information: Les explications et formules mathématiques concernant cet indice figurent dans l'article d'origine, <http://moeseprints.incois.gov.in/1351/1/large%20scale.pdf>.

Référence: Bhalme, H.N. et D.A. Mooley, 1980: «Large-scale droughts/floods and monsoon circulation», *Monthly Weather Review*, 108:1197–1211.

Désignation de l'indice: DRI – Indice de détection de la sécheresse

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Travaux entrepris par Tsakiris et Vangelis à l'Université technique nationale d'Athènes (Grèce).

Caractéristiques: Cet indice de sécheresse renferme une équation de bilan hydrique simplifiée qui tient compte des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Il produit trois valeurs: la valeur

initiale, la valeur standardisée et la valeur normalisée. La valeur normalisée est similaire à l'indice SPI et peut lui être comparée directement. Toutefois, le DRI est plus représentatif car il prend en considération l'ensemble du bilan hydrique, pas seulement les précipitations.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des températures et des précipitations.

Applications: Situations dans lesquelles on s'intéresse avant tout aux impacts sur l'agriculture ou sur les ressources en eau.

Points forts: Grâce à l'intégration de l'évapotranspiration potentielle, le bilan hydrique global de la région est mieux représenté que dans le SPI, ce qui donne une meilleure idée de l'intensité de la sécheresse. L'indice peut être calculé avec de nombreux pas de temps, comme le SPI. Toutes les formules mathématiques nécessaires ont été publiées.

Points faibles: Des erreurs peuvent se glisser dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle quand l'estimation tient uniquement compte des températures. Aux échelles mensuelles, la réaction de l'indice peut être trop lente dans le cas de phénomènes qui se développent rapidement.

Sources d'information: Le logiciel est disponible en ligne à l'adresse suivante: <http://drinc.ewra.net/>.

Référence: Tsakiris, G. et H. Vangelis, 2005: «Establishing a drought index incorporating evapotranspiration», *European Water*, 9/10:3–11.

Désignation de l'indice: EDI – Indice de sécheresse efficace

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Travaux réalisés par Byun et Wilhite, de concert avec le personnel du NDMC.

Caractéristiques: Plusieurs paramètres sont calculés à partir des précipitations quotidiennes: les précipitations efficaces, la moyenne quotidienne des précipitations efficaces, l'écart des précipitations efficaces et la valeur normalisée de ces écarts. Ils servent à déterminer le début et la fin d'une période de déficit hydrique. À l'aide des paramètres d'entrée, l'indice peut être calculé pour n'importe quel emplacement dans le monde pourvu que les résultats soient normalisés à des fins de comparaison, définissant clairement le début, la fin et la durée de la sécheresse. Au moment où il a été élaboré, la plupart des indices étaient calculés à partir de données mensuelles; le passage aux données quotidiennes était une nouveauté et un aspect important de l'utilité de l'indice.

Paramètres d'entrée: Précipitations quotidiennes.

Applications: Il s'agit d'un bon indice pour le suivi opérationnel des conditions de sécheresse météorologique et de sécheresse agricole, car les calculs sont actualisés tous les jours.

Points forts: Comme les seules données d'entrée nécessaires sont les précipitations, il est possible de calculer l'indice pour tout emplacement où ces dernières sont mesurées. Le programme est accompagné de documents qui expliquent la démarche. L'indice étant normalisé, les valeurs obtenues dans tous les régimes climatiques se prêtent à des comparaisons. L'EDI se révèle efficace pour détecter le début, la fin et la durée des périodes de sécheresse.

Points faibles: L'incidence des températures sur la sécheresse n'est pas directement prise en compte puisque l'indice repose sur les seules précipitations. L'utilisation de données quotidiennes peut rendre l'application difficile en exploitation, car une telle fréquence d'actualisation n'est pas toujours possible.

Sources d'information: Les auteurs indiquent que l'on peut obtenir le programme en les contactant directement. Les calculs sont décrits dans l'article original cité en référence plus bas. L'EDI fait partie d'un ensemble d'indices calculés par le progiciel SPATSIM (modélisation à partir de séries chronologiques et d'informations spatiales), http://www.preventionweb.net/files/1869_VL102136.pdf.

Référence: Byun, H.R. et D.A. Wilhite, 1996: «Daily quantification of drought severity and duration», *Journal of Climate*, 5:1181–1201.

Désignation de l'indice: HTC – Coefficient hydrothermique de Selyaninov

Facilité d'emploi: jaune

Origine: Mis au point par Selyaninov en Fédération de Russie, sur la base du climat dans la région.

Caractéristiques: L'indice, qui utilise les données de températures et de précipitations, est sensible aux conditions de sécheresse propres au régime climatique étudié. Il est assez souple pour se prêter aux applications mensuelles comme aux applications décennales.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des températures et des précipitations.

Applications: Utile pour suivre les conditions de sécheresse agricole, il a également été employé pour la classification des climats.

Points forts: Les calculs sont simples et les valeurs peuvent être appliquées aux conditions agricoles pendant la saison de croissance.

Points faibles: Les calculs ne tiennent pas compte de l'humidité du sol.

Sources d'information: De plus amples renseignements figurent sur le site Web de l'Institut national de météorologie agricole de la Fédération de Russie, <http://cxm.obninsk.ru/index.php?id=154>, et sur celui de l'Atlas interactif de l'éco-agriculture de la Russie et des pays limitrophes, http://www.agroatlas.ru/en/content/Climatic_maps/GTK/GTK/index.html.

Référence: Selyaninov, G.T., 1928: «About climate agricultural estimation», *Proceedings on Agricultural Meteorology*, 20:165–177.

Désignation de l'indice: Indice Z de Palmer

Facilité d'emploi: jaune

Origine: Plus sensible que le PDSI aux conditions de courte durée, il est généralement calculé à des échelles beaucoup plus réduites, ce qui permet de déceler les sécheresses qui s'installent rapidement. Issu des travaux initiaux menés par Palmer au début des années 1960, il est d'ordinaire calculé sur une base mensuelle en même temps que le PDSI, en tant qu'anomalie d'humidité.

Caractéristiques: Il est parfois appelé indice d'anomalie d'humidité et les valeurs qui en sont dérivées procurent une base de comparaison des anomalies relatives dans une région, sur le plan de la sécheresse comme de l'humidité, avec l'ensemble des relevés détenus pour l'emplacement.

Paramètres d'entrée: L'indice est dérivé du PDSI et les valeurs Z font partie des valeurs de sortie de ce dernier.

Applications: Il permet de comparer la période en cours à d'autres épisodes de sécheresse connus. Il peut aussi servir à déterminer la fin d'une sécheresse, quand on détermine la quantité d'humidité requise pour revenir à des conditions quasi normales, selon la définition qu'en donne Palmer.

Points forts: Identiques à ceux du PDSI. Plusieurs articles scientifiques renferment des informations sur l'indice Z de Palmer. L'inclusion de données sur le sol et le calcul du bilan hydrique total en font un indice robuste pour déceler la sécheresse.

Points faibles: Identiques à ceux du PDSI. La nécessité de disposer d'une série complète de données risque de poser des problèmes. L'échelle temporelle est d'environ neuf mois, ce qui crée un retard

dans la détection des conditions de sécheresse à partir d'une simplification du facteur d'humidité du sol dans les calculs. Le retard peut être de plusieurs mois, ce qui présente un inconvénient pour détecter une sécheresse qui se forme rapidement. L'aspect saisonnier est également problématique, car l'indice n'intègre pas bien les précipitations solides et les sols gelés.

Sources d'information: On peut communiquer avec le NDMC pour obtenir le programme de la série d'indices de Palmer, <http://drought.unl.edu/>.

Référence: Palmer, W.C., 1965: *Meteorological Drought*, Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington.

Désignation de l'indice: NDI – Indice de sécheresse de la NOAA

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Défini au début des années 1980 par le Service commun de météorologie agricole, dans le cadre d'études réalisées par le Département de l'agriculture des États-Unis sur la possibilité d'estimer la production agricole dans le monde à partir de données météorologiques et climatologiques.

Caractéristiques: Indice fondé sur les précipitations, dans lequel les hauteurs réelles mesurées sont comparées aux valeurs normales de la saison de croissance. Une fois les moyennes hebdomadaires calculées, on établit et on compare la moyenne chevauchante sur huit semaines des hauteurs moyennes mesurées. Si les précipitations réelles se situent à plus de 60 % des précipitations normales pour la période de huit semaines, on considère que, pour la semaine en cours, le stress hydrique est faible ou absent. Si un stress apparaît, il perdure jusqu'à ce que les précipitations réelles atteignent 60 % ou plus des valeurs normales.

Paramètres d'entrée: Précipitations mensuelles converties en valeurs hebdomadaires.

Applications: Indicateur de conditions de sécheresse ayant un impact sur l'agriculture.

Points forts: Les précipitations sont les seules données d'entrée, selon un pas de temps mensuel. Les calculs et la méthode sont simples.

Points faibles: Il faut détenir des données sur au moins 30 ans pour établir les valeurs mensuelles normalisées qui servent à calculer les valeurs hebdomadaires. Les applications sont très spécifiques, dans le domaine de l'agriculture et de la progression et du développement des cultures.

Référence: Strommen, N.D. et R.P. Motha, 1987: «An operational early warning agricultural weather system», in D.A. Wilhite, W.E. Easterling et D.A. Wood (dir.), *Planning for Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability*, Boulder (CO), Westview Press.

Désignation de l'indice: PDSI – Indice de sécheresse de Palmer

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Mis au point dans les années 1960. C'est l'une des premières tentatives de déceler les sécheresses en ne se limitant pas aux données relatives aux précipitations. Palmer devait déterminer comment intégrer les données sur les températures et les précipitations à des informations sur le bilan hydrique dans les régions agricoles des États-Unis. Le PDSI a été pendant des années le seul indice de sécheresse utilisé en exploitation et il est encore couramment employé dans le monde.

Caractéristiques: L'indice se calcule à partir des valeurs mensuelles des températures et des précipitations, complétées par des informations sur la capacité de rétention d'eau des sols. Il tient compte de l'humidité reçue (précipitations) mais aussi de l'humidité présente dans le sol, étant donné la perte d'humidité que peuvent provoquer les températures.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des températures et des précipitations. On peut les compléter par des données sur la capacité de rétention d'eau du sol, mais des valeurs par défaut sont disponibles. Une série complète de relevés des températures et des précipitations est nécessaire.

Applications: Élaboré principalement pour déceler les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture, le PDSI a également servi à détecter et suivre les sécheresses qui ont d'autres types d'impacts. Vu son ancienneté, il existe de nombreux exemples de son emploi au fil des ans.

Points forts: L'indice est utilisé dans le monde entier et le programme et les valeurs de sortie sont faciles à obtenir. De nombreux articles scientifiques lui sont consacrés. L'inclusion de données sur le sol et le calcul du bilan hydrique total en font un indice robuste pour déceler la sécheresse.

Points faibles: La nécessité de disposer d'une série complète de données risque de poser des problèmes. L'échelle temporelle est d'environ neuf mois, ce qui crée un retard dans la détection des conditions de sécheresse à partir d'une simplification du facteur d'humidité du sol dans les calculs. Le retard peut être de plusieurs mois, ce qui présente un inconvénient pour détecter une sécheresse qui se forme rapidement. L'aspect saisonnier est également problématique, car l'indice n'intègre pas bien les précipitations solides et les sols gelés.

Sources d'information: <http://hydrology.princeton.edu/data.pdsi.php>.

Références:

Alley, W.M., 1984: «The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions», *Journal of Applied Meteorology*, 23:1100–1109.

Palmer, W.C., 1965: *Meteorological Drought*, Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington.

Désignation de l'indice: RAI – Indice d'anomalie de pluviosité

Facilité d'emploi: jaune

Origine: Travaux entrepris au début des années 1960 par van Rooy.

Caractéristiques: L'indice utilise les valeurs normalisées des précipitations établies à partir de l'historique des relevés à une station particulière. La comparaison avec la période courante donne une perspective historique aux valeurs de sortie.

Paramètres d'entrée: Précipitations.

Applications: L'indice permet d'analyser les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture, les ressources en eau et d'autres secteurs, car, du fait de sa souplesse, il peut être établi à différentes échelles temporelles.

Points forts: Il est facile à calculer, ne comporte qu'un paramètre d'entrée (les précipitations) et peut être analysé aux échelles mensuelles, saisonnières ou annuelles.

Points faibles: Il faut disposer d'une série complète de données et estimer les valeurs manquantes. Les fluctuations au cours de l'année doivent être faibles par rapport aux variations temporelles.

Sources d'information: Néant.

Références:

Kraus, E.B., 1977: «Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports», *Monthly Weather Review*, 105(8):1009–1018.

van Rooy, M.P., 1965: «A Rainfall Anomaly Index independent of time and space», *Notos*, 14:43–48.

Désignation de l'indice: SAI – Indice d'anomalie normalisé

Facilité d'emploi: jaune

Origine: Décrit par Kraus au milieu des années 1970, il a été étudié de près par Katz et Glantz au Centre national de recherche atmosphérique des États-Unis au début des années 1980. Il a été élaboré à partir du RAI, qui en est une composante. Les deux sont similaires mais distincts.

Caractéristiques: Fondé sur les résultats du RAI, l'indice a été mis au point pour aider à déceler les sécheresses dans les régions sujettes au phénomène, tels le Sahel ouest-africain et le nord-est du Brésil. Il analyse les précipitations mesurées aux stations et normalise les hauteurs annuelles. Le calcul de la moyenne des écarts pour toutes les stations de la région fournit ensuite une valeur unique.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles, saisonnières ou annuelles des précipitations.

Applications: Détection des conditions de sécheresse, en particulier dans les régions sujettes au phénomène.

Points forts: L'indice requiert un seul paramètre d'entrée, qui peut être établi pour n'importe quelle période.

Points faibles: L'indice analyse uniquement les précipitations et les résultats dépendent de la qualité des données.

Sources d'information: Les équations de calcul ont été publiées.

Références:

Katz, R.W. et M.H. Glantz, 1986: «Anatomy of a rainfall index», *Monthly Weather Review*, 114:764–771.

Kraus, E.B., 1977: «Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports», *Monthly Weather Review*, 105(8):1009–1018.

Désignation de l'indice: sc-PDSI – Indice de sécheresse de Palmer auto-étalonné

Facilité d'emploi: jaune

Origine: Les premiers travaux ont été réalisés par Wells et ses collaborateurs au début des années 2000 à l'Université du Nebraska à Lincoln.

Caractéristiques: L'indice rend compte de toutes les constantes que contient le PDSI et les soumet à un calcul dynamique sur la base des conditions présentes à chaque emplacement. La fonction d'auto-étalonnage est élaborée pour chaque station et change selon le régime climatique local. L'indice comporte des échelles de sécheresse et d'humidité.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des températures et des précipitations. On peut les compléter par des données sur la capacité de rétention d'eau du sol, mais des valeurs par défaut sont disponibles. Une série complète de relevés des températures et des précipitations est nécessaire.

Applications: L'indice s'applique aux sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques. Les résultats étant directement liés à l'emplacement de la station, les épisodes extrêmes sont rares car ils ne constituent pas une constante et dépendent des informations propres à la station.

Points forts: Grâce aux calculs visant chaque emplacement, l'indice reflète la situation sur le site et permet des comparaisons plus précises entre régions. Différents pas de temps sont possibles.

Points faibles: La méthode n'étant pas très différente de celle du PDSI, elle présente les mêmes inconvénients en ce qui concerne le retard, les précipitations solides et les sols gelés.

Sources d'information: Le programme est disponible en ligne aux adresses suivantes: <http://drought.unl.edu/> et <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cru-sc-pdsi-self-calibrating-pdsi-over-europe-north-america>.

Référence: Wells, N., S. Goddard et M.J. Hayes, 2004: «A self-calibrating Palmer Drought Severity Index», *Journal of Climate*, 17:2335–2351.

Désignation de l'indice: SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Défini par Vicente-Serrano et ses collaborateurs à l'Institut pyrénéen d'écologie de Saragosse (Espagne).

Caractéristiques: Cet indice relativement récent repose sur les mêmes bases que le SPI mais ajoute la température, pour tenir compte de l'effet de celle-ci sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Il comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives, qui signalent les épisodes humides et secs. Le pas de temps peut aller de 1 à 48 mois, voire plus. L'actualisation mensuelle permet l'utilisation en mode opérationnel; plus la série de données est longue, plus les résultats seront robustes.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des précipitations et des températures. On doit disposer d'une série complète de relevés dans laquelle ne manque aucun mois.

Applications: L'indice présente la même polyvalence que le SPI; il peut servir à déceler et à suivre les conditions associées à une diversité d'impacts.

Points forts: En complétant les précipitations par la température, l'indice tient compte de l'effet de ce paramètre sur les conditions de sécheresse. Il s'applique à tous les régimes climatiques et les résultats peuvent être comparés car ils sont normalisés. Grâce aux données de température, le SPEI se prête particulièrement bien à l'analyse des impacts du changement climatique simulés au moyen de modèles selon divers scénarios d'évolution future.

Points faibles: La nécessité de disposer de jeux de données complets sur les températures et sur les précipitations risque de limiter l'emploi, si les séries disponibles comportent des lacunes. Comme il s'agit d'un indice mensuel, il pourrait ne pas déceler assez tôt les sécheresses qui s'installent rapidement.

Sources d'information: Le programme est gratuit et les calculs ont été publiés, <http://sac.csic.es/spei/>.

Référence: Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria et J.I. Lopez-Moreno, 2010: «A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index», *Journal of Climate*, 23:1696–1718.

Désignation de l'indice: ARID – Indice de référence pour la sécheresse agricole

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Recherches conduites dans le sud-est des États-Unis par Woli à l'Université d'État du Mississippi et par Jones et ses collaborateurs à l'Université de Floride en 2011.

Caractéristiques: L'indice anticipe la quantité d'humidité disponible dans le sol. Il allie des approximations du stress hydrique et des modèles de culture pour cerner l'impact de l'insuffisance d'eau sur la croissance, le développement et le rendement de cultures particulières.

Paramètres d'entrée: Valeurs quotidiennes des températures et des précipitations. On emploie également le modèle CERES-Maïs, mais des modèles d'autres cultures peuvent le remplacer.

Applications: L'indice sert à détecter et à prévoir les épisodes de sécheresse lorsqu'on s'intéresse avant tout aux impacts sur l'agriculture.

Points forts: Les modèles de culture et la prise en considération du bilan hydrique sont utiles pour anticiper l'humidité du sol et le stress qui en résulte sur les cultures. Le délai de réaction est court car les calculs peuvent être répétés chaque jour.

Points faibles: L'indice a été conçu et testé dans le sud-est des États-Unis pour quelques systèmes de culture seulement. La transposition n'est pas facile.

Sources d'information: Les équations et la méthode sont décrites dans l'article cité en référence plus bas. Aucun programme n'existe dans le domaine public.

Référence: Woli, P., J.W. Jones, K.T. Ingram et C.W. Fraisse, 2012: «Agricultural Reference Index for Drought (ARID)», *Agronomy Journal*, 104:287–300.

Désignation de l'indice: CSDI – Indice de sécheresse par type de culture

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Élaboré par Meyer et ses collaborateurs au début des années 1990 à l'Université du Nebraska à Lincoln pour étudier l'incidence de la sécheresse sur le rendement réel des cultures.

Caractéristiques: Grâce au calcul d'un bilan hydrique élémentaire du sol, l'indice analyse l'impact de la sécheresse; il détermine aussi à quel moment le stress hydrique a débuté pendant la croissance et quelles en seront les répercussions sur le rendement final. Le PDSI et le CMI détectent les conditions de sécheresse qui nuisent à une culture, mais n'indiquent pas les impacts probables sur le rendement.

Paramètres d'entrée: Températures maximales quotidiennes, températures minimales quotidiennes, précipitations, point de rosée, vitesse du vent et rayonnement solaire total comme valeurs climatiques. Les caractéristiques du profil du sol doivent également être connues pour élaborer le modèle. Des données sur le rendement et la phénologie sont requises pour établir les corrélations voulues avec les jours de croissance, le développement de la culture et le rendement final.

Applications: Destiné avant tout à cerner l'incidence de la sécheresse sur les rendements dans les régions céréalières des États-Unis, il est très ciblé sur le type de culture à surveiller.

Points forts: L'indice cible une culture précise et s'appuie sur le développement de la plante. Le modèle tient compte du moment où survient le stress hydrique pendant la croissance et estime l'impact global sur le rendement.

Points faibles: Les données d'entrée sont assez complexes et de nombreux endroits ne disposent pas des instruments ou des relevés nécessaires pour bien évaluer les conditions.

Sources d'information: La méthode et les calculs sont abondamment décrits dans les articles scientifiques (voir les références ci-dessous).

Références:

Meyer, S.J., K.G. Hubbard et D.A. Wilhite, 1993: «A Crop-specific Drought Index for corn. I. Model development and validation», *Agronomy Journal*, 85:388–395.

Meyer, S.J., K.G. Hubbard et D.A. Wilhite, 1993: «A Crop-specific Drought Index for corn. II. Application in drought monitoring and assessment», *Agronomy Journal*, 85:396–399.

Désignation de l'indice: RDI – Indice de sécheresse du Bureau of Reclamation des États-Unis

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Mis au point au milieu des années 1990 par le Bureau of Reclamation (Service de l'aménagement hydraulique) des États-Unis en vue de déclencher la mobilisation de fonds de secours en cas de sécheresse touchant les terres du domaine public.

Caractéristiques: L'indice définit l'intensité et la durée des périodes de sécheresse et peut servir à anticiper le début et la fin. Il comporte des échelles de conditions humides et sèches et se calcule à l'échelle des bassins fluviaux, de manière similaire au SWSI (indice d'apport d'eau de surface). Il tient compte de la demande d'eau et de la température, ce qui permet d'inclure l'évaporation.

Paramètres d'entrée: Précipitations mensuelles, manteau neigeux, niveaux des réservoirs, écoulement fluvial et températures.

Applications: Il sert principalement à surveiller l'apport d'eau dans les bassins versants.

Points forts: L'indice cible un bassin donné. Il tient compte de l'effet de la température sur les conditions climatiques, ce qui n'est pas le cas du SWSI. Les échelles permettent de suivre les conditions d'humidité et de sécheresse.

Points faibles: Les calculs sont réalisés pour chaque bassin, ce qui rend les comparaisons difficiles. La collecte de l'ensemble des paramètres requis dans un cadre opérationnel peut retarder l'obtention des résultats.

Sources d'information: Les caractéristiques et les calculs sont décrits dans l'ouvrage indiqué ci-dessous.

Référence: Weghorst, K., 1996: *The Reclamation Drought Index: Guidelines and Practical Applications*, Bureau of Reclamation, Denver (CO).

7.2 Humidité du sol

Désignation de l'indice: SMA – Anomalie d'humidité du sol

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Établi par Bergman et ses collaborateurs au Service météorologique des États-Unis au milieu des années 1980 afin d'évaluer les conditions de sécheresse dans le monde.

Caractéristiques: Il peut être calculé à partir des valeurs hebdomadaires ou mensuelles des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle par une simple équation du bilan hydrique. Il indique le degré de sécheresse ou de saturation du sol par rapport aux valeurs normales et montre l'incidence du stress hydrique sur la production agricole à l'échelle du globe.

Paramètres d'entrée: Valeurs hebdomadaires ou mensuelles des températures et des précipitations, date et latitude. On peut les compléter par la capacité de rétention d'eau du sol et des données propres au site, mais des valeurs par défaut sont disponibles.

Applications: L'indice a été élaboré et est couramment employé pour surveiller les impacts de la sécheresse sur l'agriculture et sur la production agricole dans le monde.

Points forts: Comme il tient compte de l'effet des températures et des précipitations, l'indice intègre les aspects du bilan hydrique qui ont assuré le succès du PDSI et permet de modifier les constantes selon les données propres au site. Il analyse l'humidité du sol à différentes profondeurs et s'adapte, mieux que le PDSI, à des emplacements différents.

Points faibles: Les données requises rendent les calculs difficiles. Les estimations de l'évapotranspiration potentielle peuvent varier considérablement d'une région à l'autre.

Sources d'information: Les données d'entrée et les calculs sont abondamment décrits dans les articles scientifiques. Il n'existe pas, à ce jour, de programme de calcul.

Référence: Bergman, K.H., P. Sabol et D. Miskus, 1988: *Experimental Indices for Monitoring Global Drought Conditions*, Proceedings of the 13th Annual Climate Diagnostics Workshop, United States Department of Commerce, Cambridge (MA).

Désignation de l'indice: ETDI – Indice de déficit d'évapotranspiration

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Recherches exécutées en 2004 par Narasimhan et Srinivasan au Centre d'expérimentation agricole du Texas (États-Unis).

Caractéristiques: Les valeurs hebdomadaires aident à détecter le stress hydrique que subissent les cultures. L'indice est calculé en même temps que le SMDI (indice de déficit d'humidité du sol), dans lequel un coefficient de stress hydrique compare l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration de référence pour les cultures. Ce coefficient est ensuite comparé à la médiane établie sur une longue période.

Paramètres d'entrée: Données issues d'un modèle hydrologique basé sur l'outil d'évaluation du sol et de l'eau SWAT, pour les calculs initiaux de la teneur en eau de la zone racinaire sur une base hebdomadaire.

Applications: L'indice sert à détecter et à surveiller les sécheresses de courte durée qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: Il tient compte à la fois de l'évapotranspiration réelle et de l'évapotranspiration potentielle et détecte les conditions sèches comme les conditions humides.

Points faibles: Les calculs reposent sur les valeurs de sortie du modèle SWAT, mais l'indice pourrait être calculé si l'on détenait les données d'entrée voulues. La variabilité spatiale de l'indice croît pendant l'été, quand l'évapotranspiration est très forte et la pluviosité très variable.

Sources d'information: Les calculs sont soigneusement expliqués dans l'article indiqué en référence ci-dessous, qui renferme des analyses de corrélation avec d'autres indices de sécheresse. Il est possible d'obtenir en ligne des informations sur le modèle SWAT à l'adresse suivante: <http://swat.tamu.edu/software/swat-executables/>.

Référence: Narasimhan, B. et R. Srinivasan, 2005: «Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring», *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1):69–88.

Désignation de l'indice: SMDI – Indice de déficit d'humidité du sol

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Recherches exécutées en 2004 par Narasimhan et Srinivasan au Centre d'expérimentation agricole du Texas (États-Unis).

Caractéristiques: Les valeurs hebdomadaires de l'humidité du sol à quatre profondeurs différentes (sur toute la colonne de sol, à 0,61 m, 1,23 m et 1,83 m) servent d'indicateurs d'une sécheresse de courte durée, en particulier les résultats obtenus dans la couche de 0,61 m.

Paramètres d'entrée: Données issues d'un modèle hydrologique basé sur l'outil d'évaluation du sol et de l'eau SWAT, pour les calculs initiaux de la teneur en eau de la zone racinaire sur une base hebdomadaire.

Applications: L'indice sert à détecter et à surveiller les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: Il tient compte du profil complet et de différentes couches du sol, ce qui permet de l'adapter à divers types de cultures.

Points faibles: Les informations requises pour les calculs reposent sur les valeurs de sortie du modèle SWAT. Certains problèmes d'autocorrélation apparaissent quand on utilise toutes les profondeurs.

Sources d'information: Les calculs sont soigneusement expliqués dans l'article indiqué en référence ci-dessous. Il est possible d'obtenir en ligne des informations sur le modèle SWAT à l'adresse suivante: <http://swat.tamu.edu/software/swat-executables/>.

Référence: Narasimhan, B. et R. Srinivasan, 2005: «Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring», *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1):69–88.

Désignation de l'indice: SWS – Stockage d'eau dans le sol

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Inconnue – les tentatives de mesurer précisément l'humidité du sol remontent aux débuts de l'agriculture.

Caractéristiques: Il s'agit de la quantité d'humidité disponible dans la zone racinaire, qui dépend du type de plante et du type de sol. Les précipitations et l'irrigation modifient les résultats.

Paramètres d'entrée: Profondeur d'enracinement, capacité d'emmagasiner l'eau disponible selon le type de sol et déficit maximal d'eau dans le sol.

Applications: L'indice sert avant tout à surveiller les sécheresses en milieu agricole, mais il peut aussi faire partie de l'analyse de conditions qui influent sur la quantité d'eau disponible.

Points forts: Les calculs sont bien connus et simples à exécuter, même à l'aide de valeurs par défaut. Un grand nombre de sols et de cultures ont été analysés par cette méthode.

Points faibles: Si le sol n'est pas homogène, des écarts importants peuvent apparaître sur de courtes distances.

Sources d'information: Les calculs et des exemples figurent dans le document indiqué en référence ci-dessous.

Référence: British Columbia Ministry of Agriculture, 2015: *Soil Water Storage Capacity and Available Soil Moisture*, Water Conservation Fact Sheet, http://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/soil-nutrients/600-series/619000-1_soil_water_storage_capacity.pdf.

7.3 Hydrologie

Désignation de l'indice: PHDI – Indice de sécheresse hydrologique de Palmer

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Élément de la série d'indices élaborés par Palmer dans les années 1960 au Bureau météorologique des États-Unis.

Caractéristiques: À partir du PDSI initial, l'indice a été adapté pour étudier les sécheresses d'une certaine durée qui influent sur le stockage de l'eau, l'écoulement fluvial et les réserves souterraines. Il permet de savoir à quel moment la sécheresse prendra fin sur la base des précipitations requises, en établissant le rapport entre l'humidité reçue et l'humidité nécessaire. Quatre catégories de sécheresse sont définies, selon la fréquence approximative du phénomène: sécheresse quasi normale (de 28 % à 50 % du temps), légère à modérée (de 11 % à 27 % du temps), intense (de 5 % à 10 % du temps), extrême (4 % du temps).

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des températures et des précipitations. On peut les compléter par des données sur la capacité de rétention d'eau des sols, mais des valeurs par défaut sont disponibles. Une série complète de relevés des températures et des précipitations est nécessaire.

Applications: L'indice est très utile pour rendre compte des conditions de sécheresse qui influent sur les ressources en eau à long terme.

Points forts: Les éléments relatifs au bilan hydrique permettent d'analyser l'ensemble du système hydrologique.

Points faibles: La fréquence des conditions varie d'une région et d'une saison à l'autre, une sécheresse extrême n'étant pas forcément rare certains mois de l'année. Les calculs ne tiennent pas compte de l'incidence des interventions humaines, comme les décisions de gestion et le recours à l'irrigation.

Sources d'information: Le programme est donné dans l'article original de Palmer cité en référence plus bas, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wrcr.20342/pdf>.

Référence: Palmer, W.C., 1965: *Meteorological Drought*, Research Paper No. 45. United States Weather Bureau, Washington.

Désignation de l'indice: SDI – Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Élaboré par Nalbantis et Tsakiris en s'appuyant sur la méthode et les calculs du SPI.

Caractéristiques: Les calculs se font à l'aide des valeurs mensuelles de l'écoulement fluvial et des méthodes de normalisation utilisées pour le SPI, afin de produire un indice de sécheresse selon l'écoulement. Les valeurs obtenues étant similaires à celles du SPI, il est possible d'analyser les épisodes d'humidité comme les épisodes de sécheresse, ainsi que l'intensité de ces phénomènes.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles de l'écoulement fluvial et relevés historiques à la station de jaugeage.

Applications: L'indice sert à déceler et à suivre les épisodes de sécheresse à une station précise, qui n'est pas forcément représentative d'un plus large bassin.

Points forts: Le programme est facile à obtenir et à exécuter. Les données peuvent comporter des lacunes et l'exactitude des résultats dépend de la longueur des séries de relevés de l'écoulement fluvial. Comme avec le SPI, diverses échelles temporelles sont possibles.

Points faibles: Le seul paramètre utilisé étant l'écoulement fluvial, il n'est pas tenu compte des décisions de gestion. Les périodes où l'écoulement est nul risquent de fausser les résultats.

Sources d'information: L'indice est décrit et des exemples de calcul sont donnés dans les articles scientifiques. Le programme SPI est disponible en ligne à l'adresse suivante: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>; on peut également trouver des informations sur l'indice SDI lui-même à l'adresse suivante: <http://drinc.ewra.net/>.

Référence: Nalbantis, I. et G. Tsakiris, 2008: «Assessment of hydrological drought revisited», *Water Resources Management*, 23(5):881–897.

Désignation de l'indice: SRSI – Indice d'alimentation des réservoirs normalisé

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Mis au point par Gusyev et ses collaborateurs au Japon dans le but d'analyser de manière systématique les données sur les réservoirs en période de sécheresse.

Caractéristiques: L'indice est similaire au SPI, dans la mesure où les données mensuelles servent à établir la fonction de densité de probabilité des données de stockage dans les réservoirs, afin de connaître les disponibilités en eau dans une région ou un bassin selon une échelle allant de -3 (extrêmement sec) à +3 (extrêmement humide).

Paramètres d'entrée: Apports mensuels et volumes moyens de stockage dans les réservoirs.

Applications: L'indice tient compte de l'apport total et du stockage dans un réservoir précis; il procure des informations utiles aux responsables municipaux de l'approvisionnement en eau et aux prestataires locaux de services d'irrigation.

Points forts: Il se calcule facilement, d'une manière similaire au SPI, et utilise une distribution gamma normale de la fonction de densité.

Points faibles: Il ne tient compte ni des changements provoqués par la gestion du réservoir ni des pertes dues à l'évaporation.

Sources d'information: Le Centre international de gestion des risques associés à l'eau a appliqué la méthode dans plusieurs bassins d'Asie, <http://www.icharm.pwri.go.jp/>.

Référence: Gusyev, M.A., A. Hasegawa, J. Magome, D. Kuribayashi, H. Sawano et S. Lee, 2015: *Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts*, Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2015), Broadbeach, Queensland (Australie).

Désignation de l'indice: SSFI – Indice d'écoulement fluvial normalisé

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Modarres a décrit l'indice en 2007 et Telesca et ses collaborateurs ont approfondi les recherches en 2012. Dans ses travaux, Modarres explique que la démarche s'apparente à celle du SPI dans la mesure où l'indice SSFI pour une période donnée est défini comme la différence de l'écoulement entre la moyenne et l'écart type.

Caractéristiques: Les calculs se font à l'aide des valeurs mensuelles de l'écoulement fluvial et des méthodes de normalisation utilisées pour le SPI. Ils peuvent porter sur les valeurs mesurées comme sur les valeurs prévues, ce qui donne une idée des périodes de hautes et de basses eaux qui sont associées aux crues et aux sécheresses.

Paramètres d'entrée: Valeurs quotidiennes ou mensuelles de l'écoulement fluvial.

Applications: L'indice permet de suivre les conditions hydrologiques à diverses échelles temporelles.

Points forts: Il est facile à calculer avec le programme SPI et son emploi est simple car il requiert une seule variable et tolère des lacunes dans les relevés.

Points faibles: Il tient uniquement compte de l'écoulement fluvial pour suivre les sécheresses, sans analyser d'autres facteurs.

Sources d'information: L'indice est bien décrit dans les articles scientifiques, avec les formules mathématiques et des études de cas, et le programme SPI est disponible en ligne à l'adresse suivante: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

Références:

Modarres, R., 2007: «Streamflow drought time series forecasting», *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21:223–233.

Telesca, L., M. Lovallo, I. Lopez-Moreno et S. Vicente-Serrano, 2012: «Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index time series in the Ebro basin (Spain)», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4):1662–1678.

Désignation de l'indice: SWI – Indice de niveau d'eau normalisé

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Défini par Bhuiyan à l'Institut indien de technologie afin d'estimer les déficits de réalimentation des eaux souterraines.

Caractéristiques: Cet indice de sécheresse hydrologique analyse l'incidence des sécheresses sur la recharge des eaux souterraines à partir de données provenant de puits. L'interpolation entre plusieurs points est possible.

Paramètres d'entrée: Niveaux des eaux souterraines dans les puits.

Applications: Secteurs dans lesquels les cours d'eau présentent souvent des étiages saisonniers.

Points forts: L'impact de la sécheresse sur les eaux souterraines revêt une grande importance pour l'approvisionnement en eau des municipalités et des zones agricoles.

Points faibles: L'indice tient uniquement compte des eaux souterraines et l'interpolation peut produire des résultats qui ne représentent pas bien la région ou le régime climatique.

Référence: Bhuiyan, C., 2004: *Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India*, Proceedings of the XXth ISPRS Conference, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul (Turquie), <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/243.pdf>.

Désignation de l'indice: SWSI – Indice d'apport d'eau de surface

Facilité d'emploi: Jaune

Origine: Mis au point par Shafer et Dezman en 1982 pour remédier à certaines des limites du PDSI.

Caractéristiques: À partir des travaux de Palmer, l'indice ajoute plusieurs paramètres au PDSI, dont les données sur l'apport d'eau de surface (accumulation de neige, fonte de neige, ruissellement)

et les données sur les réservoirs. Il se calcule à l'échelle d'un bassin et caractérise la sécheresse selon sa fréquence approximative: légère (de 26 % à 50 %), modérée (de 14 % à 26 %) et intense (de 2 % à 14 %). Les sécheresses extrêmes surviennent moins de 2 % du temps environ.

Paramètres d'entrée: Stockage dans les réservoirs, écoulement fluvial, manteau neigeux et précipitations.

Applications: L'indice décèle les conditions de sécheresse qui sont associées à des fluctuations des paramètres hydrologiques.

Points forts: La prise en considération de l'ensemble des ressources en eau présentes dans un bassin donne une bonne idée de l'état hydrologique global du bassin ou de la région.

Points faibles: Lorsque les sources de données changent ou que l'on ajoute des données, il faut recalculer l'ensemble de l'indice, ce qui complique la création d'une série chronologique homogène. Les méthodes de calcul pouvant varier d'un bassin à l'autre, il est difficile de comparer des bassins ou des régions homogènes.

Sources d'information: La méthodologie et les calculs sont décrits dans les documents indiqués en référence ci-dessous.

Références:

Doesken, N.J. et D. Garen, 1991: *Drought Monitoring in the Western United States using a Surface Water Supply Index*, Preprints, Seventh Conference on Applied Climatology, Salt Lake City (UT), American Meteorological Society, 266–269.

Doesken, N.J., T.B. McKee et J. Kleist, 1991: *Development of a Surface Water Supply Index for the Western United States*, Climatology Report 91-3, Colorado Climate Center, http://climate.colostate.edu/pdfs/climo_rpt_91-3.pdf.

Shafer, B.A. et L.E. Dezman, 1982: *Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas*, Proceedings of the Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins (CO), 164–175.

Désignation de l'indice: ADI – Indice de sécheresse agrégé

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Travaux conduits en 2003 par Keyantash à l'Université d'État de Californie (États-Unis) et par Dracup à l'Université de Californie à Berkeley (États-Unis).

Caractéristiques: Il s'agit d'un indice régional multivarié qui prend en considération l'ensemble des ressources en eau à de nombreuses échelles temporelles et de multiples impacts. Il a été conçu pour les régimes climatiques uniformes.

Paramètres d'entrée: Précipitations, évapotranspiration, écoulement fluvial, stockage dans les réservoirs, degré d'humidité du sol et teneur en eau de la neige. Le paramètre correspondant est omis si la variable ne s'applique pas à la région visée.

Applications: L'indice peut servir à étudier plusieurs types d'impacts de la sécheresse. L'analyse de la quantité totale d'eau dans un régime climatique permet de mieux connaître les disponibilités en eau.

Points forts: L'indice tient compte de l'eau emmagasinée ainsi que de l'humidité apportée par les précipitations.

Points faibles: L'indice ne tient pas compte des températures ou des eaux souterraines, comme il ressort de sa description.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés, accompagnés d'exemples. Aucun programme n'a été trouvé pour cet indice.

Référence: Keyantash, J.A. et J.A. Dracup, 2004: «An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage», *Water Resources Research*, 40:W09304, doi:10.1029/2003WR002610, http://www.geo.oregonstate.edu/classes/ecosys_info/readings/2003WR002610.pdf.

Désignation de l'indice: SMRI – Indice de pluie et d'eau de fonte normalisé

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Mis au point par Staudinger et ses collaborateurs, testé sur plusieurs bassins suisses, dans le but d'intégrer les précipitations solides et leur apport au ruissellement sous la forme d'eau de fonte.

Caractéristiques: Par des méthodes similaires à celles du SPI, l'indice tient compte des déficits de pluie et de neige et de leurs répercussions sur l'écoulement fluvial, y compris les précipitations stockées sous forme de neige. Il est couramment utilisé en complément du SPI.

Paramètres d'entrée: Données sur l'écoulement fluvial, valeurs quotidiennes des précipitations et des températures. L'étude initiale faisait usage de données aux points de grille.

Applications: Axé sur l'impact des précipitations solides et leur apport aux écoulements futurs, l'indice se prête au suivi des situations de sécheresse.

Points forts: Tous les apports dans un bassin sont pris en considération, dont la neige et sa contribution future à l'écoulement fluvial. Il n'est pas nécessaire de connaître les quantités réelles de neige, ce paramètre pouvant être modélisé à partir des températures et des précipitations.

Points faibles: L'emploi de données aux points de grille, dont les plus anciennes remontent seulement à 1971, est un inconvénient lorsqu'on analyse l'efficacité de l'indice avec des données ponctuelles sur de longues périodes. Le fait de ne pas utiliser les hauteurs de neige réelles et les équivalents en eau correspondants peut induire des erreurs dans l'anticipation du ruissellement.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés.

Référence: Staudinger, M., K. Stahl et J. Seibert, 2014: «A drought index accounting for snow», *Water Resources Research*, 50:7861–7872, doi:10.1002/2013WR015143.

7.4 Télédétection

Désignation de l'indice: ESI – Indice de stress fondé sur l'évaporation

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Mis au point par une équipe de chercheurs, sous la direction d'Anderson, pour calculer l'évapotranspiration sur le territoire américain à partir de données de télédétection. L'équipe était composée de scientifiques du Département de l'agriculture des États-Unis, de l'Université d'Alabama à Huntsville et de l'Université du Nebraska à Lincoln.

Caractéristiques: Dans ce nouvel indice de sécheresse, l'évapotranspiration est comparée à l'évapotranspiration potentielle grâce aux données provenant de satellites géostationnaires. Les analyses indiquent que l'ESI a une efficacité similaire à celle des indices basés sur les précipitations à court terme, mais il peut être calculé à une résolution nettement supérieure et en l'absence de données sur les précipitations.

Paramètres d'entrée: Évapotranspiration potentielle estimée par télédétection.

Applications: L'indice est particulièrement utile pour déceler et suivre les périodes de sécheresse qui ont des impacts multiples.

Points forts: Il offre une résolution très élevée et s'applique à n'importe quelle région.

Points faibles: Les résultats peuvent être faussés par la nébulosité. Il n'existe pas de longues séries de relevés pour les études climatologiques.

Sources d'information: Les calculs ont été publiés, <http://hrsl.arsusda.gov/drought/>.

Référence: Anderson, M.C., C. Hain, B. Wardlow, A. Pimstein, J.R. Mecikalski et W.P. Kustas, 2011: «Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States», *Journal of Climate*, 24(8):2025–2044.

Désignation de l'indice: EVI – Indice de végétation amélioré

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux réalisés par Huete et par une équipe de chercheurs au Brésil et à l'Université d'Arizona (États-Unis), pour évaluer les conditions de végétation à l'aide d'un spectroradiomètre imageur à moyenne résolution (MODIS).

Caractéristiques: Il est très utile, pour calculer le NDVI (indice de végétation par différence normalisé), de surveiller la végétation à partir de plates-formes satellitaires dotées d'un radiomètre perfectionné à très haute résolution (AVHRR). L'indice EVI reprend certaines techniques du NDVI, mais avec les données d'un MODIS embarqué. Les deux sont calculés à l'aide d'une plate-forme MODIS et leur efficacité est analysée par rapport aux plates-formes AVHRR. L'indice EVI est plus sensible aux variations du couvert végétal, au type et à la structure de ce dernier et à la physiologie des végétaux. Il peut être associé au stress et aux changements qui accompagnent la sécheresse.

Paramètres d'entrée: Informations provenant d'une plate-forme satellitaire MODIS.

Applications: L'indice sert à déceler le stress dû à la sécheresse dans différents paysages. Il est surtout lié au développement de conditions sèches qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: La résolution est élevée et la couverture spatiale bonne quel que soit le terrain.

Points faibles: Le stress que subit le couvert végétal peut être dû à d'autres phénomènes que la sécheresse et il n'est pas facile de les distinguer à partir de ce seul indice. Les relevés de données satellitaires portent sur une courte période et les études climatologiques sont difficiles.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés et il existe des ressources en ligne, http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php.

Référence: Huete, A., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao et L.G. Ferreira, 2002: «Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices», *Remote Sensing of Environment*, 83(1):195–213.

Désignation de l'indice: NDVI – Indice de végétation par différence normalisé

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Fruit des travaux de Tarpley et de ses collaborateurs et de Kogan à l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) (États-Unis).

Caractéristiques: Il utilise les données de l'indice de végétation dans le monde, qui sont établies par cartographie de la luminance énergétique quotidienne à une échelle de 4 km. Les valeurs de luminance employées pour le calcul sont mesurées à la fois dans le visible et dans l'infrarouge. L'indice détermine le degré de verdure et la vigueur de la végétation sur une période de sept jours, afin d'atténuer l'effet des nuages; il peut déceler le stress provoqué par la sécheresse.

Paramètres d'entrée: Données de plates-formes satellitaires AVHRR de la NOAA.

Applications: L'indice sert à déceler et à suivre les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: Utilisation innovante des données satellitaires pour surveiller l'état de la végétation relativement à la sécheresse. Très haute résolution et grande couverture spatiale.

Points faibles: Le traitement des données, aspect crucial du calcul, exige un système puissant. Les relevés satellitaires portent sur une période assez courte.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés. Des produits sont disponibles en ligne, http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php.

Références:

Kogan, F.N., 1995: «Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5):655–668.

Tarpley, J.D., S.R. Schneider et R.L. Money, 1984: «Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite», *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:491–494.

Désignation de l'indice: NDWI et LSWI – Indice de quantité d'eau par différence normalisé et indice de quantité d'eau en surface

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux conduits par Gao au milieu des années 1990 au Centre spatial Goddard de l'Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA) (États-Unis).

Caractéristiques: La méthode est très similaire à celle du NDVI, mais la teneur en eau du couvert végétal est mesurée dans le proche infrarouge. Les modifications de la végétation servent à déceler les périodes de stress dû à la sécheresse.

Paramètres d'entrée: Informations satellitaires dans les diverses bandes du proche infrarouge.

Applications: L'indice sert à suivre les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture par la détection du stress.

Points forts: La résolution est élevée et la couverture spatiale bonne quel que soit le terrain. L'indice ne surveille pas les mêmes signaux que le NDVI.

Points faibles: Le stress que subit le couvert végétal peut être dû à d'autres phénomènes que la sécheresse et il n'est pas facile de les distinguer à partir de ce seul indice. Les relevés de données satellitaires portent sur une courte période et les études climatologiques sont difficiles.

Sources d'information: La méthode a été publiée, tout comme les calculs selon les données MODIS utilisées, <http://www.eomf.ou.edu/modis/visualization/>.

Références:

Chandrasekar, K., M.V.R. Sessa Sai, P.S. Roy et R.S. Dwevedi, 2010: «Land Surface Water index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product», *International Journal of Remote Sensing*, 31:3987–4005.

Gao, B.C., 1996: «NDWI—a Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space», *Remote Sensing of Environment*, 58(3):257–266.

Note: Le principe et les calculs du NDWI et du LSWI sont très similaires.

Désignation de l'indice: TCI – Indice des conditions de température

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux de Kogan à la NOAA (États-Unis).

Caractéristiques: En exploitant les bandes thermiques de radiomètres AVHRR, l'indice détermine le stress que la température et l'humidité excessive font subir à la végétation. Les conditions sont estimées par rapport aux températures maximales et minimales et sont adaptées en fonction de la réaction différente de la végétation à la température.

Paramètres d'entrée: Données de plates-formes satellitaires AVHRR.

Applications: Allié au NDVI et au VCI (indice des conditions de végétation), l'indice permet d'évaluer le degré de sécheresse de la végétation lorsqu'on s'intéresse avant tout aux impacts sur l'agriculture.

Points forts: La résolution est élevée et la couverture spatiale bonne.

Points faibles: Les résultats peuvent être faussés par la nébulosité et la période de relevés est courte.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés et il existe des ressources en ligne, http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php.

Référence: Kogan, F.N., 1995: «Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection», *Advances in Space Research*, 15(11):91–100.

Désignation de l'indice: VCI – Indice des conditions de végétation

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux de Kogan à la NOAA (États-Unis).

Caractéristiques: En exploitant les bandes thermiques de radiomètres AVHRR, l'indice décèle les conditions de sécheresse et le moment où elles débutent, surtout dans les secteurs où le phénomène est peu étendu et mal défini. Il vise les effets sur la végétation et procure des informations sur le début, la durée et l'intensité de la sécheresse en détectant les changements dans la végétation et en les comparant aux valeurs historiques.

Paramètres d'entrée: Données de plates-formes satellitaires AVHRR.

Applications: Allié au NDVI et au TCI, l'indice permet d'évaluer la végétation dans des situations de sécheresse qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: La résolution est élevée et la couverture spatiale bonne.

Points faibles: Les résultats peuvent être faussés par la nébulosité et la période de relevés est courte.

Sources d'information: La méthode et les calculs ont été publiés et il existe des ressources en ligne, http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php.

Références:

Kogan, F.N., 1995: «Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection», *Advances in Space Research*, 15(11):91–100.

Liu, W.T. et F.N. Kogan, 1996: «Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index», *International Journal of Remote Sensing*, 17(14):2761–2782.

Désignation de l'indice: VegDRI – Indice de réaction de la végétation à la sécheresse

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Élaboré par une équipe de chercheurs rattachés au NDMC, au Centre d'observation et d'étude des ressources terrestres du Service géologique américain et au Centre local de Flagstaff du Service géologique américain.

Caractéristiques: Cet indice vise à suivre le stress de la végétation sous l'effet de la sécheresse à partir de données de télédétection, d'indicateurs climatiques et d'autres informations biophysiques et données sur l'occupation des sols.

Paramètres d'entrée: SPI, PDSI, proportion du degré de verdure saisonnière, anomalie du début de saison, couverture terrestre, quantité d'eau disponible dans le sol, agriculture irriguée et régions écologiques définies. Une partie de ces paramètres étant des variables dérivées, d'autres données sont requises.

Applications: L'indice sert surtout d'indicateur à court terme de sécheresse pour les applications agricoles.

Points forts: Il s'agit d'une technique intégrée et innovante qui conjugue les données de surface et de télédétection et met à profit les progrès technologiques en matière d'exploration de données.

Points faibles: Les relevés de données de télédétection portent sur une courte période. L'indice ne présente aucune utilité hors saison ou lorsque la végétation est limitée ou absente.

Sources d'information: La méthode et les calculs sont décrits dans l'article indiqué en référence ci-dessous. Voir aussi <http://vegdiri.unl.edu/>.

Référence: Brown, J.F., B.D. Wardlow, T. Tadesse, M.J. Hayes et B.C. Reed, 2008: «The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation», *GIScience & Remote Sensing*, 45:16–46.

Désignation de l'indice: VHI – Indice de santé de la végétation

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux de Kogan à la NOAA (États-Unis).

Caractéristiques: L'une des premières tentatives de déceler et de surveiller les impacts de la sécheresse sur l'agriculture à partir de données de télédétection. La détermination et la classification du stress subi par la végétation s'appuient sur les données de radiomètres AVHRR obtenues dans le visible, l'infrarouge et le proche infrarouge.

Paramètres d'entrée: Données de plates-formes satellitaires AVHRR.

Applications: L'indice sert à déceler et à suivre, dans le monde entier, les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture.

Points forts: L'ensemble du globe est couvert avec une résolution élevée.

Points faibles: Les relevés de données satellitaires portent sur une courte période.

Sources d'information: Les calculs et diverses études de cas ont été publiés. Des cartes de l'indice sont disponibles en ligne à l'adresse suivante: http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php.

Références:

Kogan, F.N., 1990: «Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas», *International Journal of Remote Sensing*, 11:1405–1419.

Kogan, F.N., 1997: «Global drought watch from space», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:621–636.

Kogan, F.N., 2001: «Operational space technology for global vegetation assessments», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9):1949–1964.

Désignation de l'indice: WRSI et WRSI géospatial – Indice de satisfaction des besoins en eau

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Mis au point par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture en vue d'analyser et de suivre la production agricole dans les régions du monde sujettes à la famine. Les travaux ont été poursuivis au sein du Système d'alerte précoce contre la famine (FEWS NET).

Caractéristiques: L'indice suit les cultures pendant la saison de croissance en fonction de la quantité d'eau qui leur est disponible. Il s'agit du rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle. Ce rapport est propre à chaque culture et repose sur le développement des végétaux et sur les relations connues entre le rendement et le stress dû à la sécheresse.

Paramètres d'entrée: Modèles de développement des cultures, coefficients de culture et données satellitaires.

Applications: L'indice sert à surveiller le développement des cultures et le stress dans les zones agricoles.

Points forts: La résolution est élevée et la couverture spatiale bonne quel que soit le terrain.

Points faibles: Un stress dû à d'autres facteurs que l'eau disponible peut fausser les résultats. L'estimation des précipitations à partir de données satellitaires comporte un degré d'erreur qui affecte les résultats des modèles de culture et le bilan d'évapotranspiration.

Sources d'information:

<http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/index.html>,
http://iridl.ldeo.columbia.edu/documentation/usgs/adds/wrsi/WRSI_readme.pdf.

Référence: Verdin, J. et R. Klaver, 2002: «Grid-cell-based crop water accounting for the famine early warning system», *Hydrological Processes*, 16(8):1617–1630.

Désignation de l'indice: SAVI – Indice de végétation ajusté pour le sol

Facilité d'emploi: Rouge

Origine: Élaboré à la fin des années 1980 par Huete à l'Université d'Arizona (États-Unis). L'idée était d'établir un modèle mondial pour surveiller le sol et la végétation au moyen de données de télédétection.

Caractéristiques: Il est similaire au NDVI – les indices spectraux peuvent être étalonnés de manière à normaliser les variations liées à la nature du sol, afin qu'elles n'influent pas sur la mesure du couvert végétal. Ces affinements sont utiles parce qu'ils permettent d'intégrer les différences pédologiques.

Paramètres d'entrée: Données de télédétection, qui sont ensuite comparées à des parcelles connues comportant divers types de végétation.

Applications: L'indice sert à surveiller l'état du sol et de la végétation.

Points forts: La haute résolution et la forte densité des données issues de la télédétection se traduisent par une très bonne couverture spatiale.

Points faibles: Les calculs sont complexes et il est difficile d'obtenir les valeurs d'entrée nécessaires pour utiliser l'indice en mode opérationnel. Les relevés de données satellitaires portent sur une courte période, ce qui peut nuire aux analyses climatologiques.

Sources d'information: La méthode et les calculs sont bien expliqués dans les articles scientifiques.

Référence: Huete, A.R., 1988: «A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI)», *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295–309.

7.5 Valeurs composites ou modélisées

Désignation de l'indice: CDI – Indicateur de sécheresse composé

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Mis au point par Sepulcre-Canto et ses collaborateurs à l'Observatoire européen de la sécheresse, en alliant le SPI, le SMA et la fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif, afin de détecter les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture en Europe.

Caractéristiques: Il comprend trois niveaux (veille, avis et alerte) et regroupe trois indicateurs: le SPI, l'humidité du sol et l'état de la végétation déterminé par télédétection. Une veille signale un déficit de précipitations, un avis indique que l'insuffisance de précipitations se traduit par un déficit d'humidité du sol et une alerte signifie que les déficits de précipitations et d'humidité du sol ont une incidence sur la végétation.

Paramètres d'entrée: SPI sur trois mois calculé à partir des précipitations relevées à des stations couvrant toute l'Europe, données sur l'humidité du sol issues du modèle LISFLOOD et valeurs de la fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif fournies par l'Agence spatiale européenne.

Applications: L'indice signale les sécheresses qui ont des impacts sur l'agriculture.

Points forts: La couverture spatiale est bonne et la résolution est élevée grâce à la combinaison de données obtenues par télédétection et de données relevées en surface.

Points faibles: L'emploi d'une seule valeur du SPI n'est peut-être pas idéal dans tous les cas et ne représente pas les conditions susceptibles de perdurer plusieurs saisons. La répliquabilité est difficile et l'indicateur est actuellement limité à l'Europe.

Sources d'information: L'indice est produit par l'Observatoire européen de la sécheresse, au sein du Centre commun de recherche de la Commission européenne, <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>.

Référence: Sepulcre-Canto, G., S. Horion, A. Singleton, H. Carrao et J. Vogt, 2012: «Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe», *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 12:3519–3531.

Désignation de l'indice: **GIDMaPS – Système mondial intégré de suivi et de prévision de la sécheresse**

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux réalisés par Hao et ses collaborateurs à l'Université de Californie à Irvine (États-Unis) en vue de suivre et de prévoir les conditions de sécheresse dans le monde.

Caractéristiques: Le système fournit des informations pour le SPI, l'humidité du sol et le MSDI (indice de sécheresse normalisé multivarié). Il utilise aussi des données satellitaires complétées par des outils d'assimilation. Les résultats, produits sur une grille en temps quasi réel, allient le suivi et la prévision pour évaluer, surveiller et anticiper les sécheresses qui ont des impacts multiples.

Paramètres d'entrée: Données de télédétection combinées au GLDAS (système mondial d'assimilation des données sur les terres émergées) par un algorithme afin de fournir des paramètres pour trois indices de sécheresse ainsi que des prévisions saisonnières.

Applications: Le système permet le suivi et la prévision en produisant des valeurs pour le SPI, le MSDI et l'indice d'humidité du sol normalisé. Il peut être employé en agriculture et dans d'autres domaines.

Points forts: Les valeurs aux points de grille sur l'ensemble du globe représentent bien tous les secteurs. Grâce à une échelle d'humidité et de sécheresse, le système ne se limite pas au suivi des conditions sèches. Il est parfait pour les zones pour lesquelles on manque de bonnes observations de surface sur de longues périodes. Son emploi est assez simple car l'utilisateur n'a pas à introduire de données.

Points faibles: Tous les secteurs et tous les régimes climatiques ne sont pas représentés de manière uniforme vu la taille des mailles. Les relevés remontent à 1980, ce qui est très court pour les applications climatologiques. Tout ajustement exigerait d'obtenir le programme et les données d'entrée.

Sources d'information: La méthode est bien décrite dans les articles scientifiques, et des ressources et cartes sont facilement accessibles en ligne, <http://drought.eng.uci.edu/>.

Référence: Hao, Z., A. AghaKouchak, N. Nakhjiri et A. Farahmand, 2014: «Global integrated drought monitoring and prediction system», *Scientific Data*, 1:1–10.

Désignation de l'indice: **GLDAS – Système mondial d'assimilation des données sur les terres émergées**

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Travaux conduits par Rodell avec des scientifiques de la NASA et de la NOAA (États-Unis).

Caractéristiques: Le système utilise des données d'observation en surface et par télédétection et recourt à des modèles des terres émergées et à des techniques d'assimilation pour évaluer les

conditions présentes. Il indique entre autres les caractéristiques d'humidité du sol, qui constituent un bon indicateur de sécheresse.

Paramètres d'entrée: Modèles des terres émergées, observations météorologiques en surface, types de végétation et données satellitaires.

Applications: Il permet d'anticiper l'écoulement fluvial ainsi que le ruissellement à partir des valeurs actuelles; il est idéal pour suivre les sécheresses qui ont des impacts multiples.

Points forts: Étant donné sa couverture mondiale et sa haute résolution, l'indice peut représenter la plupart des régions. Il est utile pour suivre l'installation des sécheresses dans les régions où les données sont rares.

Points faibles: Les mailles sont trop grandes pour les terres insulaires. Le processus d'assimilation des données se limite aux secteurs pour lesquels on manque d'observations de surface en temps quasi réel.

Sources d'information: La méthode et les données d'entrées sont bien décrites dans les articles scientifiques. Les valeurs de sortie sont disponibles en ligne, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nldas-north-american-land-data-assimilation-system-monthly-climatologies>, <http://ldas.gsfc.nasa.gov/nldas/>, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/grads-gds/gldas>.

Références:

Mitchell, K., D. Lohmann, P. Houser, E. Wood, J. Schaake, A. Robock, B. Cosgrove, J. Sheffield, Q. Duan, L. Luo, R. Higgins, R. Pinker, J. Tarpley, D. Lettenmaier, C. Marshall, J. Entin, M. Pan, W. Shi, V. Koren, J. Meng, B. Ramsay et A. Bailey, 2004: «The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modelling system», *Journal of Geophysical Research*, 109:D07S90, doi:10.1029/2003JD003823.

Rodell, M., P. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosogrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. Entin, J. Walker, D. Lohmann et D. Toll, 2004: «The Global Land Data Assimilation System», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3):381–394.

Xia, Y., K. Mitchell, M. Ek, J. Sheffield, B. Cosgrove, E. Wood, L. Luo, C. Alonge, H. Wei, J. Meng, B. Livneh, D. Lettenmaier, V. Koren, Q. Duan, K. Mo, Y. Fan et D. Mocko, 2012: «Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS-2): 1. Intercomparison and application of model products», *Journal of Geophysical Research*, 117:D03109, doi:10.1029/2011JD016048.

Désignation de l'indice: MSDI – Indice de sécheresse normalisé multivarié

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Défini par Hao et AghaKouchak à l'Université de Californie à Irvine (États-Unis).

Caractéristiques: À partir de données sur les précipitations et l'humidité du sol, l'indice décèle et classe les épisodes de sécheresse en analysant les déficits de ces deux paramètres. Il permet de détecter des conditions sèches lorsque les indicateurs classiques fondés sur les précipitations ou sur l'humidité du sol n'y parviennent pas toujours.

Paramètres d'entrée: Valeurs mensuelles des précipitations et de l'humidité du sol provenant du système MERRA-Land (analyse rétrospective de l'ère moderne-terres émergées). Ces données sont produites sur une grille de $0,66^\circ \times 0,50^\circ$ depuis 1980.

Applications: L'indice sert à déceler et suivre les sécheresses lorsque les précipitations et l'humidité du sol conditionnent largement les impacts.

Points forts: Les valeurs aux points de grille sur l'ensemble du globe représentent bien tous les secteurs. Grâce à une échelle d'humidité et de sécheresse, l'indice ne se limite pas au suivi des conditions sèches. Il est parfait pour les zones pour lesquelles on manque de bonnes observations de surface sur de longues périodes. Son emploi est assez simple car l'utilisateur n'a pas à introduire de données. Divers indices peuvent être obtenus à partir du MSDI.

Points faibles: Tous les secteurs et tous les régimes climatiques ne sont pas représentés de manière uniforme vu la taille des mailles. Les relevés remontent à 1980, ce qui est très court pour les applications climatologiques. Tout ajustement exigerait d'obtenir le programme et les données d'entrée. Les valeurs ne sont pas produites à toutes les échelles temporelles pour le SPI et pour l'indice d'humidité du sol normalisé.

Sources d'information: La méthode est bien décrite dans les articles scientifiques, et des ressources et cartes sont facilement accessibles en ligne, <http://drought.eng.uci.edu/>.

Référence: Hao, Z. et A. AghaKouchak, 2013: «Multivariate Standardized Drought Index: a multi-index parametric approach for drought analysis», *Advances in Water Resources*, 57:12-18.

Désignation de l'indice: USDM – Système américain de suivi de la sécheresse

Facilité d'emploi: Vert

Origine: Mis au point par Svoboda et ses collaborateurs à la fin des années 1990 pour analyser les conditions de sécheresse à partir de nombreux indicateurs et paramètres d'entrée, en comparant les données récentes aux conditions passées. C'était la première fois que l'on recourait à une approche «composite» en mode opérationnel aux États-Unis.

Caractéristiques: Le système repose sur la méthode des centiles afin de pouvoir comparer les indicateurs et les indices établis à différentes périodes. Il comporte une échelle d'intensité à cinq niveaux, allant de conditions anormalement sèches qui se répètent tous les trois à cinq ans aux conditions exceptionnellement sèches qui surviennent tous les cinquante ans environ. La méthode est souple, dans la mesure où le nombre de données d'entrée est variable, et laisse place à une certaine subjectivité qui permet d'inclure dans l'analyse les impacts associés à la sécheresse.

Paramètres d'entrée: Au choix, aucun nombre d'indicateurs n'étant fixé. Quelques données seulement étaient employées au départ. Le système analyse aujourd'hui 40 à 50 paramètres: indices de sécheresse, humidité du sol, données hydrologiques, données climatologiques, valeurs modélisées et données de télédétection. Il est assez souple pour intégrer les nouveaux indicateurs qui sont élaborés.

Applications: Il est idéal pour suivre les sécheresses qui ont de nombreux impacts, notamment sur l'agriculture et les ressources en eau, indépendamment de la saison et du régime climatique. Les valeurs obtenues sont hebdomadaires, mais peuvent être adaptées en vue d'analyses mensuelles.

Points forts: Les résultats sont fiables en raison du grand nombre d'indicateurs et d'indices utilisés. Du fait de sa souplesse, le système peut répondre aux besoins de divers utilisateurs. Il s'agissait d'une manière inédite de détecter les conditions de sécheresse et de les classer en fonction de leur intensité. Le système permet d'analyser les données à diverses échelles temporelles par la méthode des centiles.

Points faibles: Des données opérationnelles sont requises, car ce sont les valeurs les plus récentes qui procurent les meilleurs résultats au moment de l'analyse. Si l'on ne dispose que de quelques données d'entrée, l'analyse sera de moindre qualité, mais elle reste possible.

Sources d'information: La méthode est bien expliquée dans les articles scientifiques et en ligne, <http://droughtmonitor.unl.edu/>.

Référence: Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus et S. Stephens, 2002: «The drought monitor», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8):1181-1190.

APPENDICE: RÉSULTATS D'ENQUÊTE

Tous les quatre ans, la Commission de météorologie agricole de l'OMM demande aux Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) de remplir un questionnaire au titre des Rapports nationaux sur les progrès réalisés en météorologie agricole. L'une des parties de l'enquête la plus récente (2010–2014) portait sur les indices de sécheresse utilisés dans le Service et/ou le pays ou territoire. Le tableau 2 présente les résultats préliminaires obtenus. Cette liste n'est pas exhaustive, mais donne une bonne idée des indices de sécheresse qui sont actuellement employés ou disponibles. L'instruction donnée aux SMHN était la suivante: «Veuillez énumérer les cinq indices de sécheresse les plus utilisés dans votre Service».

Tableau 2. Liste préliminaire des indices de sécheresse selon l'enquête

<i>Pays/territoire</i>	<i>Indices de sécheresse</i>
Allemagne	Indice de précipitations normalisé; indice de températures normalisé; bilan hydrique climatique; humidité du sol exprimée par la quantité d'eau disponible aux plantes selon la capacité au champ à différentes profondeurs
Argentine	Indice de précipitations normalisé; quintiles; bilan hydrique du sol; probabilité d'apparition; nombre maximal de jours consécutifs sans précipitations
Autriche	Indice de précipitations normalisé; déciles des précipitations
Bélarus	Modèles de productivité des cultures agricoles; indice d'humidité de Shashko; mesure de l'humidité de Protserova; réserves d'humidité dans le sol; nombre de jours dans le mois où l'humidité relative était inférieure ou égale à 30 %
Belgique	Sécheresse météorologique, déficit pluviométrique
Belize	Indice de précipitations normalisé
Bosnie-Herzégovine	Indice de précipitations normalisé; coefficient hydrothermique (Selyaninov); indice d'aridité; indice de sécheresse de Palmer; rapport à la normale des précipitations; évapotranspiration de référence; bilan hydrique du sol
Brésil	Indice de précipitations normalisé; indice de sécheresse de Palmer; indice d'évapotranspiration normalisé; indice d'humidité des cultures; déciles et quintiles; indices de sécheresse par type de culture
Bulgarie	Indice d'humidité du sol; indice d'aridité; indice de Thornthwaite; indice de précipitations normalisé; indice de sécheresse de Palmer; coefficient hydrothermique de Selyaninov
Canada	Indice de précipitations normalisé; indice de réaction de la végétation à la sécheresse; écart de précipitations; indice de sécheresse de Palmer; indices mixtes entrant dans un modèle d'essai
Chili	Indice de précipitations normalisé; indice de végétation par différence normalisé; rapport à la normale des précipitations
Chine	Indice de déficit hydrique des cultures; indice d'humidité du sol; indice d'anomalie des précipitations
Chypre	Indice de précipitations normalisé; indice de sécheresse de Bhalme-Mooley
Côte d'Ivoire	Indice de satisfaction des besoins en eau; bilan hydrique
Croatie	Indice de précipitations normalisé; suivi des conditions sèches/humides et prévision à échéance de sept jours; hauteur cumulée des précipitations; diagramme de Walter; anomalies mensuelles des précipitations et des températures
Espagne	Indice de précipitations normalisé; teneur en eau du sol (eau disponible en proportion de la capacité de rétention selon un modèle du bilan hydrique du sol)
États-Unis d'Amérique	Indice de précipitations normalisé; indice de sécheresse de Palmer; indice d'humidité des cultures; indice d'apport d'eau de surface; rapport à la normale des précipitations

Pays/territoire	Indices de sécheresse
Ex-République yougoslave de Macédoine	Indice de précipitations normalisé; déciles; indice de sécheresse de Palmer; indice d'aridité; indice de Lang
Fédération de Russie	Rapport entre les précipitations mensuelles et la somme des températures; rapport entre les précipitations et le déficit annuel moyen d'humidité de l'air; rapport entre le stockage d'eau dans le sol pendant la période étudiée et la somme des déficits d'humidité de l'air pendant la même période (multiplié par 0,375); nombre de jours où l'humidité relative de l'air était inférieure à 30 %; nombre de jours où la température maximale de l'air était supérieure à 25 °C; réserves d'eau dans le sol, couches de 0 à 20, 0 à 50 et 0 à 100 cm; somme des conditions météorologiques anormales; écarts de la température moyenne de l'air; somme des précipitations et réserves d'eau dans le sol jusqu'à 1 m de profondeur par rapport aux valeurs normales
Grèce	Indice de précipitations normalisé; indice de sécheresse de Palmer; indice de sécheresse du <i>Bureau of Reclamation</i> des États-Unis; indice de sécheresse de Palfai
Hong Kong, Chine	Indice de précipitations normalisé
Iran, République islamique d'	Calculs quotidiens: indice de sécheresse efficace, indice d'aridité, déciles, rapport à la normale des précipitations; calculs hebdomadaires: indice des conditions de température, indice des conditions de végétation, indice de santé de la végétation; calculs mensuels: indice de précipitations normalisé, indice de sécheresse du <i>Bureau of Reclamation</i> des États-Unis
Israël	Indice de précipitations normalisé; rapport des moyennes de précipitations
Jamaïque	Indice de précipitations normalisé; proportion sur deux mois de la moyenne sur 30 ans
Jordanie	Indice de précipitations normalisé; indice d'aridité
Kazakhstan	Coefficient hydrothermique de Selyaninov, indice de précipitations normalisé
Libye	Indice de précipitations normalisé
Lituanie	Coefficient hydrothermique de Selyaninov; indice de précipitations normalisé
Nouvelle-Zélande	Nombre de jours de déficit d'humidité du sol; indice de précipitations normalisé; profondeur du déficit d'évapotranspiration potentielle; déciles et anomalies des précipitations; évaluation spatiale de la sécheresse
Ouzbékistan	Nombre de jours où les températures étaient supérieures à 40 °C; indice d'aridité (hauteur annuelle de précipitations, mm/an); apport d'eau de ruissellement pendant la saison de croissance (d'avril à septembre); accumulation de neige; diminution de l'humidité du sol jusqu'à 4 mm ou moins
Pakistan	Indice de précipitations normalisé; rapport à la normale; écart en pourcentage; indice de végétation par différence normalisé; température à la surface des terres émergées
Pérou	Indice de sécheresse de Palmer; indice de précipitations normalisé; indice de ruissellement normalisé; indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé
République démocratique du Congo	Rapport à la normale des précipitations
République dominicaine	Indice de précipitations normalisé
République tchèque	Sécheresse agrométéorologique; évapotranspiration réelle et potentielle et humidité du sol selon un modèle opérationnel du bilan hydrique; bilan hydrique climatique; rapport à la normale des précipitations; relevés hydrologiques (écoulement fluvial, niveaux des réservoirs, par exemple)
République-Unie de Tanzanie	Indice de précipitations normalisé; rapport à la normale des précipitations
Slovénie	Anomalie des précipitations; indice de précipitations normalisé; bilan hydrique météorologique cumulé; indice de stress de sécheresse décadaire, nombre de jours consécutifs de conditions sèches

Pays/territoire	Indices de sécheresse
Sri Lanka	Indice de précipitations normalisé
Suisse	Indice de précipitations normalisé; indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé; anomalie des précipitations; indice de référence pour la sécheresse agricole
Thaïlande	Indice d'humidité disponible; indice de précipitations normalisé
Trinité-et-Tobago	Indice de précipitations normalisé; indices de sécheresse de Palmer
Turquie	Indice de précipitations normalisé; rapport à la normale; indice de sécheresse de Palmer
Ukraine	Coefficient hydrothermique de Selyaninov; coefficient d'apport d'humidité de Protserov; indice d'aridité de Ped; indice de productivité météorologique de Bagrov; indice de précipitations normalisé

BIBLIOGRAPHIE

Le lecteur trouvera ici les publications qui sont citées dans les chapitres 1 à 6 et celles qui ont servi à définir les grandes lignes du manuel. Les articles consacrés à un indicateur ou un indice particulier figurent dans la rubrique Référence(s) de chaque élément décrit dans le chapitre 7.

Eriyagama, N., V. Smakhtin et N. Gamage, 2009: *Mapping Drought Patterns and Impacts: a Global Perspective*, IWMI Research Report No. 133, Colombo, International Water Management Institute, http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/PUB133/RR133.pdf.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (sous la direction de C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley), Cambridge et New York, Cambridge University Press.

Hayes, M.J., 2011: *Comparison of Major Drought Indices: Introduction*, National Drought Mitigation Center, <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro.aspx>.

Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall et M. Widhalm, 2011: «The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92:485–488.

Heim, R.R., 2002: «A review of twentieth-century drought indices used in the United States», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:1149–1165.

Hisdal, H. et L.M. Tallaksen (dir.), 2000: *Drought Event Definition*, Technical Report 6 of the ARIDE Project, Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe, Département de géophysique, Université d'Oslo, Norvège.

Keyantash, J. et J.A. Dracup, 2002: «The quantification of drought: an evaluation of drought indices», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:1167–1180.

Lawrimore, J., R.R. Heim, M. Svoboda, V. Swail et P.J. Englehart, 2002: «Beginning a new era of drought monitoring across North America», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:1191–1192.

Lloyd-Hughes, B., 2014: «The impracticality of a universal drought definition», *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3):607–611, doi:10.1007/s00704-013-1025-7.

McKee, T.B., N.J. Doesken et J. Kleist, 1993: *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*, Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17–23 janvier 1993, Anaheim (CA), Boston (MA), American Meteorological Society.

Mishra, A.K. et V.P. Singh, 2010: «A review of drought concepts», *Journal of Hydrology*, 391:202–216.

—, 2011: «Drought modeling. A review», *Journal of Hydrology*, 403:157–175.

Organisation météorologique mondiale, 2006: *Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs* (OMM-N° 1006), Genève, http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_fr_2006.pdf.

—, 2012: *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé* (OMM-N° 1090), Genève, http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_fr_2012.pdf.

Organisation météorologique mondiale (OMM) et Partenariat mondial pour l'eau (GWP), 2014: *Lignes directrices pour une politique nationale de gestion de la sécheresse: Un modèle d'action* (D.A. Wilhite), Integrated Drought Management Programme Tools and Guidelines Series 1, OMM, Genève, et GWP, Stockholm, http://www.droughtmanagement.info/literature/GWP-WMO_IDMP_NDMPG_2014_fr.pdf.

Organisation météorologique mondiale (OMM), Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD) et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2013: *Réunion de haut niveau sur les politiques nationales en matière de sécheresse*, 11–15 mars 2013, Genève, Document directif: Politiques nationales de gestion de la sécheresse, Genève, http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/drought/hmndp/documents/PolicyDocumentRev_12-2013_Fr.pdf.

Pulwarty, R.S. et M.V.K. Sivakumar, 2014: «Information systems in a changing climate: early warnings and drought risk management», *Weather and Climate Extremes*, 3:14–21.

Sivakumar, M.V.K., R.P. Motha, D.A. Wilhite et D.A. Wood (dir.), 2011: *Agricultural Drought Indices*, Proceedings of a WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2–4 juin 2010, Murcie (Espagne) (AGM-11, WMO/TD-No. 1572; WAOB-2011), Genève, http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_agricultural_drought_indices_proceedings_2010.pdf.

Svoboda, M., B.A. Fuchs, C. Poulsen et J.R. Nothwehr, 2015: «The drought risk atlas: enhancing decision support for drought risk management in the United States», *Journal of Hydrology*, 526:274–286, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.006.

Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus et S. Stephens, 2002: «The drought monitor», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8):1181–1190.

Wardlow, B.D., M.C. Anderson et J.P. Verdin (dir.), 2012: *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*, Boca Raton (FL), CRC Press.

Wilhite, D. et M. Glantz, 1985: «Understanding the drought phenomenon: the role of definitions», *Water International*, 10:111–120.

Zargar, A., R. Sadiq, B. Naser et F.I. Khan, 2011: «A review of drought indices», *Environmental Reviews*, 19:333–349.

Le Programme de gestion intégrée des sécheresses a été lancé par l'Organisation météorologique mondiale et le Partenariat mondial pour l'eau en mars 2013, lors de la Réunion de haut niveau sur les politiques nationales en matière de sécheresse. Il collabore avec un large éventail de partenaires dans le but d'assister les intervenants à tous les niveaux. Le Programme coordonne à l'échelle du globe la production d'informations scientifiques et la diffusion de connaissances et de bonnes pratiques afin de donner des orientations sur les instruments de politique et de gestion propices à une démarche intégrée face à la sécheresse. Il concourt au Cadre mondial pour les services climatologiques, notamment aux domaines prioritaires que sont la réduction des risques de catastrophe, l'eau, l'agriculture et la sécurité alimentaire, l'énergie et la santé. Il entend surtout aider les régions et les pays à élaborer des politiques axées sur la prévention et à établir des mécanismes efficaces de prévision, ce à quoi devrait contribuer le présent manuel.

www.droughtmanagement.info



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE



Global Water
Partnership

Towards a water secure world

Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à :

Organisation météorologique mondiale

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH-1211 Genève 2 – Suisse

Bureau de la communication et des relations publiques

Tél.: +41 (0) 22 730 83 14/15 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Courriel: cpa@wmo.int

Unité d'appui technique du Programme de gestion intégrée des sécheresses

s/c Département du climat et de l'eau

Tél.: +41 (0) 22 730 83 05 – Fax: +41 (0) 22 730 80 42

Courriel: idmp@wmo.int

public.wmo.int

Global Water Partnership Global Secretariat

PO Box 24177, SE-104 51 Stockholm, Suède

Tél.: +46 8 1213 86 00 – Courriel: gwp@gwp.org