CADRE DE POLITIQUE DE RÉSILIENCE, D'ADAPTATION ET DE GESTION DE LA SÉCHERESSE

DIRECTIVES TECHNIQUES À L'APPUI

United Nations
Convention to Combat
Desertification

CADRE DE POLITIQUE DE RÉSILIENCE, D'ADAPTATION ET DE GESTION DE LA SÉCHERESSE

DIRECTIVES TECHNIQUES À L'APPUI

United Nations
Convention to Combat
Desertification

CADRE DE POLITIQUE DE RÉSILIENCE, D'ADAPTATION ET DE GESTION DE LA SÉCHERESSE : DIRECTIVES TECHNIQUES À L'APPUI

Rédacteur : Daniel Tsegai (CNULCD)
Auteur : Neville D. Crossman

Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD)
UN Campus Platz der Vereinten Nationen 1
53113 Bonn Allemagne
Téléphone : +49-228 / 815-2800
Fax : +49-228 / 815-2898/99
www.unccd.int
secretariat@unccd.int

Tous droits réservés.
La publication n'implique pas un cautionnement de quelque nature que ce soit.

Imprimé en Inde sur du papier FSC.

Publié par la CNULCD, à Bonn, Allemagne
Août 2019
© UNCCD, 2019

Toutes les photos © ShutterStock

Avis de non-responsabilité
Les opinions exprimées dans cette publication ne sont pas nécessairement celles des agences ou des pays impliqués dans ce projet. Les désignations utilisées dans le document et la présentation des éléments qui y figurent n'impliquent l'expression d'aucune opinion de la part des agences de l'ONU. Sauf indication contraire, les idées et opinions exprimées par les contributeurs ne représentent pas nécessairement les vues de leurs employeurs. Les éditeurs souhaiteraient être informés des éventuelles erreurs ayant pu échapper au processus de révision

Remerciements :
Les centres de liaison de la Convention des Nations Unies en Égypte, en Chine, en Colombie, au Brésil, en Suisse, en Australie, en Afrique du Sud, dans l'Union européenne et aux États-Unis.

TABLE DES MATIERES

Liste des acronymes v

1. Introduction 1
   - 1.1 Cadre politique de resilience, d'adaptation et de gestion de la secheresse 1
   - 1.2 Les « 3 piliers » de la reduction des risques de secheresse 3
   - 1.3 Objet de ces directives techniques 4

2. Mise en place des systemes de surveillance de la secheresse et d'alerte rapide 5
   - 2.1 Aperçu 5
   - 2.2 Definitions 5
   - 2.3 Selection des indicateurs de secheresse et des declencheurs 6
   - 2.4 Quels sont les 'meilleurs' indicateurs de surveillance et de prevision de la secheresse ? 11
     - 2.4.1 Sécheresse météorologique 11
     - 2.4.2 Sécheresse hydrologique 13
     - 2.4.3 Sécheresse agricole 13
     - 2.4.4 Sécheresse socio-économique 14
     - 2.4.5 Composite 14
   - 2.5 Previsions de secheresse fiables 16
   - 2.6 Évaluation du risque de secheresse pour la surveillance et l'alerte rapide 18
   - 2.7 Communiquer et reagir aux avertissements de secheresse 18

3. Évaluer la vulnerabilite a la secheresse et ses risques 19
   - 3.1 Aperçu 19
   - 3.2 Definitions 19
   - 3.3 Évaluations de la vulnerabilite a la secheresse 20
     - 3.3.1 Définir les composantes de la vulnérabilité à la sécheresse 20
     - 3.3.2 Sélection de variables pour l'évaluation de la vulnérabilité 21
     - 3.3.3 Préparation des variables pour l'évaluation de la vulnérabilité 23
     - 3.3.4 Validation du modèle d'évaluation de la vulnérabilité 26

4. Limiter les impacts de la secheresse et mieux reagir a la secheresse 27
   - 4.1 Aperçu 27
   - 4.2 Definitions 27
   - 4.3 Reduire l'exposition et augmenter la resistance a la secheresse 27
     - 4.3.1 Diversifier et moderniser l'agriculture 27
     - 4.3.2 Gestion durable des ressources en terres et en eau 28
     - 4.3.3 Éducation et renforcement des capacités 29
   - 4.4 Transferer et partager les risques de la secheresse 29

5. Recommendations 31

6. References 33

FIGURES

Figure 1. Cadre de politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse (DRAMP) 2

Figure 2. La version 2.0 de la classification intégrée des phases (par zone) utilisée par le réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine pour classer les famines 6

Figure 3. Le SPI mondial sur 6 mois de décembre 2016 à mai 2017. Les valeurs SPI peuvent être assimilées à une comparaison de l'écart type des précipitations d'un endroit à l'autre 12

Figure 4. Indice de stress agricole de la FAO pour le 1er juin 2017 13

Figure 5a. US Drought Monitor le 29 novembre 2016 14
Figure 5b. US Drought Monitor le 14 février 2017 14

Figure 6. Vue schématique de l'algorithme du système mondial intégré de surveillance et de prévision de la sécheresse 16

Figure 7a. Perspectives de sécheresse saisonnière de la sécheresse de l'USDM pour l'été 2012, fournissant un exemple de prévision très imprécise 17
Figure 7b. Perspectives de sécheresse saisonnière de la sécheresse observée par l'USDM pour l'été 2011, fournissant un exemple de prévision précise 17

Figure 8. Exemple de cadre méthodologique pour l'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse 20

Figure 9. Le cadre conceptuel indiquant les multiples dimensions à inclure pour évaluer la vulnérabilité à la sécheresse 21

Figure 10a. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à l'échelle du village/Andrha Pradesh, centre-sud de l'Inde 22
Figure 10b. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à districts nationaux/administratifs en Corée du Sud 22
Figure 10c. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à Échelle continentale/pays d'Afrique 22
Figure 10d. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à Échelle globale 23

TABLEAUX

Tableau 1. Résumé des principaux indicateurs et indices de sécheresse 8

Tableau 2. Probabilité de récurrence d'un événement de sécheresse décrit par le SPI

Tableau 3. Les catégories de sécheresse de l'USDM et leur association aux six indices d'intrant 15

Tableau 4. Dimensions et indicateurs/variables commun(e)s à l'échelle mondiale utilisé(e)s dans les évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse 24

LISTE DES ACRONYMES

ACP	Analyse des principales composantes
ASI	Indice de stress agricole
CPC	Centre de prévision climatique
DRAMP	Politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse
EDI	Indice de sécheresse effectif
FAO	Organisation de l'Alimentation et de l'Agriculture des Nations Unies
GDIS	Système mondial d'information sur la sécheresse
GIDMaPS	Système intégré mondial de surveillance et de prévision de la sécheresse
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
GWP	Global Water Partnership (Partenariat mondial pour l'eau)
IDRI	Indicateur de fiabilité de la demande en flux entrant
IPCC (GIEC)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IRI	International Research Institute (for Climate and Society) : institut international de recherche sur le climat et la société
MSDI	Indice de sécheresse normalisé multivarié
MSRRI	Indice de fiabilité et de résilience normalisé multivarié
NASA	Agence spatiale américaine
NDVI	Indice différentiel normalisé de végétation
OFDA/CRED	OFDA : Bureau d'assistance étrangère en cas de catastrophe/CRED : Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes
PIB	Produit Intérieur Brut
SDI	Indice de sécheresse des cours d'eau
SMIAR	Système mondial d'information et d'alerte rapide
SPEI	Indice normalisé d'évapotranspiration par précipitation
SPI	Indice de précipitations normalisé
SSFI	Indicateur d'humidité du sol
SSI	Indice d'humidité du sol normalisé
TIC	Technologies de l'information et de la communication
UNCCD (CNULCD)	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
UNISDR	Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe (désormais appelé UNDRR)
UNW-DPC	Programme d'ONU-eau pour le développement des capacités
USDM	United States Drought Monitor
USGS	United States Geographical Survey
VHI	Indice de santé de la végétation
WMO	Organisation Météorologique Mondiale
WRI	World Resources Institute
WSRI	Indicateur de résilience de stockage de l'eau

1 INTRODUCTION

Ces directives techniques présentent des informations pratiques pour soutenir l'élaboration et la mise en œuvre de plans nationaux de résilience, d'adaptation et de gestion à la sécheresse. Le cadre de politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse (DRAMP)[1] qui l'accompagne décrit l'évolution récente de la sécheresse dans le contexte de la réduction des risques de catastrophe et propose un cadre intégrant six objectifs permettant aux pays de réduire leur exposition et leur vulnérabilité à la sécheresse, d'augmenter leur résilience, de transformer leurs économies et institutions politiques et culturelles, d'élaborer des plans de gestion globale de la sécheresse et de partager les risques de sécheresse. Des progrès dans la mise en œuvre du cadre DRAMP ne peuvent être réalisés que si l'on dispose de directives soutenant le développement et la mise en œuvre de systèmes de surveillance de la sécheresse, d'alerte rapide, d'évaluation de la vulnérabilité et des risques, ainsi que d'atténuation des risques et d'intervention.

Ces directives techniques et le cadre DRAMP devraient sous-tendre un processus de planification de la gestion de la sécheresse. La planification de la sécheresse donne aux décideurs et aux parties prenantes la possibilité d'identifier les communautés, les secteurs et les régions vulnérables à la sécheresse et de trouver des moyens d'atténuer les impacts avant qu'ils ne surviennent. La planification de la sécheresse est un moyen efficace et économique d'allouer des ressources à la gestion de la sécheresse. Une planification de la sécheresse transparente et inclusive responsabilise les populations, sensibilise, renforce les capacités et accroît la résilience des communautés et des nations face aux menaces croissantes de dégradation des terres et de désertification que posent le changement climatique et la sécheresse. Le processus existant en 10 étapes peut guider l'élaboration et la mise en œuvre de plans de lutte contre la sécheresse (voir Crossman (2017) et World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2014)) ; ces directives techniques soutiennent notamment l'étape 5 : la rédaction des éléments clés du plan de gestion de la sécheresse.

1.1 Cadre politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse

Le cadre DRAMP adopte une approche intégrée et à plusieurs volets pour réduire les risques et les impacts de la sécheresse. Organisé autour de six objectifs transversaux (Figure 1), le cadre DRAMP identifie des actions pragmatiques pour aider les pays à mieux se préparer et faire face à la sécheresse et oriente la conception et la mise en œuvre de politiques de lutte contre la sécheresse du niveau national au niveau sous-national. Les six objectifs du cadre DRAMP ne s'excluent pas mutuellement et bon nombre des actions de gestion et d'adaptation à la sécheresse s'appliquent à plus d'un objectif. Les six objectifs du cadre DRAMP sont les suivants:

1. **Réduire l'exposition à la sécheresse:** réduire les risques de pertes humaines, de moyens de subsistance, de services et ressources écosystémiques, d'infrastructures et d'actifs économiques, sociaux ou culturels dans des zones susceptibles d'être touchées par la sécheresse.

   Exemple: la diversification des cultures d'un système céréalier en monoculture il y a 30 ans à un mélange de cultures céréalières avec des pommes de terre et du maïs tolérant à la sécheresse a réduit le risque de pertes agricoles dû à la sécheresse accrue dans la partie centrale de la Mongolie, en Chine (Lei et al. 2016).

2. **Réduire la vulnérabilité à la sécheresse:** réduire la propension ou la prédisposition à subir les effets négatifs de la sécheresse.

   Exemple les agriculteurs ont une plus grande capacité d'adaptation à la sécheresse lorsqu'ils ont plus d'expérience, sont mieux éduqués, ont un régime foncier plus sûr, un meilleur accès à l'électricité et sont plus conscients des risques liés au climat (Alam 2015).

[1] Voir 'Projets de cadres de politique de sensibilisation : genre, sécheresse et tempêtes de sable et de poussière', à l'adresse https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/2017-08/ICCD_COP%2813%29_19-1711042E.pdf

3. **Augmenter la résilience au risque de sécheresse:** renforcer la capacité des communautés, des écosystèmes et des économies à anticiper, absorber, atténuer ou compenser les effets de la sécheresse de manière rapide et efficace, notamment en veillant à la préservation, à la restauration ou à l'amélioration du capital naturel.

   Exemple: l'adoption d'une agriculture de conservation (minimiser la perturbation des sols, maintenir une couverture végétale permanente et introduire des rotations de cultures) augmente la biodiversité des sols et les stocks de carbone et régule les cycles de l'oxygène et des nutriments, rendant le sol et les cultures plus résistants à la chaleur et aux effets extrêmes de la sécheresse (Lal 2004, Lipper et al. 2014).

4. **Transformation:** modifier les attributs fondamentaux des systèmes sociaux, économiques et écologiques (y compris les systèmes de valeur, les régimes réglementaire, législatif ou bureaucratique, les institutions financières et les systèmes technologiques ou biologiques).

   Exemple: placer les communautés locales au centre des processus décisionnels, de la conception et de la planification des politiques en matière de sécheresse, car les conséquences sociales de la sécheresse dépendent de la capacité de la population à vivre avec un approvisionnement en eau moindre ainsi que de sa capacité d'adaptation (Logar and van den Bergh 2013).

Figure 1. Cadre de politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse (DRAMP)

Les objectifs colorés du cadre DRAMP montrent l'alignement sur chacun des *trois principaux piliers* de la réduction des risques de sécheresse. Ces directives techniques décrivent les mesures pratiques à prendre pour mettre en œuvre les *trois principaux piliers*.

Key Pilier n° 1
Mettre en place une surveillance de la sécheresse

Key Pilier n°2
Évaluer la vulnérabilité à la Sécheresse et le risque

Key Pilier n°3
Mettre en œuvre des mesures pour limiter les impacts de la sécheresse et mieux répondre à la sécheresse

5. **Préparer, intervenir et se remettre de la sécheresse:** l'épine dorsale des approches de gestion et de planification visant à réduire les risques de sécheresse, notamment la mise au point de systèmes complets de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide.

   Exemple: concevoir des systèmes complets de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide (intégrant des indicateurs multi-échelles sur le climat, les sols, l'eau et les indicateurs socio-économiques) (UNISDR 2015, Windhoek Declaration 2016), des outils d'aide à la décision et des produits d'évaluation de la sécheresse en temps réel (UNCCD et al. 2013, Tadesse 2016) fournissant des informations clés en temps utile pour appuyer les décisions.

6. **Transférer et partager les risques de sécheresse:** répartir les risques dans une partie plus large de la société de manière à inclure tous les bénéficiaires directs et indirects d'une gestion robuste des risques de sécheresse.

   Exemple: concevoir et mettre en œuvre des stratégies financières intelligentes, réduisant les risques, qui soutiennent les secours, la reconstruction et la récupération des moyens d'existence, telles que la micro-assurance, l'assurance, la réassurance, ainsi que les pools de risques nationaux, régionaux et mondiaux (par exemple, l'assurance de l'indice météorologique et les filets de sécurité) (Shiferaw et al. 2014).

1.2 Les 'trois piliers' de la réduction des risques de sécheresse

Conformément aux principes de la réduction des risques de catastrophe (UNISDR 2015), les *trois principaux piliers* de la réduction des risques de sécheresse sont conçus pour guider les actions concrètes que les pays doivent mener pour mettre en œuvre leur politique et leurs plans de gestion de la sécheresse. Les *trois principaux piliers* sont (Tsegai et al. 2015):

Key Pilier n°1
Mise en place de systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide:

a. Surveiller les indicateurs clés et les indices de précipitations, de température, d'humidité du sol, d'état de la végétation, de débit des cours d'eau, de neige et d'eau souterraine ;
b. Développer des prévisions saisonnières fiables et développer des outils d'aide à la décision appropriés pour les secteurs touchés ;
c. Surveiller les conséquences de la sécheresse, en particulier les impacts sur les secteurs vulnérables tels que l'agriculture ;
d. Transmettre des messages d'avertissement fiables et réagir aux risques de manière mesurée et en temps voulu ;

Key Pilier n°2
Évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse et des risques:

a. Identifier les impacts de la sécheresse sur les secteurs économiques vulnérables, notamment les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture (culture et élevage), de la biodiversité et des écosystèmes, de l'énergie, du tourisme et de la santé ;
b. Évaluer les pressions physiques, sociales, économiques et environnementales sur les communautés pour identifier qui et quoi est en danger et pourquoi (avant, pendant et peu après la sécheresse) ;
c. Évaluer les conditions ou les situations qui augmentent la résistance ou la vulnérabilité à la sécheresse et la capacité d'adaptation des communautés touchées par la sécheresse ;
d. Évaluer l'ampleur des dommages ou pertes potentiels en cas de sécheresse ;

Key Pilier n°3
Mise en œuvre de mesures pour limiter les impacts de la sécheresse et mieux y réagir:

a. Mettre en œuvre des mesures structurelles ou physiques ainsi que des mesures non structurelles pour limiter les effets néfastes de la sécheresse, en fonction du degré de vulnérabilité (deuxième pilier) ;
b. La réponse inclut tous les efforts, tels que la fourniture d'assistance ou d'intervention pendant ou juste après une catastrophe pour répondre aux besoins essentiels des communautés et des secteurs vulnérables et touchés, pour assurer leur subsistance ;
c. Les mesures doivent être adaptées aux secteurs touchés par la sécheresse en fonction de leur vulnérabilité, notamment l'agriculture, l'eau et l'environnement, ainsi que les transports et le tourisme ;
d. Les mesures peuvent être à long, moyen ou court terme, en fonction du temps de mise en œuvre;
e. La biodiversité, les terres et les services écosystémiques jouent un rôle essentiel dans la réduction de la vulnérabilité et l'atténuation des effets de la sécheresse.

Ces *trois principaux piliers* ont été développés lors de la série d'ateliers régionaux de renforcement des capacités en matière de politique de gestion de la sécheresse organisés en Europe de l'Est, en Amérique latine, dans les Caraïbes, en Asie-Pacifique et en Afrique entre 2013 et 2015. Les *trois principaux piliers* sont recommandés comme base de la politique nationale de lutte contre la sécheresse et des plans de gestion, offrant un moyen pratique d'organiser de nombreuses actions et activités que les pays doivent mettre en œuvre pour mieux se préparer et répondre à la sécheresse.

1.3 Objet de ces directives techniques

Ces directives techniques examinent et présentent les informations techniques nécessaires à la mise en œuvre des *trois principaux piliers* de la politique de réduction des risques de sécheresse et des plans de gestion. Les directives soutiennent également le processus en 10 étapes de la planification et de la mise en œuvre de la gestion de la sécheresse, en particulier la cinquième étape (World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) 2014).

Le cadre DRAMP décrit de nombreuses actions pour gérer et s'adapter à la sécheresse. Certaines actions proposées par le DRAMP ne peuvent pas être conçues et mises en œuvre à court terme et/ou il n'est pas possible de concevoir des approches techniques et des lignes directrices pour soutenir leur mise en œuvre. Par exemple, certaines des actions proposées par le cadre DRAMP pour atteindre l'objectif de transformation sont des actions à long terme et de haut niveau qui remettent en question des normes culturelles et politiques établies de longue date, telles que la suppression des incitations perverses, la mise en place de procédures de coordination pangouvernementales et d'approches stratégiques de la sécheresse et la reconnaissance de la pleine valeur de l'eau, des terres et des écosystèmes.

Ce document fournit des directives techniques détaillées sur la manière de mettre en œuvre des stratégies nationales de lutte contre la sécheresse fondées sur les *trois principaux piliers* de la politique et de la gestion nationales de réduction des risques de sécheresse. Les informations contenues dans les directives techniques proviennent d'évaluations des méthodes de risque et de vulnérabilité et d'outils de surveillance et de prévision, y compris des données utilisées pour déclencher des mesures de gestion de la sécheresse telles que les précipitations, les débits des cours d'eau, les eaux souterraines, les niveaux de réservoir et l'humidité du sol. Le document fournit également un inventaire des indicateurs clés utilisés pour surveiller et prévoir l'apparition, la durée, la fin, la sévérité et les impacts de la sécheresse. Un grand nombre d'ouvrages scientifiques et les principaux documents de politique sur la sécheresse (UNCCD et al. 2013, Tsegai et al. 2015, UNISDR 2015, Tadesse 2016, Windhoek Declaration 2016) ont été consultés pour garantir que ces directives techniques contiennent les dernières avancées scientifiques et politiques.

2 MISE EN PLACE DES SYSTÈMES DE SURVEILLANCE DE LA SÉCHERESSE ET D'ALERTE RAPIDE

Les systèmes d'alerte rapide à la sécheresse visent généralement à suivre, évaluer et fournir des informations pertinentes sur les conditions et les tendances climatiques, hydrologiques et d'approvisionnement en eau. Idéalement, ils comportent à la fois une composante de surveillance (y compris des impacts) et une composante de prévision. L'objectif est de fournir des informations en temps voulu avant ou pendant l'apparition précoce de la sécheresse afin de pouvoir agir rapidement (à l'aide des seuils de déclenchement) dans le cadre d'un plan de gestion des risques de sécheresse afin de réduire les impacts potentiels. Une approche diligente et intégrée est essentielle pour surveiller un risque aussi lent.

World Meteorological Organization and Global Water Partnership (2016)

2.1 Aperçu

Ce chapitre fournit des directives pour la sélection et le calcul d'indicateurs ou d'indices permettant de surveiller et de prévoir l'apparition, la fin et les impacts de la sécheresse, et d'identifier les éléments déclencheurs des différentes interventions de gestion pendant une sécheresse. La sécheresse est un aléa naturel qui se prête particulièrement bien à la surveillance, car sa lenteur permet d'observer les changements dans les précipitations, la température, l'humidité du sol, les réserves d'eau de surface et souterraines et les comportements sociaux et économiques. La détection précoce de ces changements est importante pour déclencher des actions efficaces afin de se préparer à la sécheresse et d'atténuer ses effets. Il est important que les indicateurs et les indices décrivent avec précision les effets de la sécheresse. Les indicateurs évalués dans le présent document ont déjà, à un certain niveau, réussi le test d'efficacité et de précision, car ils sont couramment utilisés dans les régions du monde exposées à la sécheresse.

2.2 Definitions

Il est important de définir clairement la différence entre les **indicateurs** et **les indices**. Les indicateurs sont des variables météorologiques, hydrologiques ou biophysiques (telles que les précipitations, la température, le débit des cours d'eau, les niveaux de stockage de l'eau souterraine et de l'eau, et l'humidité du sol) qui décrivent les conditions de sécheresse (World Meteorological Organization and Global Water Partnership 2016). Un indice est une représentation numérique calculée de la sévérité de la sécheresse, souvent calculée à l'aide de combinaisons d'indicateurs météorologiques, hydrologiques ou biophysiques (World Meteorological Organization and Global Water Partnership 2016). Les indices fournissent des informations quantitatives sur la sévérité, le moment, la durée et l'étendue d'une sécheresse. La sévérité représente un écart par rapport à la norme et les seuils de sévérité de la sécheresse identifient le début, la fin et le lieu de la sécheresse. Le moment du début et de la fin de la sécheresse est également très important, car son impact peut être très variable, en fonction du moment où il y a pénurie d'humidité et d'autres facteurs. Par exemple, une courte sécheresse peut avoir un impact important si elle survient pendant une phase clé du cycle de croissance des cultures, ou une sécheresse plus longue peut avoir un impact moindre si elle survient au stade de la jachère. Les indices de sécheresse calculés à l'aide de données historiques peuvent être utilisés pour estimer la probabilité future de survenue et de sévérité de la sécheresse.

2.3 Sélection des indicateurs de sécheresse et des déclencheurs

Les indicateurs et les indices de sécheresse sont un outil essentiel pour les décideurs et le grand public afin de détecter la sécheresse, d'évaluer ses impacts et de prendre des mesures pour réduire les risques (Steinemann et al. 2015). Les indicateurs et indices de sécheresse lient les données à la prise de décision et peuvent être utilisés pour répondre aux questions suivantes:

- Comment savons-nous que la situation actuelle peut être qualifiée de sécheresse ?
- Quelle est la sévérité de la sécheresse ?
- Quand devrions-nous agir ?
- Comment savons-nous que la sécheresse est terminée ?

Les déclencheurs sont des valeurs spécifiques d'indicateurs qui déterminent le moment et l'ampleur des mesures prises pour faire face aux conditions de sécheresse (Steinemann and Cavalcanti 2006). La caractérisation de la sécheresse utilisera généralement les termes "*sécheresse légère, modérée, grave, extrême*" ou "*de niveau 1, 2 ou 3*", basés sur un seul indicateur ou une combinaison de ceux-ci. Le réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine (FEWS-NET) utilise une approche plus nuancée, qui se concentre directement sur les impacts des périodes sèches prolongées (Figure 2). Il existe différents déclencheurs d'intervention dans chaque catégorie d'occurrence et d'impact de la sécheresse.

Cependant, le choix et la combinaison des variables utilisées pour élaborer les indicateurs de sécheresse ainsi que l'identification des déclencheurs doivent être effectués de manière transparente et scientifiquement valable pour garantir la validité des plans de gestion de la sécheresse. Plusieurs études évaluent l'utilité des indicateurs de sécheresse pour aider à sélectionner les meilleurs types et combinaisons d'indicateurs et de déclencheurs (Byun and Wilhite 1999, Heim 2002, Keyantash and Dracup 2002, Zargar et al. 2011, Dogan et al. 2012, Jain et al. 2015, Fluixá-Sanmartín et al. 2018). Les travaux de Steinmann et de ses collègues au cours des 15 dernières années visaient à améliorer la compréhension des besoins des utilisateurs finaux en indicateurs et en indices de sécheresse, afin de permettre la conception d'un processus robuste de sélection des indicateurs et des indices appropriés (Steinemann and Cavalcanti 2006, Steinemann et al. 2015). L'un des résultats précieux de leurs travaux est un processus en 12 étapes pour la sélection d'un indicateur et d'un déclencheur de sécheresse appliqués à l'élaboration d'un plan de gestion de la sécheresse pour l'État de Géorgie, aux États-Unis. L'encadré 1 énumère les 12 étapes, en expliquant brièvement chacune d'elles. Les autorités nationales et sous-nationales développant des systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide dans le cadre d'un plan de gestion de la sécheresse sont encouragées à suivre le processus en 12 étapes décrit dans l'encadré 1.

Figure 2. La version 2.0 de la classification intégrée des phases (par zone) utilisée par le réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine pour classer les famines

	Phase 1 Minime	Phase 2 Accentuée	Phase 3 Crise	Phase 4 Urgence	Phase 5 Famine
Nom et description de phase	*Plus de quatre foyers sur cinq sont en mesure de satisfaire à leurs besoins essentiels alimentaires et non-alimentaires sans avoir à mettre en place des stratégies atypiques et non durables d'accès à la nourriture et aux revenus, comme le fait de faire appel à une assistance humanitaire*	*Malgré une assistance humanitaire, au moins un foyer sur cinq, dans la région, se trouve dans la situation suivante ou dans une situation pire : Consommation alimentaire adéquate minimale mais impossibilité d'assurer des dépenses non-alimentaires essentielles sans s'engager dans des stratégies d'adaptation irréversibles.*	*Malgré une assistance humanitaire, au moins un foyer sur cinq, dans la région, se trouve dans la situation suivante ou dans une situation pire :* *Écarts de consommation alimentaire avec malnutrition sévère élevée ou supérieure au niveau habituel* *OU* *Rares sont les foyers en mesure de satisfaire aux besoins alimentaires fondamentaux, et ceux qui y parviennent le font au prix d'une dégradation accélérée des moyens de subsistance, qui donnera lieu à des écarts de consommation alimentaire.*	*Malgré une assistance humanitaire, au moins un foyer sur cinq, dans la région, se trouve dans la situation suivante ou dans une situation pire :* *Importants écarts de consommation alimentaire, donnant lieu à une malnutrition sévère extrêmement élevée et à une surmortalité* *OU* *Perte extrême de moyens de subsistance qui donnera lieu, à court terme, à des écarts de consommation alimentaire.*	*Malgré une assistance humanitaire, au moins un foyer sur cinq, dans la région, souffre d'une pénurie sévère de denrées alimentaires et d'autres besoins fondamentaux entraînant une famine, une mortalité et une misère évidentes.* *(Il convient de disposer de preuves des trois critères que sont la consommation alimentaire, l'émaciation et le taux brut de mortalité pour que la situation soit considérée comme Famine)*
Objectifs de réaction prioritaire	Action nécessaire pour renforcer la résilience et réduire les risques de catastrophe	Action nécessaire pour réduire les risques de catastrophe et protéger les moyens de subsistance	**Action urgente nécessaire pour :** → Protéger les moyens de subsistance, corriger les écarts de consommation alimentaire et réduire la malnutrition sévère	Sauver des vies et des moyens de subsistance	Empêcher que la la généralisation de la mortalité et l'effondrement total des moyens de subsistance

Source: http://www.fews.net/IPC

Steinemann et al. énumèrent **un ensemble d'attributs jugés souhaitables pour les indicateurs** basés sur une série d'ateliers d'experts:

- Termes statistiquement cohérents et comparables, mesurés par exemple en percentiles ;
- Par rapport aux conditions de sécheresse historiques, afin de mettre en perspective la sévérité de la sécheresse actuelle ;
- Individuel et séparé, plutôt que pré-agrégé en un indice, mais pouvant être combiné avec des pondérations définies par l'utilisateur ;
- Facile à comprendre et à mettre en œuvre, ainsi que lié à des concepts familiers ;
- Capable de représenter une gamme de conditions, par exemple, météorologiques et hydrologiques ;
- Pertinent à différentes échelles temporelles et spatiales.

Plusieurs chercheurs ont évalué la convivialité et la pertinence des indicateurs et des indices de sécheresse pour aider à condenser plus de 100 mesures potentiellement utiles (Zargar et al. 2011) en une liste gérable à partir de laquelle des actions appropriées à la localisation peuvent être sélectionnées. Des travaux récents de l'Organisation météorologique mondiale et du Partenariat mondial pour l'eau (2016) ont examiné les indicateurs de météorologie, d'hydrologie, d'humidité du sol et de télédétection, ainsi que les indices composites les plus souvent utilisés pour surveiller la sécheresse. Ils ont utilisé une approche de feux tricolores pour noter 50 indicateurs et indices de facilité d'utilisation sur la base d'un ensemble de critères. Les critères ont évalué la disponibilité du code pour créer l'indicateur, l'échelle de temps des données d'entrée, le traitement des données manquantes, le nombre et la forme des variables d'entrée requises, la complexité des calculs pour calculer l'indicateur, le niveau d'obscurité de l'indicateur et la disponibilité des résultats de l'indicateur (par exemple, l'indicateur est déjà produit et est disponible en ligne).

Le Tableau 1 répertorie les indicateurs marqués en vert par le symbole World Meteorological Organization and Global Water Partnership (2016), ce qui signifie qu'ils sont relativement faciles à obtenir et à utiliser. Cependant, les auteurs avertissent qu'une note verte ne signifie pas nécessairement qu'un indicateur est le mieux adapté à un lieu particulier. L'indicateur le plus approprié doit être déterminé par les besoins des utilisateurs et de l'application. En l'absence d'indicateurs d'humidité du sol ou d'hydrologie classés en vert, un petit nombre d'indicateurs orange populaires dans les ouvrages scientifiques sur la sécheresse ont été inclus.

Encadré 1 : Le processus en 12 étapes pour sélectionner les indicateurs de sécheresse et les déclencheurs de réponse

Steinemann and Cavalcanti (2006) proposent cette méthode en 12 étapes pour concevoir et appliquer des indicateurs de sécheresse et des déclencheurs pour la surveillance de la sécheresse et l'alerte rapide dans le cadre de la planification de la gestion de la sécheresse. Les étapes ont été développées sur une période de quatre ans et ont impliqué plus de 100 parties prenantes à travers l'état américain de Géorgie. Bien que développées aux États-Unis, les étapes s'appliquent de la même manière partout dans le monde.

Développement d'indicateurs et de déclencheurs:

1. ***Définir l'échelle et le périmètre d'analyse:*** les options comprennent les divisions climatiques, les bassins hydrographiques, les juridictions politiques ou les zones critiques d'utilisation de l'eau. L'étendue pourrait être à l'échelle du pays ou des parties du pays plus vulnérables à la sécheresse, telles que les zones agricoles pluviales.
2. ***Élaborer des indicateurs de sécheresse:*** à partir d'une longue liste d'indicateurs, utilisez les connaissances d'un expert pour sélectionner des indicateurs clés. Les critères de sélection de l'indicateur doivent indiquer dans quelle mesure l'indicateur représente les impacts critiques de la sécheresse, les principales vulnérabilités à la sécheresse, les approvisionnements en eau et la demande en eau, ainsi que les types de sécheresse affectant la région. La disponibilité, l'historique et la validité des données pour l'indicateur sont également importants. Différents indicateurs peuvent être sélectionnés pour représenter différents types de conditions de sécheresse à différents endroits, tels que les niveaux des eaux souterraines où l'agriculture dépend des eaux souterraines ou les niveaux des réservoirs dans les zones urbanisées. Le Tableau 1 résume les indicateurs plus courants et les plus faciles à utiliser.
3. ***Établir des niveaux de plan de sécheresse et une échelle de déclenchement:*** identifier une approche cohérente, intuitive et facile à mettre en œuvre pour associer les déclencheurs au niveau de sécheresse et pour comparer et combiner plusieurs indicateurs et déclencheurs. Une approche simple consiste à utiliser les percentiles et les seuils de probabilité cumulés tels que 0,35, 0,20, 0,10 et 0,05, correspondant respectivement à une sécheresse légère, modérée, grave et extrême.
4. ***Élaborer un objectif déclencheur:*** élaborer un ensemble de mesures du rendement pour les indicateurs et les déclencheurs décrivant le comportement souhaité des indicateurs et des déclencheurs associés. Par exemple, définir des règles relatives à l'avertissement préalable de l'indicateur an cas d'apparition, de progression et de fin de la sécheresse, les fausses alarmes et le moment opportun pour mettre en œuvre les interventions de gestion.

Analyse des indicateurs et des déclencheurs:

5. ***Transformer les indicateurs en échelle et niveaux de déclenchement:*** développer un système de déclenchement qui fournirait un cadre cohérent sur le plan statistique pour combiner, comparer et évaluer plusieurs indicateurs.
6. ***Calculer des indicateurs multi-périodes:*** convertir des indicateurs basés sur des périodes uniques en indicateurs pour des périodes multiples et séquentielles. Les indicateurs multi-périodes sont importants pour atteindre les objectifs de performance (étape 4), car ils fournissent des déclencheurs de sécheresse plus stables, minimisent les fausses alertes et réduisent le risque de manquer un signal de sécheresse retardé ou persistant.

Encadré 1 : Le processus en 12 étapes pour sélectionner les indicateurs de sécheresse et les déclencheurs de réponse (continué)

7. Calculer des séquences de déclenchement individuelles et multiples: : la séquence de déclenchement est le niveau de sécheresse associé à chaque indicateur (une et plusieurs périodes) pour chaque mois de l'enregistrement historique.

8. Calculer les séquences de sécheresse finales: développer une approche systématique et scientifiquement justifiable pour combiner plusieurs séquences de déclenchement en une seule séquence de sécheresse sur laquelle prendre des décisions. Par exemple, les séquences de déclenchement peuvent être combinées de trois manières:

- Niveaux de sécheresse les plus sévères
- Majorité des niveaux de sécheresse
- Début et fin de la sécheresse

Évaluation des indicateurs et des déclencheurs:

9. Obtenir l'avis des experts: déterminer les indicateurs et les déclencheurs les plus appropriés en fonction de la performance des séquences par rapport aux sécheresses historiques. Les experts peuvent être à la fois des spécialistes nationaux et des gestionnaires locaux de l'environnement, de l'agriculture et de l'eau en milieu urbain, ainsi que des représentants des communautés locales. Voici quelques exemples de questions pertinentes :

- Quels indicateurs, déclencheurs et combinaisons de ceux-ci auraient produit une séquence de déclenchement du niveau de sécheresse qui refléterait le mieux les conditions de sécheresse dans chaque endroit ?
- Quel niveau de sécheresse faut-il déclarer et quand, sur la base des informations disponibles ?
- Quel niveau de sécheresse (pour chaque mois et chaque site) aurait produit la meilleure réponse globale en matière de gestion et d'atténuation des impacts ?

10. Comparer les séquences de sécheresse finales avec les avis des experts: comparer les évaluations effectuées par les experts sur les impacts, indicateurs et déclencheurs rétrospectifs de la sécheresse (étape 9) avec les séquences finales de sécheresse (étape 8) afin d'identifier les indicateurs et les déclencheurs les plus prometteurs pour chaque site/région.

11. Précisez les séquences finales de sécheresse et le processus d'évaluation itératif: utiliser un processus itératif pour aboutir aux séquences finales de sécheresse et aux déclencheurs d'indicateurs. Cela peut impliquer de revenir à l'étape 1 pour développer de nouveaux indicateurs/déclencheurs ou, dans la plupart des cas, de revenir à l'étape 5 pour affiner les déclencheurs.

12. Sélectionner les indicateurs et déclencheurs finaux pour le plan de sécheresse.

Tableau 1. Résumé des principaux indicateurs et indices de sécheresse

Indicateur	Évaluation	Intrants	Source et/ou exemple	Notes
Météorologie				
Indice d'anomalie d'aridité (AAI)		P, T, PET, ET	Gommes et al. (2010)	Disponible sur le plan opérationnel pour l'Inde ; applicable à l'agriculture sous les climats tropicaux.
Déciles		P	Gibbs and Maher (1967)	Facile à calculer ; les exemples australiens sont utiles.
Indice de sécheresse de Keetch-Byram (KBDI)		P, T	Keetch and Byram (1968) http://www.wfas.net/index.php/keetch-byram-index-moisture--drought-49	Les calculs sont basés sur le climat de la zone présentant un intérêt ; actuellement disponible pour les États-Unis.
Pourcentage de précipitations normales		P	Hayes (2005)	Calculs mathématiques simples.
Indice Standardisé des Précipitations (SPI)		P	Guttman (1999); World Meteorological Organization (2012) http://drought.unl.edu/monitoringtools/~downloadablespiprogram.aspx	L'OMM a mis en évidence le point de départ pour la surveillance de la sécheresse météorologique. Recommandé par l'OMM en 2009 comme indicateur principal pour la surveillance de la sécheresse (Hayes et al. 2010). Facile à calculer et applicable sous tous les climats. Logiciel gratuit disponible pour le calcul.

Indicateur	Évaluation	Intrants	Source et/ou exemple	Notes
Météorologie (continué)				
Anomalie pondérée des précipitations normalisées (WASP)		P, T	Lyon (2004) http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/~ Precipitation/WASP_Indices.html	Utilise des données maillées pour surveiller la sécheresse dans les régions tropicales.
Indice d'humidité des cultures (CMI)		P, T	Palmer (1968)	Expansion du PDSI spécifiquement pour l'agriculture ; des valeurs hebdomadaires sont requises.
Indice de sécheresse effectif (EDI)		P	Byun and Wilhite (1999) https://www.ru.ac.za/iwr/research/spatsim/	Peut être calculé à l'aide du logiciel SPATSIM disponible gratuitement.
Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI)		P, T, AWC	Alley (1984)	Non écologique en raison de la complexité des calculs et de la nécessité de disposer de données complètes en série. Principalement remplacés par des indices plus récents tels que le SPI.
Indice de précipitation et d'évapotranspiration normalisé (SPEI)		P, T	Vicente-Serrano et al. (2009) http://spei.csic.es	Données complètes en série requises ; sortie similaire à SPI mais avec une composante de température. Le code à calculer est disponible gratuitement.
Humidité du sol				
Anomalie d'humidité du sol (SMA)		P, T, AWC	Sans objet	Destiné à améliorer le bilan hydrique du PDSI. Les besoins en données rendent le calcul difficile.
Hydrologie				
Indice de sévérité de la sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI)		P, T, AWC	Jacobi et al. (2013)	Données complètes en série requises. Estime le bilan hydrique complet, mais n'inclut pas les décisions de gestion de l'eau et d'irrigation.
Indice de débit normalisé des cours d'eau (SSFI)		SF	Modarres (2007); Telesca et al. (2012)	Utilise le programme SPI avec les données sur le débit des cours d'eau.
Indice de sécheresse des cours d'eau (SDI)		SF	Nalbantis and Tsakiris (2009) http://drinc.ewra.net	Calculs semblables à ceux du SPI, mais utilisant des données de débit des cours d'eau plutôt que les précipitations. Largement disponible et facile à utiliser, mais ne considère pas les interventions de gestion des débits des cours d'eau.
Télédétection/agriculture				
Indice de végétation amélioré (EVI)		Sat	Huete et al. (2002) https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/~vci/VH/vh_browse.php	Ne sépare pas le stress dû à la sécheresse des autres stress. Haute résolution et couverture mondiale complète.
Indice de stress évaporatif (ESI)		Sat, PET	Anderson et al. (2010) https://hrsl.ba.ars.usda.gov/drought/	N'a pas une longue histoire en tant que produit opérationnel. Couverture des États-Unis seulement.
Indice différentiel normalisé de végétation (NDVI)		Sat	Huete et al. (2002) https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/~vci/VH/vh_browse.php	Calculé pour la plupart des endroits.

Indicateur	Évaluation	Intrants	Source et/ou exemple	Notes
Télédétection/agriculture (continué)				
Indice de condition de température (TCI)		Sat	ogan (1995)	Habituellement trouvé avec les calculs du NDVI.
Indice de condition de la végétation (VCI)		Sat	Liu and Kogan (1996)	Habituellement trouvé avec les calculs du NDVI.
Indice de réponse à la sécheresse de la végétation (VegDRI)		Sat, P, T, AWC, LC, ER	Brown et al. (2008)	Tient en compte de nombreuses variables pour séparer le stress de la sécheresse des autres stress de la végétation. Applicable à la saison de croissance de la végétation.
Indice de santé de la végétation (VHI)		Sat	Kogan (2001) https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/~vci/VH/vh_browse.php	L'une des premières tentatives de surveillance de la sécheresse à l'aide de données de télédétection. Haute résolution et couverture mondiale.
Indice de satisfaction des besoins en eau (WRSI et WRSI géospatiale)		Sat, Mod, CC	Verdin and Klaver (2002) http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/index.html	Opérationnel pour de nombreux endroits. Développé par la FAO pour détecter la famine. Fournit une alternative robuste aux observations sur le terrain.
Indice de l'eau par différence normalisé (NDWI) et indice de quantité d'eau en surface des terres (LSWI)		Sat	Chandrasekar et al. (2010) http://www.eomf.ou.edu/modis/visualization/	Produit de manière opérationnelle à l'aide de données spectroradiométriques d'imagerie à résolution modérée.
Composite ou modélisé				
Indicateur de sécheresse combiné (CDI)		Mod, P, Sat	Sepulcre-Canto et al. (2012) http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000	Utilise à la fois des données de surface (SPI, humidité du sol) et de télédétection. Uniquement disponible pour l'Europe.
Système intégré mondial de surveillance et de prévision de la sécheresse (GIDMaPS)		Multiple, Mod	Hao et al. (2014) http://drought.eng.uci.edu	Un produit opérationnel avec une production mondiale pour trois indices de sécheresse : l'indice normalisé d'humidité du sol, le SPI et le MSDI.
Système mondial d'assimilation de données sur les terres (GLDAS)		Multiple, Mod, Sat	Rodell et al. (2004) https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/grads-gds/gldas	Utile dans les régions pauvres en données en raison de son étendue mondiale. Peut être utilisé dans le suivi en temps réel des sécheresses à impacts multiples.
Indice de sécheresse normalisé multivarié (MSDI)		Multiple, Mod	Hao and AghaKouchak (2013)	Disponible mais une interprétation est nécessaire.
United States Drought Monitor (USDM)		Multiple	Svoboda et al. (2002)	Disponible mais une interprétation est nécessaire. Disponible uniquement pour les États-Unis.

P = précipitation ; T = température ; PET = évapotranspiration potentielle ; ET = évapotranspiration ;
AWC = capacité de rétention d'eau disponible ; SF = déficit des cours d'eau ; Sat = données satellitaires ;
LC = couverture terrestre ; ER = écorégion ; Mod = modélisé ; CC = coefficient de récolte.

Source: Modifié par Organisation Météorologique Mondiale et Partenariat mondial pour l'eau (2016)

2.4 Quels sont les "meilleurs" indicateurs de surveillance et de prévision de la sécheresse ?

La sélection d'indicateurs ou d'indices spécifiques pour la surveillance de l'apparition et des impacts de la sécheresse et la prévision de la sécheresse ne peut être prescrite dans ces directives techniques. Le choix des indicateurs sera déterminé par des circonstances régionales ou nationales spécifiques, telles que la disponibilité de données spatio-temporelles, la capacité technique et les nuances des conditions climatiques, sociales, économiques et environnementales. La sélection d'indicateurs est un processus d'essais et d'erreur et son adéquation peut prendre beaucoup de temps, étant donné les caractéristiques uniques de chaque site (voir l'encadré 1) (World Meteorological Organization and Global Water Partnership 2016).

Il est essentiel d'aligner les systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide, ainsi que la planification et la prise de décisions en matière de politique et de gestion, avec des valeurs quantitatives basées sur des indices qui identifient de manière fiable la sévérité, le début et la durée de la sécheresse. Il a été démontré (Dogan et al. (2012)) que la prise en compte de plus d'un indice de sécheresse peut offrir certains avantages, car la comparaison et la combinaison de différents indices peuvent permettre de:

- Mieux caractériser les sécheresses
- Examiner la sensibilité et la précision des indicateurs de sécheresse
- Étudier la corrélation entre les indicateurs
- Explorer la cohérence des indicateurs de sécheresse dans le contexte d'un objectif spécifique

L'investissement dans la recherche des indicateurs et des indices les mieux adaptés à une localisation géographique est indispensable.

Certains indicateurs énumérés dans le Tableau 1 figurent en tant que choix préférés en fonction de leur facilité d'utilisation et du niveau d'absorption par les systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide existants. Bien qu'il soit avancé que l'intégration des précipitations avec d'autres variables liées à la sécheresse, telles que l'humidité du sol et le débit des cours d'eau, est essentielle pour une surveillance efficace de la sécheresse et des systèmes d'alerte rapide (AghaKouchak 2015), des indicateurs basés sur les précipitations peuvent être recommandés comme point de départ, étant donné que la sécheresse est essentiellement un manque d'eau exceptionnel par rapport à la normale attendue (Carrão et al. 2016, Van Loon et al. 2016) et que les déficits prolongés de précipitations provoquent des catastrophes agricoles, hydrologiques et/ou socio-économiques. Par conséquent, les indicateurs et les indices de la sécheresse météorologique peuvent être utilisés comme approximations de la sécheresse agricole et hydrologique (Vicente-Serrano et al. 2012).

2.4.1 Sécheresse météorologique

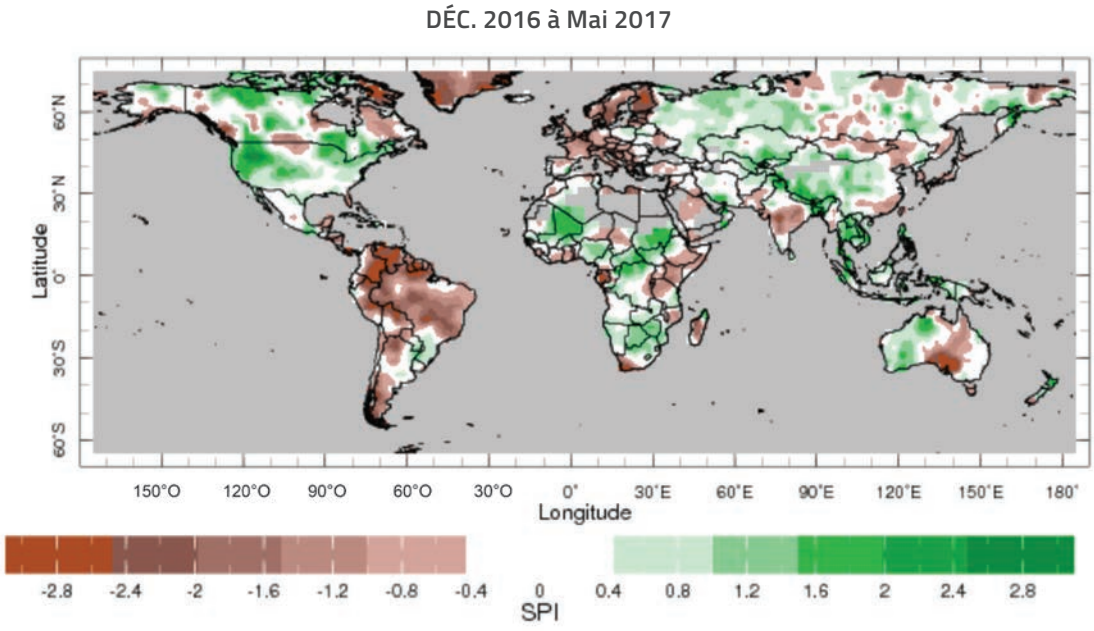
La sécheresse météorologique est un déficit de précipitations, éventuellement associé à une évapotranspiration potentielle accrue, s'étendant sur une vaste zone et sur une longue période (Van Loon 2015). L'**indice de précipitations normalisé (SPI)** est souvent utilisé pour surveiller la sécheresse météorologique, car il résume efficacement les anomalies temporelles des précipitations. Dans une récente enquête (2010-2014) auprès d'agences nationales de services météorologiques et hydrologiques, 35 pays sur les 43 qui ont répondu ont déclaré utiliser le SPI pour surveiller la sécheresse (World Meteorological Organization and Global Water Partnership 2016). Bachmair et al. (2016) ont également constaté que le SPI et d'autres indices simples fondés sur les précipitations sont le plus souvent utilisés dans les systèmes opérationnels de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide. Sur la base de consultations et d'un atelier d'experts réunissant 54 participants de 22 pays, l'OMM recommande à chaque pays d'utiliser le SPI pour surveiller la sécheresse météorologique, car il est relativement facile à utiliser et que des données de précipitations largement disponibles constituent le seul apport nécessaire (World Meteorological Organization 2012).

Le SPI quantifie les déficits de précipitations pour différentes échelles de temps (1, 3, 6, 12, 24 et 48 mois) et il est normalisé. Il est donc applicable aux climats humides et secs. La Figure 3 montre un exemple de SPI mondial calculé sur une période de 6 mois allant de décembre 2016 à mai 2017. Le SPI peut être utilisé pour évaluer la rareté d'une sécheresse en cours et les précipitations nécessaires pour y mettre fin. Les catégories de sécheresse du SPI (Tableau 2) peuvent être utilisées comme déclencheurs pour la mise en œuvre de divers niveaux d'actions de planification et de gestion. La sécheresse commence lorsque la valeur du SPI est égale ou inférieure à -1,0 et elle se termine lorsque la valeur du SPI devient positive (World Meteorological Organization 2012). Des données de précipitations mensuelles continues d'au moins 30 ans sont nécessaires, de préférence sur des périodes encore plus longues. Les moyennes des précipitations, les écarts-types, l'asymétrie, les fonctions gamma et les probabilités cumulatives doivent être calculés comme des intrants dans le SPI final. Un programme informatique gratuit est donc recommandé pour le calcul du SPI[2] sur un PC Windows.

Le SPI peut également être utilisé comme indice pionnier pour surveiller les sécheresses agricoles, hydrologiques et socio-économiques. Par exemple, en Chine, une sécheresse de 1 à 3 mois mesurée à l'aide du SPI déclenche une sécheresse agricole, tandis qu'une sécheresse de 6 à 12 mois mesurée à l'aide du SPI peut déclencher une sécheresse hydrologique et une sécheresse de 12 mois ou plus mesurée à l'aide du SPI entraîne sécheresse socio-économique locale.

[2] http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx

Figure 3. Le SPI mondial sur 6 mois de décembre 2016 à mai 2017. Les valeurs SPI peuvent être assimilées à une comparaison de l'écart type des précipitations d'un endroit à l'autre



Source: http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Precipitation/SPI

Tableau 2. Probabilité de récurrence d'un événement de sécheresse décrit par le SPI

SPI	Catégorie	Fréquence sur 100 ans	Sévérité de l'événement
0 à 0,99	Légère sécheresse	33	1 en 3 ans
-1,0 à -1,49	Sécheresse modérée	10	1 en 10 ans
-1,5 à -1,99	Sécheresse sévère	5	1 en 20 ans
-2,0 ou inférieur	Sécheresse extrême	2.5	1 en 50 ans

Source: Organisation Météorologique Mondiale (2012)

L'inconvénient majeur du SPI est le recours à un seul paramètre: les précipitations. Alors que les précipitations sont la principale variable déterminant le début de la sécheresse, sa durée, son intensité et sa fin (Heim 2002, Carrão et al. 2016), la température devient un facteur de plus en plus important dans la surveillance de la sécheresse, car les modèles de changement climatique prévoient des augmentations de température et que ces augmentations affectent la sévérité de la sécheresse (Sheffield and Wood 2008). Un SPI élargi a été mis au point par Vicente-Serrano et al. (2009) pour inclure des données de température permettant de décrire l'évapotranspiration potentielle. L'**indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (SPEI)** peut être calculé à l'aide du code R libre qui nécessite une certaine expertise technique.[3] Les tests ont montré que le SPEI donne de meilleurs résultats que le SPI en ce qui concerne la capture du débit des cours d'eau, de l'humidité du sol, de la croissance de la forêt et du rendement des cultures pendant les sécheresses estivales (Vicente-Serrano et al. 2012).

L'**indice de sécheresse effectif (EDI)** est un indice alternatif et potentiellement supérieur, car il est plus sensible que le SPI sur les périodes de sécheresse plus courtes et pour détecter le début et la fin d'une sécheresse (Jain et al. 2015). L'EDI peut être utilisé pour évaluer la sévérité de la sécheresse avec les précipitations quotidiennes comme principal intrant. L'EDI a été jugé compatible avec d'autres indices de sécheresse sur différentes périodes de temps et il est préférable pour surveiller les sécheresses à long terme dans les régions arides/semi-arides. (Dogan et al. 2012).

[3] Code informatique disponible sur http://spei.csic.es

2.4.2 Sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est un manque d'eau dans le système hydrologique, qui se manifeste par un débit de cours d'eau anormalement bas dans les rivières et des niveaux anormalement bas dans les lacs, les réservoirs et les eaux souterraines (Van Loon 2015). Si des données de débit de cours d'eau sont disponibles, l'**indice de sécheresse des cours d'eau (SDI)** et l'**indice de débit des cours d'eau normalisé (SSFI)** sont relativement simples pour calculer les indices d'écoulement fluviaux. Ces données sont importantes lorsque le débit, le stockage et les dérivations des eaux de surface deviennent des composants essentiels pour la production agricole, l'approvisionnement en eau urbain et industriel et l'écologie de l'eau douce. Van Loon and Laaha (2015) ont mesuré la sévérité de la sécheresse hydrologique à l'aide de courbes de durée d'écoulement et de percentiles, concluant que la variation spatiale de la sévérité de la sécheresse hydrologique dépend fortement des processus hydrologiques terrestres. Une évaluation rigoureuse de la sécheresse hydrologique dépend non seulement des données sur le débit des cours d'eau, mais aussi des modèles de systèmes terrestres corrects sur le plan hydrodynamique, qui nécessitent un niveau élevé d'expertise technique pour être analysés et qui peuvent ne pas être disponibles à grande échelle.

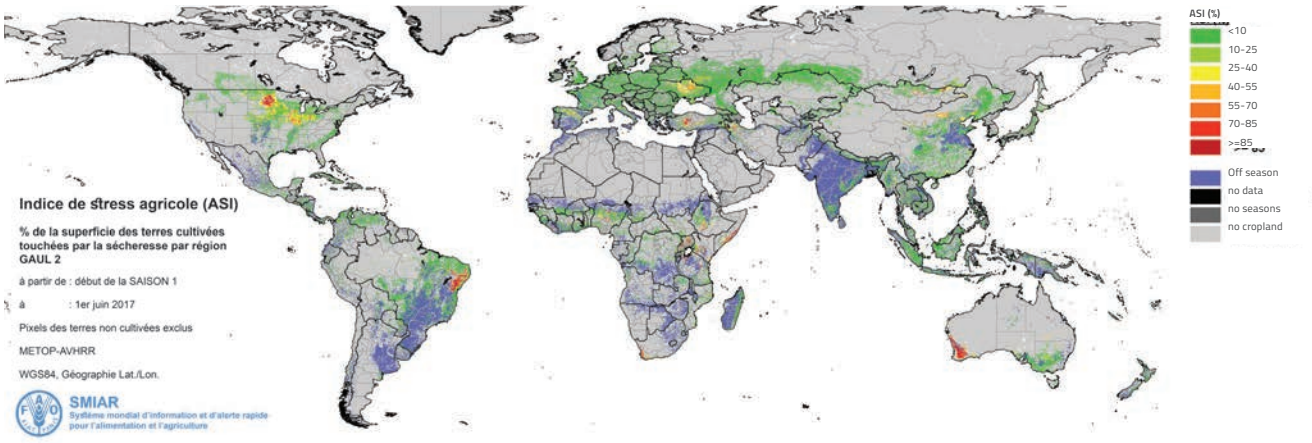
2.4.3 Sécheresse agricole

La sécheresse agricole est un déficit d'humidité du sol (principalement dans la zone racinaire) qui réduit l'apport d'humidité à la végétation et conduit souvent à une mauvaise récolte (Van Loon 2015). Utilisant des images de télédétection largement disponibles et à haute résolution temporelle et spatiale, l'**indice de santé de la végétation (VHI)** et l'**indice de satisfaction des besoins en eau (WRSI)** sont des mesures robustes du stress des cultures induit par la sécheresse. Le VHI combine la mesure du stress hydrique de la végétation (NDVI) et du stress thermique (BT) avec la synchronisation des différentes étapes de la phénologie de la plante au cours de la saison de croissance. Le WRSI combine des données de précipitations détectées à distance et des données potentielles d'évapotranspiration avec la capacité de rétention en eau du sol et les coefficients de culture afin de fournir des estimations rapides du rendement des cultures et des défaillances potentielles. Le WRSI est le pourcentage des besoins totaux en eau des cultures satisfaits par les précipitations ou l'humidité disponible du sol. La FAO a mis au point une implémentation spatiale du WRSI pour estimer les rendements des cultures et les risques de famine en temps réel. La FAO a également mis au point des interprétations de séries chronologiques à haute résolution spatiale et temporelle du VHI pour calculer l'**indice de stress agricole (ASI)** sur les terres cultivées du monde. L'ASI est un élément clé du Système mondial d'information et d'alerte rapide (SMIAR) de la FAO, utilisé pour surveiller les menaces en temps réel à la sécurité alimentaire mondiale. L'ASI pour le 1er juin 2017 est présenté dans Figure 4.

Les indicateurs du stress subi par la végétation basés sur le NDVI télédétectés sont des méthodes très utiles et pratiques pour identifier les impacts d'une sécheresse précoce sur l'agriculture, mais peuvent être étendus pour surveiller les impacts sur les écosystèmes naturels et les forêts. Les zones de stress élevé subi par la végétation dans les forêts et les écosystèmes indigènes indiquent les endroits où la biodiversité pourrait être soumise à une pression considérable en raison de la sécheresse.

En l'absence de capacités techniques en télédétection, les chercheurs ont montré que le SPEI est bien corrélé à l'humidité des sols dans plusieurs endroits du monde (Vicente-Serrano et al. 2012, Scaini et al. 2015, Wang et al. 2015), ce qui suggère que le SPEI peut être utilisé comme substitut valable pour les indicateurs de sécheresse agricole.

Figure 4. Indice de stress agricole de la FAO pour le 1er juin 2017



Source: http://www.fao.org/giews/en/

[4] http://www.fao.org/giews/en/

2.4.4 Sécheresse socio-économique

La sécheresse socio-économique survient lorsque la demande de biens économiques dépasse l'offre en raison d'une pénurie d'approvisionnement en eau liée aux conditions météorologiques (Wilhite and Glantz 1985). Les indicateurs et indices de surveillance et d'alerte rapide en cas de sécheresse socio-économique sont relativement rares. L'**indice de fiabilité et de résilience normalisé multivarié (MSRRI)**, développé par (Mehran et al. 2015), intègre deux indicateurs : l'indicateur de fiabilité de la demande en flux entrant (IDRI) et l'indicateur de résilience de stockage de l'eau (WSRI). L'IDRI évalue si l'eau disponible (apport dans le système) est suffisante pour satisfaire la demande en eau pour la période sélectionnée, quel que soit le stockage dans les réservoirs. Le WSRI évalue la suffisance d'un réservoir pour satisfaire la demande en eau pendant la période sélectionnée. Le MSRRI évalue donc l'approvisionnement en eau et son stockage en fonction de la demande, des valeurs négatives indiquant une pénurie d'eau. Des données sur la demande en eau, la capacité et les niveaux de stockage de l'eau, et les apports d'eau, sont nécessaires, ce qui rend le calcul du MSRRI et de ses composants relativement complexe et dépend de données détaillées.

2.4.5 Composite

Les récentes avancées générationnelles en matière de traitement des données spatiales et de télédétection ont permis à plusieurs indicateurs composites d'être relativement faciles à atteindre dans le cadre de la surveillance de la sécheresse et l'alerte rapide. Le système de pointe est le US **Drought Monitor (USDM)** (Svoboda et al. 2002). L'USDM combine six indicateurs de sécheresse (PDSI, humidité du sol, débit quotidien des cours d'eau, déciles de précipitations, SPI et VHI) décrivant les principaux types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique). L'USDM utilise les moyennes pondérées des intrants pour produire une évaluation hebdomadaire des conditions de sécheresse actuelles aux États-Unis. L'USDM des 29 novembre 2016 et 14 février 2017 sont comparés dans Figure 5, démontrant ainsi que la sécheresse a considérablement changé en Californie et dans le sud-est des États-Unis à la suite des fortes pluies tombées en hiver entre 2016 et 2017. Les catégories de sécheresse utilisées par l'USDM (Tableau 3) sont des déclencheurs potentiels pour différents niveaux de planification et de gestion de la sécheresse. Les seuils de chaque indicateur sont utiles pour identifier les déclencheurs sous chaque indicateur dans l'USDM. Les systèmes de surveillance de la sécheresse utilisant des indicateurs individuels ou un sous-ensemble d'indicateurs utilisés par l'USDM peuvent se référer aux plages de valeurs des indicateurs et aux catégories de sécheresse associées du Tableau 3 pour définir les déclencheurs potentiels.

Une nouvelle plate-forme développée à Princeton, aux États-Unis, produit plusieurs indices de sécheresse individuels et composites communs permettant de surveiller et de prévoir les sécheresses en Afrique subsaharienne (Sheffield et al. 2013). Le **Moniteur africain des inondations et des sécheresses (ADFM)** utilise de nombreux ensembles de données de télédétection et de données sur les débits des cours d'eau pour calculer des indicateurs spatialement continus à haute résolution décrivant la sécheresse météorologique, agricole, écologique et hydrologique, qui seront utilisés pour la surveillance en temps réel et les prévisions saisonnières. L'ADFM est un système complet et à la fois un portail Web[5] et Sheffield et al. (2013) doit être consulté pour plus de détails. Le site Web comprend également un tutoriel pour la production correcte des indicateurs et des indices de l'ADFM.

Figure 5a. US Drought Monitor le 29 novembre 2016

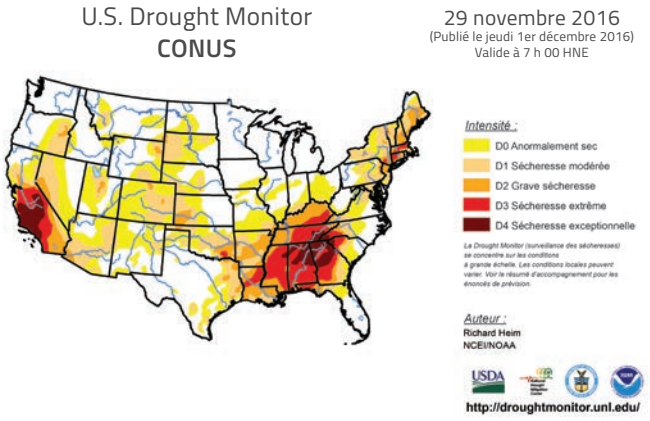
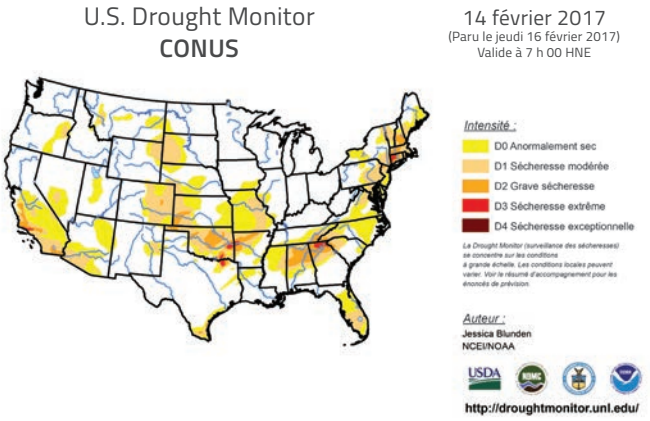


Figure 5b. US Drought Monitor le 14 février 2017



Source: http://droughtmonitor.unl.edu/MapsAndData/MapArchive.aspx

[5] http://stream.princeton.edu/AWCM/WEBPAGE/index.php

Tableau 3. Les catégories de sécheresse de l'USDM et leur association aux six indices d'intrant

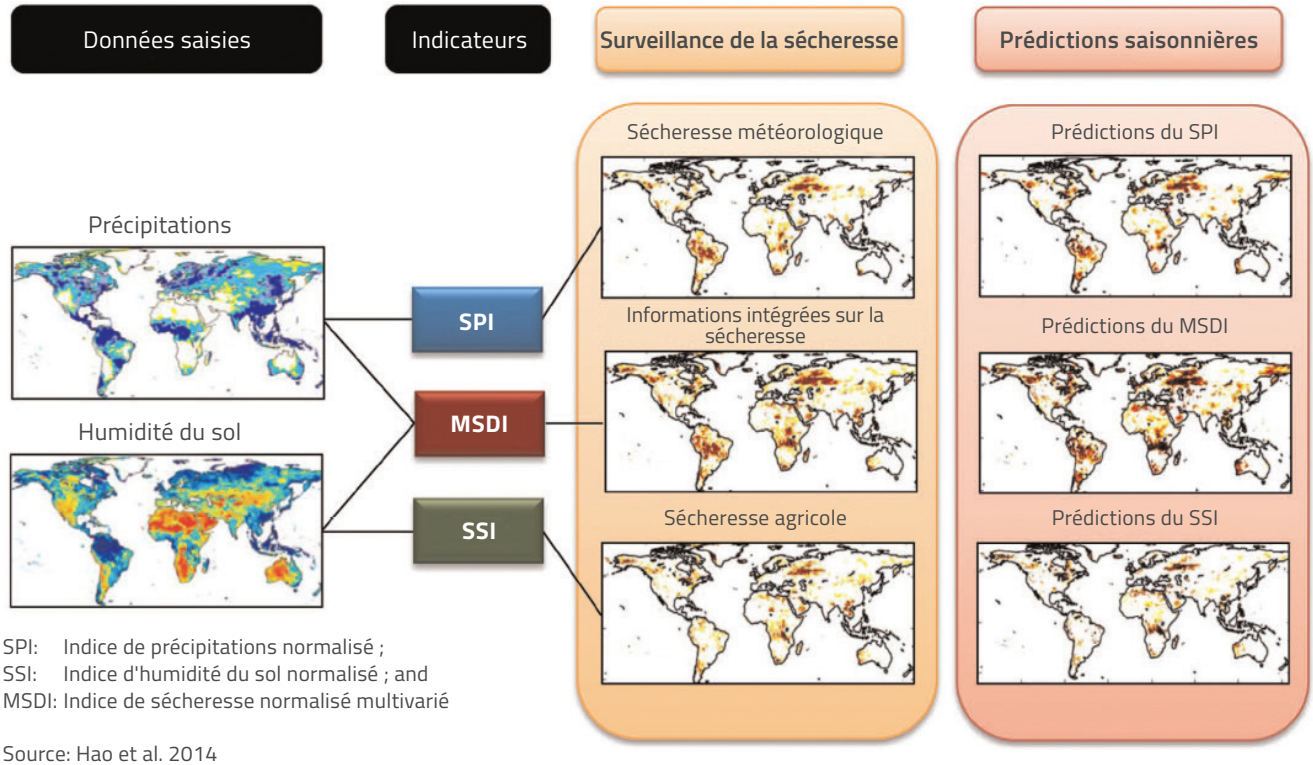
Classification de l'US Drought Monitor							
Type de sécheresse		Plages associées d'indicateurs					
Catégorie	Description	Sécheresse de Palmer	Humidité du sol du CPC	USGS hebdomadaire	Pourcentage de la normale	Précipitation normalisée	Végétation satellite
D0	Anormale-ment sec	-1,0 à -1,9	21-30	21-30	<75 % pendant 3 mois	-0,5 à -0,7	36-45
D1	Sécheresse modérée	-2,0 à -2,9	11-20	11-20	<70 % pendant 3 mois	-0,8 à -1,2	26-35
D2	Sécheresse sévère	-3,0 à -3,9	6-10	6-10	<65 % pendant 6 mois	-1,3 à -1,5	16-25
D3	Sécheresse extrême	-4,0 à -4,9	3-5	3-5	<60 % pendant 6 mois	-1,6 à -1,9	6-15
D4	Sécheresse exceptionnelle	-5,0 ou inférieur	0-2	0-2	<65 % pour 12 mois	-2,0 ou inférieur	1-5

Source: Svoboda et al. (2002)

À l'échelle mondiale, le **Système mondial intégré de surveillance et de prévision de la sécheresse (GIDMaPS)** (Figure 6) combine les indicateurs de précipitations (SPI), d'humidité du sol (SSI) et multivariés (MDSI) (Hao and AghaKouchak 2013, Hao et al. 2014) pour surveiller les épisodes de sécheresse presque en temps réel. Cependant, au moment de la rédaction de ce rapport (février 2017), le portail de données GIDMaPS et le site Web ne disposent pas des données les plus récentes, et il n'est pas clair si le **système est actuellement opérationnel. Le Système mondial d'information sur la sécheresse (GDIS)** (Nijssen et al. 2014) est un autre indicateur composite de la sécheresse à l'échelle mondiale. Le système GDIS utilise des précipitations satellitaires, des températures de l'air modélisées et de multiples modèles de surface terrestre pour simuler la capacité de stockage de l'humidité de surface, combinés pour produire des estimations multi-modèles en temps quasi-réel des conditions de sécheresse, définies comme les percentiles des carences en humidité du sol. Le système GDIS peut identifier les épisodes de sécheresse et suivre la progression de la sécheresse en temps quasi-réel. Le GDIS est actif et est actuellement hébergé par le système américain intégré d'information sur la sécheresse (NIDIS).[6]

[6] https://www.drought.gov/gdm/content/welcome

Figure 6. Vue schématique de l'algorithme du système mondial intégré de surveillance et de prévision de la sécheresse



SPI: Indice de précipitations normalisé ;
SSI: Indice d'humidité du sol normalisé ; and
MSDI: Indice de sécheresse normalisé multivarié

Source: Hao et al. 2014

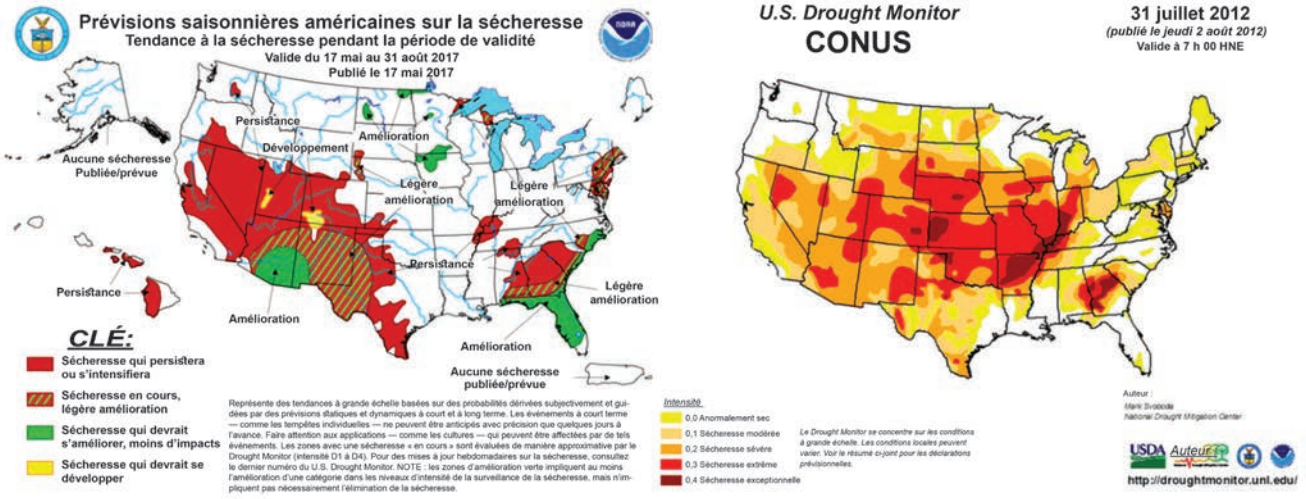
2.5 Prévisions de sécheresse fiables

Malgré quelques progrès récents, la capacité de prévision du début, de la durée, de la sévérité et du rétablissement de la sécheresse reste importante (Wood et al. 2015). Pour que la prévision de la sécheresse soit une réussite, il faut prévoir la température et les précipitations, connaître l'état actuel de la sécheresse et être en mesure de modéliser avec précision les modifications connexes des réserves d'humidité importantes pour la sécheresse, telles que l'humidité du sol, les eaux souterraines et le manteau neigeux (Wood et al. 2015). Les prévisions dépendent de la disponibilité d'expertise hautement qualifiée et de discernement pour combiner les perspectives saisonnières de températures et de précipitations, les prévisions météorologiques à court terme et des informations sur les conditions hydrologiques, les ressources en eau et l'humidité du sol liées à la sécheresse. Le US Drought Monitor publie des prévisions de sécheresse saisonnières (90 jours), qui peuvent être soit inexactes, soit précises (Figure 7). La prévision des sécheresses futures au-delà d'une courte période d'un mois n'est généralement pas fiable et les prévisions doivent être traitées avec prudence.

Les prévisions à long terme des épisodes et de la fréquence des sécheresses sur plusieurs années à une décennie à l'aide de modèles climatiques mondiaux sont en train de devenir un outil d'appui à la planification de la gestion de la sécheresse.[7] Les modèles climatiques estiment les tendances climatiques futures en tenant compte du climat actuel, de la variabilité naturelle et des influences humaines sur le climat, telles que les émissions de gaz à effet de serre et les aérosols. Les modèles climatiques sont identiques ou similaires à ceux utilisés dans les évaluations du changement climatique du GIEC. L'identification des relations entre les processus atmosphériques et les processus océaniques, tels que l'oscillation australe El Niño et le dipôle de l'océan Indien, et la contribution de chaque processus aux déficits de précipitations sont une complication importante dans la prévision à long terme de la sécheresse à l'aide de modèles climatiques (Taschetto et al. 2016). De récents travaux de Taschetto et al. (2016) suggèrent que les processus océaniques contribuent moins aux périodes de sécheresse prolongées qu'on ne le pensait auparavant, ce qui signifie que les processus atmosphériques qui présentent un très haut degré d'aléa contribuent autant ou davantage aux sécheresses. Le niveau élevé de stochasticité fait que les prévisions de sécheresse sur plusieurs années relèvent principalement du domaine des chercheurs. Ces prévisions nécessitent l'intervention d'un expert pour évaluer leur fiabilité et l'utilité de leur application.

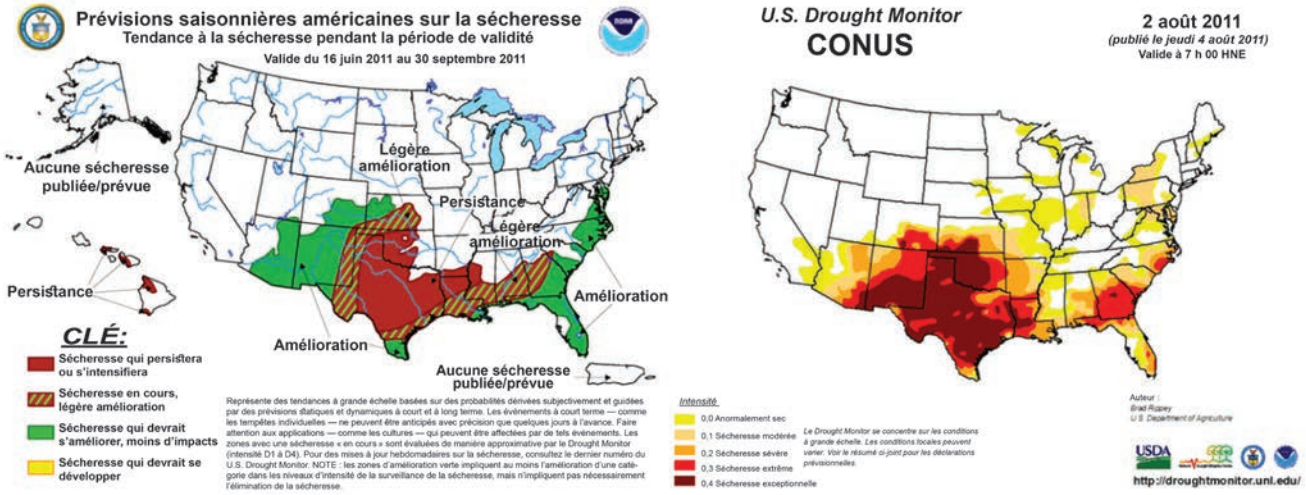
[7] http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3310

Figure 7a. Perspectives de sécheresse saisonnière de la sécheresse de l'USDM pour l'été 2012, fournissant un exemple de prévision très imprécise



Source: Wood et al. (2015)

Figure 7b. Perspectives de sécheresse saisonnière de la sécheresse observée par l'USDM pour l'été 2011, fournissant un exemple de prévision précise



Source: Wood et al. (2015)

2.6 Évaluation du risque de sécheresse pour la surveillance et l'alerte rapide

L'évaluation des risques de sécheresse est l'une des activités essentielles de la mise en place d'un système efficace de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide. Une évaluation des risques fournit des informations importantes pour la définition des priorités et l'élaboration d'actions visant à prévenir la sécheresse et à en atténuer les effets (Grasso n.d.). Une évaluation du risque de sécheresse étend l'évaluation de la vulnérabilité en incluant des informations sur le risque de sécheresse indépendamment des secteurs et des communautés potentiellement touchés par la sécheresse.

Le risque de sécheresse peut être calculé comme suit:
Risque de sécheresse = Vulnérabilité (V) x Risque (H)

Lorsque la vulnérabilité (V) est calculée comme décrit ci-dessous (section 3.3) et que le risque (H) correspond à la probabilité d'un épisode de sécheresse calculé à l'aide des indicateurs et indices élaborés pour le système de surveillance et d'alerte rapide décrit dans le présent chapitre (Sections 2.3 à 2.5).

L'évaluation des risques de sécheresse fournit des informations importantes pour aider les autorités à cibler les actions de prévention, d'atténuation des effets et de réponse aux crises de sécheresse sur les communautés et les secteurs les plus exposés à la sécheresse et dans les endroits où les caractéristiques de la sécheresse sont ou devraient être les plus sévères. Il est fortement recommandé que l'évaluation des risques de sécheresse et la planification de gestion associée soient intégrées dans la planification de l'utilisation des terres et du développement rural, les systèmes de soins de santé, les approches de gestion de l'environnement et des ressources naturelles, les chaînes d'approvisionnement et les modèles économiques, ainsi que dans les secteurs non agricoles (UNISDR 2015).

Les actions visant à limiter les impacts de la sécheresse et à mieux préparer les communautés et les secteurs économiques aux sécheresses futures sont résumées dans le troisième pilier de la réduction des risques de sécheresse, décrit plus en détail au chapitre 4.

2.7 Communiquer et réagir aux avertissements de sécheresse

Des systèmes efficaces de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide exigent une communication rapide, fiable et simple des risques de sécheresse. L'objectif principal d'un système d'alerte précoce est d'identifier le moment opportun pour prendre des mesures qui réduisent les risques de perte de vies humaines et atténuent les impacts sociaux, environnementaux et économiques de la sécheresse. La communication du risque doit être opportune pour que les autorités et les communautés puissent réagir de manière adéquate au risque. La communication doit être simple pour que les risques soient bien compris par tous. Les informations doivent être scientifiquement valables et fiables pour que les autorités et les communautés puissent réagir aux risques en toute confiance.

Plusieurs technologies de l'information et de la communication (TIC) innovantes peuvent être utilisées pour une communication rapide, généralisée et simple des risques de sécheresse (IPCC 2012). La téléphonie mobile et les technologies de communication Internet peuvent être utilisées pour diffuser des alertes de risque de sécheresse à toutes les autorités décisionnelles et à toutes les personnes touchées. Par exemple, l'absorption rapide et l'utilisation généralisée des téléphones mobiles en Afrique ont permis à de nombreux pays d'abandonner les communications traditionnelles par téléphone fixe. Le nombre de propriétaires de téléphones mobiles est passé de moins de 10 % au début des années 2000 à plus de 65 % dans plusieurs pays d'Afrique subsaharienne (Tanzanie, Kenya, Ghana, Afrique du Sud et Ouganda), selon une enquête menée en 2014, la communication par SMS étant l'usage le plus courant (Pew Research Center 2015). Un système de surveillance et d'alerte rapide de la sécheresse basé sur une plate-forme numérique, déclenché automatiquement par l'émergence de catégories de sécheresse spécifiques telles que celles décrites dans le Tableau 3, pourrait rapidement envoyer des alertes à tous les téléphones mobiles. Une autre alerte pourrait être émise si le système de surveillance et d'alerte rapide de la sécheresse identifie une zone en mouvement ou susceptible de passer à une catégorie de sécheresse plus sévère. Les plates-formes de réseaux sociaux telles que Twitter et Facebook offrent un lieu opportun et rentable pour diffuser des informations sur les risques de sécheresse (IPCC 2012).

Une autre application novatrice des TIC pour la surveillance de la sécheresse et les systèmes d'alerte rapide est l'utilisation des applications citoyennes des smartphones en tant que moyen rapide et économique de recueillir des informations sur les effets de la sécheresse à mesure qu'ils se produisent. La science citoyenne est la collecte et la soumission de données scientifiques par des scientifiques amateurs et par le grand public (Bonney et al. 2014). Bien que considérée comme un phénomène récent, la science citoyenne a été pratiquée par des amateurs pendant une grande partie de l'histoire enregistrée. Grâce à la technologie mobile, la science citoyenne est devenue, au cours des dernières années, un outil de recherche accepté et important sur les schémas à grande échelle de la nature, et elle est très prometteuse pour une approche interdisciplinaire de l'étude des systèmes couplés homme-écologie (Crain et al. 2014). Le renfort des systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide avec des informations en temps réel sur les impacts de la sécheresse a été identifié comme une priorité urgente (Bachmair et al. 2016), et l'utilisation par les citoyens des applications des smartphones permet au public d'identifier et de soumettre à des bases de données en ligne des exemples d'impacts de la sécheresse lorsqu'ils se produisent. Bien que la critique souvent formulée à l'égard de la qualité des données scientifiques citoyennes s'applique également au suivi de l'impact de la sécheresse, des protocoles et des outils statistiques permettant d'éliminer les erreurs et les biais sont largement disponibles (Bird et al. 2014).

3 ÉVALUER LA VULNÉRABILITÉ À LA SÉCHERESSE ET SES RISQUES

3.1 Aperçu

Ce chapitre fournit des directives pour compléter les évaluations de la vulnérabilité et des risques pour les lieux, les populations et les économies vulnérables à la sécheresse. Les évaluations de vulnérabilité tentent de comprendre qui est vulnérable, à quoi, quand, pourquoi et ce qui peut être fait pour réduire la vulnérabilité. Les évaluations du risque de sécheresse consistent à accroître la vulnérabilité à la sécheresse en tenant compte de la probabilité d'occurrence du risque de sécheresse. Les évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse et des risques peuvent être utilisées pour identifier les moyens d'atténuer la sécheresse, concevoir des plans de gestion de la sécheresse et soutenir les systèmes de surveillance et d'alerte rapide. Identifier les régions et les communautés vulnérables à la sécheresse est essentiel pour sélectionner des indicateurs et des déclencheurs de surveillance et d'alerte rapide applicables dans les zones les plus vulnérables. Les plans de gestion de la sécheresse et les plans d'intervention doivent également être adaptés aux besoins des secteurs et des communautés vulnérables.

3.2 Définitions

La diversité des études de vulnérabilité à la sécheresse est extrêmement élevée et il existe un manque de compréhension conceptuelle commune de la vulnérabilité, de méthodologie normalisée et de mesures de vulnérabilité communes. L'absence d'accord sur les définitions rend difficile la comparaison des résultats obtenus par différentes évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse dans un pays ou une région. Par conséquent, une **définition cohérente et un cadre conceptuel** de la vulnérabilité constituent la première étape d'une évaluation de la vulnérabilité. Il existe deux définitions ou cadres dominants :

1. De la communauté consacrée à la réduction des risques de catastrophe : les conditions déterminées par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui augmentent la vulnérabilité d'une communauté à l'impact des aléas (UNISDR 2015).
2. De la communauté consacrée à l'adaptation au changement climatique : la mesure dans laquelle un système est sensible aux effets néfastes de la sécheresse ou incapable d'y faire face. La vulnérabilité dépend de la nature, de l'ampleur, et du rythme des variations climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (IPCC 2014).

La première définition qui émane de la communauté consacrée à la réduction des risques de catastrophe est centrée sur l'être humain et met l'accent sur la capacité de la population et des communautés à faire face à un risque de sécheresse et à y répondre. Bien que les interdépendances entre les populations et leur environnement naturel soient implicites dans les façons dont les conditions environnementales peuvent influencer la vulnérabilité d'une communauté à la sécheresse, la définition ne fournit pas une perspective holistique englobant les systèmes sociaux, environnementaux et économiques. L'approche holistique est très importante dans la prise en compte de la sécheresse, car la terre et le capital naturel jouent un rôle essentiel dans la réduction de la vulnérabilité.

La deuxième définition, qui provient de la communauté d'adaptation au changement climatique, adopte une vision holistique en identifiant la sécheresse comme ayant un impact sur l'ensemble du système, pas seulement sur les personnes et les communautés. Les principaux éléments de la deuxième définition sont l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation, définis comme suit:

- **Exposition:** la nature et le degré auquel un système subit un stress environnemental ou sociopolitique (Adger 2006). Les caractéristiques de ces contraintes comprennent leur ampleur, leur fréquence, leur durée et l'étendue réelle du danger.
- **Sensibilité:** la mesure dans laquelle un système est modifié ou affecté par des perturbations (Adger 2006), telles qu'un changement des conditions climatiques causé par le début de la sécheresse.
- **Capacité d'adaptation:** capacité d'un système à évoluer et à répondre aux risques environnementaux ou aux changements de politique et à élargir la gamme de variabilité avec laquelle il peut faire face (Adger 2006). Peut également inclure la capacité d'un système à tirer parti des opportunités ou à faire face aux conséquences (Füssel and Klein 2006).

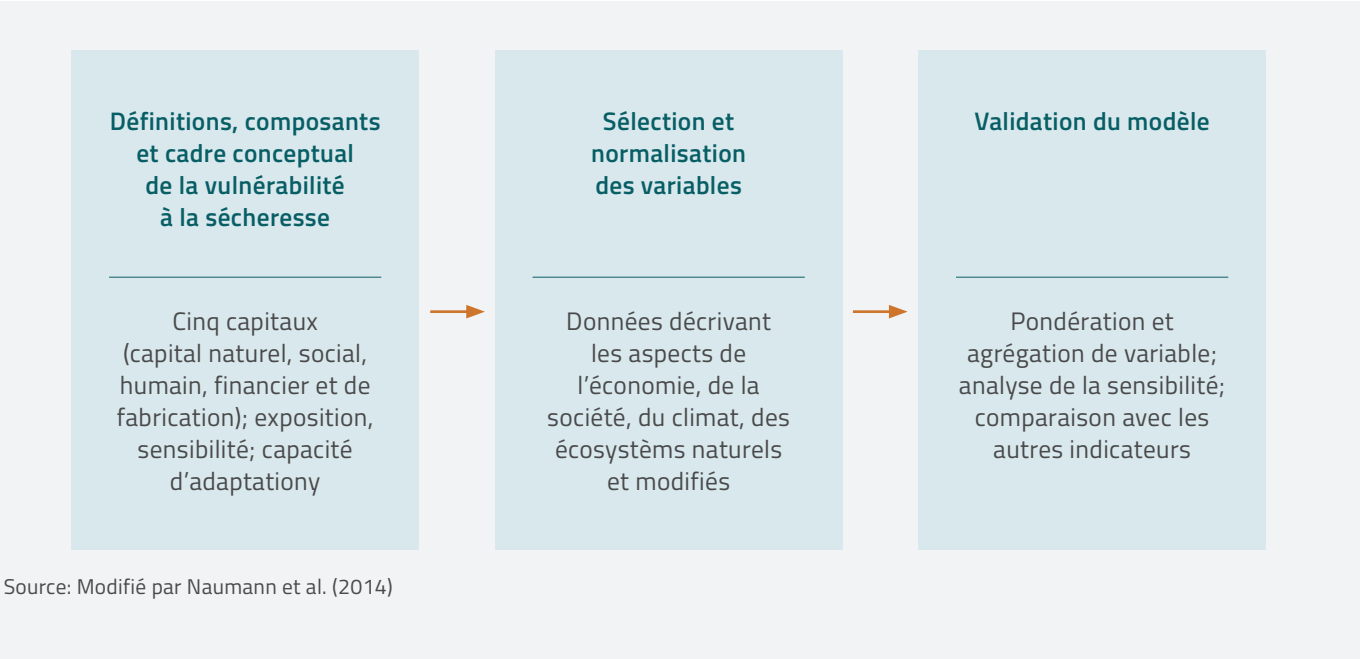
3.3 Évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse

Effectuer une évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse est important pour plusieurs raisons. Premièrement, il identifie les communautés et les secteurs les plus susceptibles d'être affectés par la sécheresse. Cela permet de concevoir et d'adapter efficacement des plans, des politiques et des mesures d'atténuation des risques efficaces pour la gestion de la sécheresse qui hiérarchisent les mesures à prendre en faveur des communautés et des groupes présentant le risque le plus élevé. En outre, l'identification des communautés et des secteurs vulnérables est une condition nécessaire pour développer des systèmes de préparation à la sécheresse, de suivi et d'alerte rapide. En outre, une évaluation de la vulnérabilité est un exercice important d'apprentissage et de collecte de connaissances permettant d'améliorer la compréhension des processus humains et naturels qui contribuent à la vulnérabilité à la sécheresse et à la résilience des communautés. Enfin, une évaluation de la vulnérabilité peut fournir des informations importantes sur les groupes de la société généralement marginalisés, tels que les femmes, les enfants, les personnes âgées et les malades, les paysans sans terre, les agriculteurs, les pasteurs et les communautés autochtones.

Une évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse doit être encadrée en utilisant les étapes suivantes (Naumann et al. 2014) (voir Figure 8):

1. Définir les composantes de la vulnérabilité à la sécheresse : élaborer un cadre conceptuel et clarifier les définitions
2. Sélectionner des variables et normaliser
3. Validation du modèle par une pondération et une analyse de sensibilité, et comparaison avec d'autres indicateurs

Figure 8. Exemple de cadre méthodologique pour l'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse



Source: Modifié par Naumann et al. (2014)

3.3.1 Définir les composantes de la vulnérabilité à la sécheresse

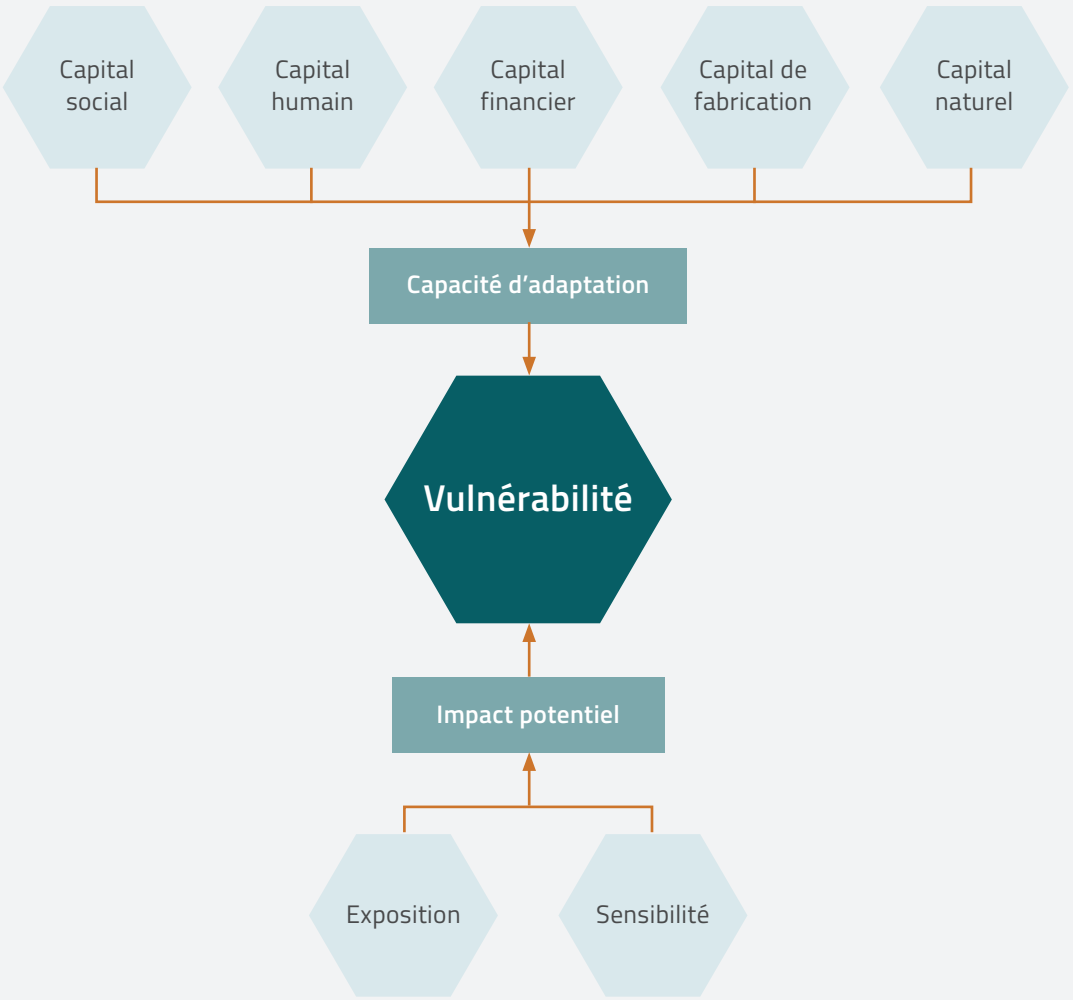
La définition d'un cadre conceptuel est la première étape d'une évaluation de la vulnérabilité, afin de garantir la clarté des définitions et des aspects évalués de la vulnérabilité à la sécheresse. Le cadre conceptuel peut guider la sélection des indicateurs et des variables (Eriksen and Kelly 2007). La littérature scientifique sur l'adaptation au changement climatique et son atténuation regorge de cadres de vulnérabilité. Voici une formule populaire pour calculer la vulnérabilité :

Vulnérabilité (V) = Exposition (E) + Sensibilité (S) - Capacité d'adaptation (AC)

Les évaluations de la vulnérabilité doivent être cohérentes et complètes, et doivent intégrer de multiples dimensions : sociale, économique, physique, environnementale et institutionnelle.

Un cadre efficace pour calculer la vulnérabilité d'un système (qui inclut les personnes, les communautés et les secteurs à la sécheresse) est présenté dans Figure 9. Les variables décrivant la sécheresse, telles que l'étendue spatiale, la probabilité d'occurrence (basée sur les enregistrements historiques de la sécheresse), les fréquences projetées sous l'effet du changement climatique et leur intensité, sont souvent utilisées pour estimer l'exposition. Pour estimer la sensibilité, des variables décrivant le système d'intérêt (par exemple, l'agriculture) sont nécessaires, telles que la dépendance aux ressources en eau, l'étendue de la dégradation des terres, la densité de population et la diversification des sources de revenus. Pour estimer la capacité d'adaptation, des variables décrivant les cinq types de capital (naturel, social, humain, financier et manufacturé) sont nécessaires. La section suivante présente les variables fréquemment utilisées dans les évaluations de la vulnérabilité. Les sources de données potentielles sont également fournies en tant que source initiale pour l'acquisition de données pertinentes.

Figure 9. Le cadre conceptuel indiquant les multiples dimensions à inclure pour évaluer la vulnérabilité à la sécheresse



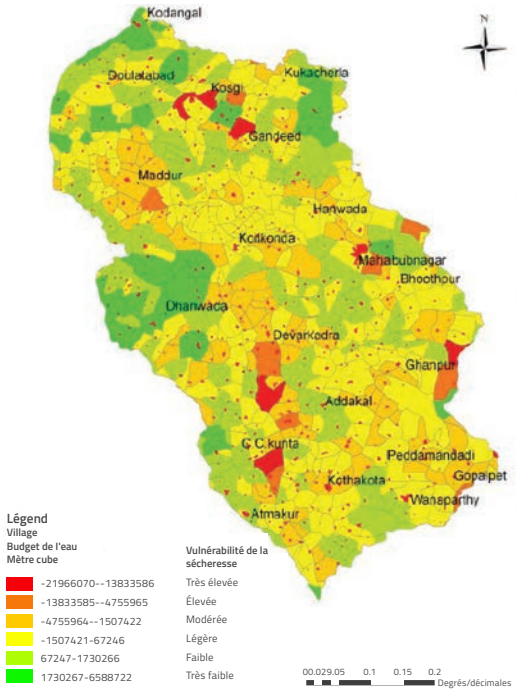
Source: Modifié par Gbetibouo et al. (2010)

3.3.2 Sélection de variables pour l'évaluation de la vulnérabilité

Selecting variables for a vulnerability assessment at the national level is hampered by the geographically uneven distribution of drought induced pressures and responses in time and space (Eriksen and Kelly 2007). Drought impacts vary between communities, social groups within a community, between households and between people within a household. There is also spatial heterogeneity of socio-economic characteristics and levels of technology adoption that influence adaptation responses (Stringer et al. 2009, Corbeels et al. 2014, UNISDR 2015, McNeeley et al. 2016).

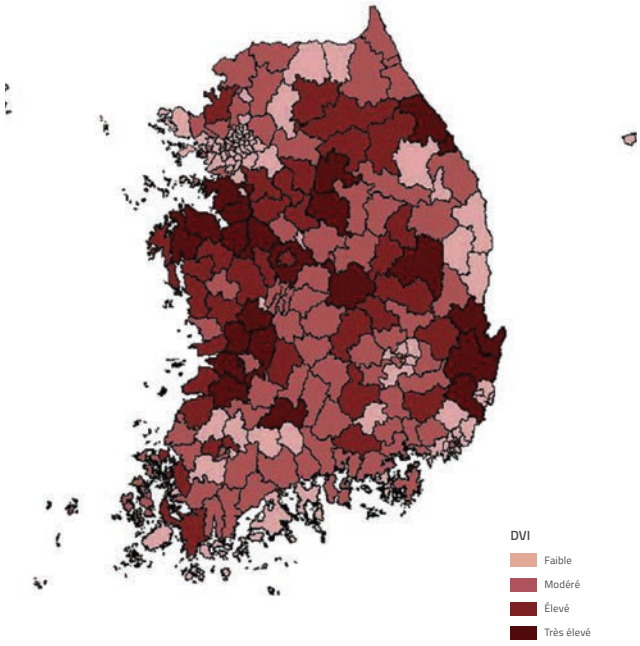
Eriksen and Kelly (2007) advise that **indicators should be sufficiently sensitive in scale and time to capture local patterns of variability,** so that 'pockets of vulnerability' – for example geographical areas or sectors of a community where factors and processes conspire to destroy response capacity – can be assessed by the assessment. Vulnerability assessments completed at sub-national scale may be more sensible, since they can include more detailed data at higher resolution, as well as participatory and qualitative approaches. But these assessments are unable to provide comparison on the country scale, which are often needed to allocate the drought-management resources. Figure 10 shows examples of vulnerability assessments at different scales, demonstrating the varying detail of information in relation to the scale of decision making.

Figure 10a. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à l'échelle du village/Andrha Pradesh, centre-sud de l'Inde



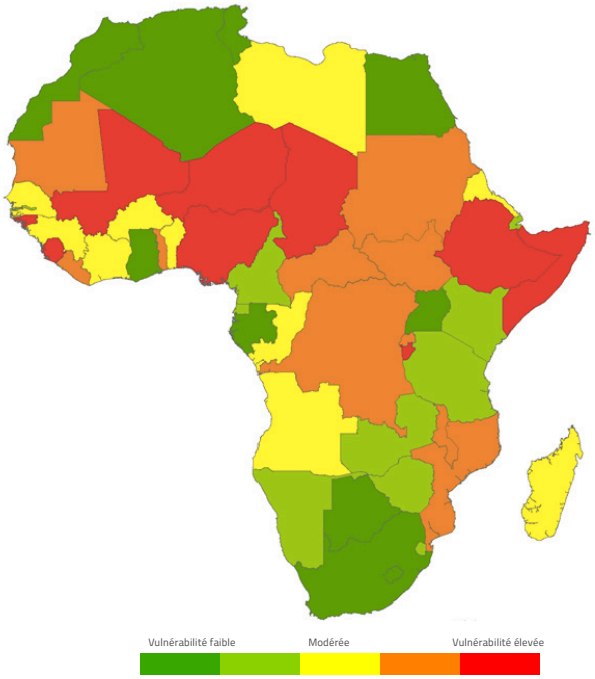
Source: Ganapuram et al. 2013

Figure 10b. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à districts nationaux/administratifs en Corée du Sud



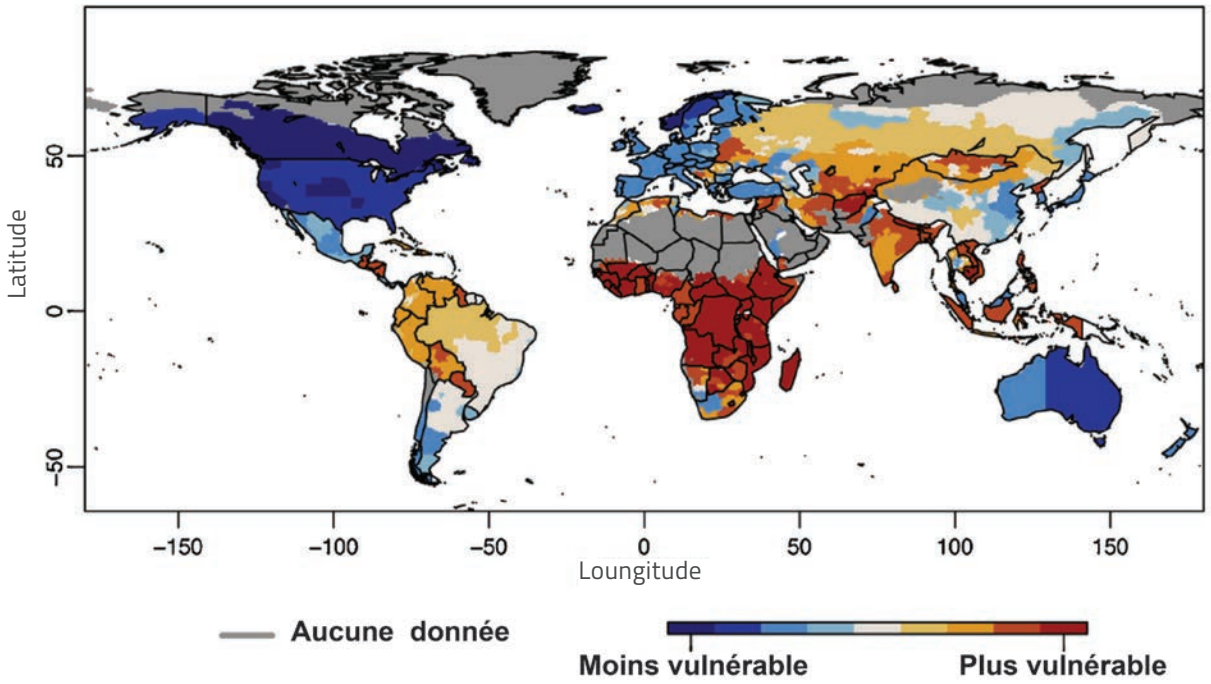
Source: Kim et al. 2015

Figure 10c. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à Échelle continentale/pays d'Afrique



Source: Naumann et al. 2014

Figure 10d. Exemples d'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse à Échelle globale



Source: Carrão et al. 2016

Le travail de sélection des variables est facilité par une récente étude de González Tánago et al. (2016) qui a évalué 41 évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse et présenté sous forme de tableau les facteurs et variables les plus couramment utilisés. Deux études récentes sur les évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse en Afrique (Naumann et al. 2014) et dans le monde (Carrão et al. 2016) fournissent des indications utiles sur la sélection des variables. Le Tableau 4 résume les variables communes utilisées dans les évaluations récentes de la vulnérabilité en Afrique et dans le monde. Bien que bon nombre des variables et indicateurs énumérés dans le Tableau 4 soient des données à l'échelle mondiale résolues par pays, bon nombre d'indicateurs et de variables pourraient être disponibles à une échelle plus fine par l'intermédiaire d'agences de statistique nationales ou d'instituts de recherche. Pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle nationale ou sous-nationale, le tableau peut être utilisé comme point de départ pour la sélection de variables et les agences statistiques pourraient être consultées pour une disponibilité au niveau du pays.

Les variables biophysiques les plus souvent utilisées dans les évaluations de vulnérabilité pour caractériser le début, la durée, l'étendue et l'intensité de la sécheresse (telles que le SPI, le NDVI, les précipitations, l'humidité du sol et la disponibilité des ressources en eau) sont également des indicateurs souvent utilisés dans les systèmes de surveillance et d'alerte rapide. **Il est important que les indicateurs soient cohérents dans les systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide, et d'évaluation de la vulnérabilité,** afin que l'apparition de la sécheresse et son impact sur les systèmes vulnérables soient explicites et rapidement reconnus. La sélection des variables pour une évaluation doit être guidée par les indicateurs utilisés par le biais de la surveillance. En outre, les variables utilisées pour évaluer la vulnérabilité et surveiller la sécheresse peuvent également être utilisées pour quantifier la composante de risque de sécheresse d'une évaluation des risques (voir la section 2.6 ci-dessous).

3.3.3 Préparation des variables pour l'évaluation de la vulnérabilité

Toutes les variables sélectionnées doivent être normalisées en utilisant la transformation minimum-maximum en une échelle commune. Par exemple, Wiréhn et al. (2015) utilisent la formule suivante pour normaliser les valeurs de variable comprises entre 0 et 100:

$$\text{Valeur de variable normalisée} = \frac{(\text{Valeur réelle} - \text{Valeur minimum})}{(\text{Valeur maximum} - \text{Valeur minimum})} 100$$

La normalisation est très importante, car elle garantit que toutes les variables doivent avoir la même plage et la même distribution pour une combinaison valide dans une évaluation de vulnérabilité. Avant que l'évaluation de la vulnérabilité ne soit terminée, toutes les variables doivent être testées en termes de colinéarité et d'indépendance, avec une analyse exploratoire des indicateurs de vulnérabilité initiaux. Les indices fortement corrélés ne doivent pas être utilisés. Des exemples de test et de suppression des variables corrélées sont disponibles (O'Brien 2007, Kim et al. 2015), mais leur utilisation nécessite un niveau élevé de compétences techniques. Par conséquent, un statisticien doit être consulté pour obtenir des conseils.

Tableau 4. Dimensions et indicateurs/variables commun(e)s à l'échelle mondiale utilisé(e)s dans les évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse

Les agences nationales de données et de statistiques doivent être consultées pour obtenir des données à l'échelle nationale avec une précision plus fine

Dimensions	Exemple d'indicateurs/de variables	Précision	Source pour les données à l'échelle mondiale
Exposition			
Caractéristiques de la sécheresse	Indice normalisé des précipitations (SPI)	Divers	IRI http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/
	Indice de végétation par différence normalisée (NDV)	env. 10 km	NASA https://neo.sci.gsfc.nasa.gov
Climat (actuel, futur)	Précipitations (mm/an)	Divers	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
	Température	Divers	http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16
	Évapotranspiration	Divers	http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16
Sol et topographie	Propriétés du sol	250 m-1 km	ISRIC https://www.soilgrids.org/
Disponibilité des ressources en eau	Ressources en eau renouvelables totales par habitant (m3/personne/an)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Sensibilité			
Utilisation de la ressource en eau	Proportion de terres cultivées irriguées (%)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
	Ratio des prélèvements annuels totaux d'eau par rapport au total annuel disponible	Pays ou bassin fluvial	WRI Aquaduct http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-country-river-basin-rankings/
	Accès à une eau potable saine (% de la population totale	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Occupation des sols	Surface cultivée (% de la superficie totale)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Dégradation des terres	Carte mondiale de la dégradation des terres (GLASOD)	Divers	ISIRC http://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod
Diversification de l'économie	Agriculture en proportion du PIB (% du PIB total)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Densité de population	Habitants / km^2	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Capital social			
Préparation aux catastrophes	Score de réduction des risques de catastrophe	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Gouvernance et corruption	Indicateurs de gouvernance mondiaux	Pays	Banque mondiale http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home

Dimensions	Exemple d'indicateurs/de variables	Précision	Source pour les données à l'échelle mondiale
Répartition des revenus	Coefficients de Gini	Pays	World Bank http://www.worldbank.org/en/research/brief/all-the-ginis
Emploi	Taux de chômage (en % de l'ensemble de la main d'œuvre)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Accès aux services	Alimentation en eau potable (% de la population rurale ayant accès)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Population rurale/urbaine	Population rurale (% de la population totale)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Accueil des réfugiés	Population réfugiée par pays d'asile	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Égalité des sexes	Indice des inégalités hommes-femmes	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Capital naturel			
Couverture terrestre	Couverture globale des arbres (% par pixel)	30m	USGS https://landcover.usgs.gov/glc/
	Sol nu global (% par pixel)	30m	USGS https://landcover.usgs.gov/glc/
Biodiversité	Productivité primaire nette mensuelle	10km	NASA https://neo.sci.gsfc.nasa.gov
Capital humain			
Alphabétisation et éducation	Taux d'alphabétisation (% de personnes de 15 ans et plus)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Santé et prévalence de la maladie	Espérance de vie à la naissance (en années)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
	Prévalence de la sous-alimentation (% de la population totale)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Population distribution	Population aged 15-64 (% of total population)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Capital financier			
Revenu (individuel, national)	PIB par habitant	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Taux de pauvreté	Pauvreté à 1,90 USD par jour, 2011 PPA (% de la population totale)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Dette publique	Dette de l'État central (en % du PIB)	Pays	Word Bank Open Access Data http://data.worldbank.org
Capital de production			
Développement de l'infrastructure	Capacité de stockage en eau (en % de la ressource totale en eau disponible)	Pays	FAO Aquastat http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
Consommation énergétique	Consommation d'énergie par habitant (M BTU par personne)	Pays	USA Energy Information Administration http://www.eia.gov/beta/international/

Source: Modifié par Carrão et al. (2016) et Naumann et al. (2014).

L'activité suivante consiste à **appliquer un système de pondération** aux variables afin de représenter le niveau d'importance des intrants dans l'évaluation de la vulnérabilité. Les systèmes de pondération peuvent être divisés en trois groupes:

1. Choix arbitraire de pondérations égales
2. Méthodes statistiques
3. Appréciation d'expert

Des coefficients de pondération égaux ne sont pas valides, puisque les indicateurs de vulnérabilité ne contribuent pas de manière égale et que l'avis des experts est limité par la disponibilité de ceux-ci (Gbetibouo et al. 2010). Les méthodes statistiques sont préférées et pourraient utiliser des techniques d'**analyse en composantes principales (ACP)** ou d'analyse factorielle. Une ACP est une technique permettant d'extraire, à partir d'un ensemble de variables, quelques combinaisons linéaires orthogonales qui capturent avec le plus de succès les informations communes. Cela implique également un niveau élevé d'expertise technique ; ainsi, un statisticien devrait être consulté. L'examen des évaluations de la vulnérabilité réalisé par González Tánago et al. (2016) a conclu qu'un peu moins des deux tiers des chercheurs mentionnent et décrivent le système de pondération appliqué. Près de la moitié d'entre eux utilisent des méthodes statistiques, telles que l'analyse en composantes principales, tandis que huit ont consulté des experts et/ou des parties prenantes pour évaluer les variables (González Tánago et al. 2016).

3.3.4 Validation du modèle d'évaluation de la vulnérabilité

Les méthodes utilisées pour construire et tester la validité d'un modèle d'évaluation de la vulnérabilité auront un impact substantiel sur les résultats. Les méthodes et les variables sous-jacentes doivent être visibles. Une évaluation de vulnérabilité robuste, comparable dans le temps et les lieux, doit être transparente (Eriksen and Kelly 2007). La transparence est renforcée par une analyse d'incertitude (ou de sensibilité) qui ajoute ou supprime systématiquement une variable et ajuste systématiquement les pondérations et les systèmes de pondération. Lors de la création de l'indicateur de vulnérabilité composite, l'ajout ou la suppression d'une variable et la modification du schéma de pondération sur les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité devraient être la principale préoccupation, même si cela n'est souvent pas abordé dans les évaluations publiées de la vulnérabilité à la sécheresse (González Tánago et al. 2016).

Une **analyse d'incertitude (ou de sensibilité)** examine la manière dont l'incertitude liée aux facteurs d'entrée (tels que les variables, le schéma de pondération et la méthode d'agrégation) imprègne la structure de l'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse et ses résultats. Par exemple, une analyse de sensibilité pourrait impliquer de multiples évaluations du modèle de vulnérabilité en utilisant trois schémas de pondération différents, deux schémas d'agrégation de variables différents et une suppression et une addition systématiques de chaque variable, afin de générer de nombreux résultats de modèle différents. Les principales décisions testées pour cette analyse sont:

1. Inclusion ou exclusion de variables pour les différents systèmes de pondération ;
2. Agrégations de variables dans les dimensions de la vulnérabilité selon le cadre théorique (Figure 9).

Les experts en modélisation environnementale et en analyse statistique doivent être consultés pour les analyses d'incertitude et de sensibilité.

Une approche commune pour **tester la validité de l'évaluation de la vulnérabilité** consiste à corréler les résultats aux données antérieures sur l'impact de la sécheresse. De nombreux pays et régions ne disposent pas de bases de données complètes sur les impacts de la sécheresse, ce qui limite la validité des tests en utilisant la méthode décrite. La validation a également été effectuée au moyen d'enquêtes sur le terrain, de réunions communautaires et d'entrevues, en recueillant des avis d'experts et en consultant des ouvrages spécialisés. Par exemple, Naumann et al. (2014) la vulnérabilité corrélée à la sécheresse avec le nombre de personnes extraites de la base de données internationale sur les catastrophes OFDA/CRED, qui auraient été touchées par des catastrophes dues à la sécheresse.[8] Cette base de données mondiale sur les catastrophes naturelles et technologiques contient des données sur l'occurrence et les effets des catastrophes naturelles dans le monde entier de 1900 à aujourd'hui.

L'**engagement de l'utilisateur final** est un autre aspect important de l'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse. Faire participer les utilisateurs finaux à l'élaboration du modèle de vulnérabilité et au processus d'évaluation confère de la crédibilité au modèle et valide les résultats, car ces derniers seront plus pertinents si les utilisateurs finaux sont associés au processus d'évaluation. Il est important de présenter les résultats aux utilisateurs finaux d'une manière facile à comprendre. Dans les évaluations précédentes, cela avait été fait avec les cartes (González Tánago et al. 2016). Les diagrammes en toile d'araignée et une présentation simple des scores sont efficaces pour communiquer les résultats des évaluations de la vulnérabilité à la sécheresse aux utilisateurs finaux. Une présentation simple des résultats de l'évaluation de la vulnérabilité permet aux décideurs de visualiser plus facilement les risques et de les communiquer aux parties prenantes potentiellement concernées, telles que les producteurs agricoles (Wilhelmi and Wilhite 2002). Il est important d'investir pour rendre les résultats de l'évaluation accessibles, par exemple en choisissant un code de couleurs intuitif pour la cartographie afin de toucher un public analphabète (Ganapuram et al. 2013).

[8] www.emdat.be, Université Catholique de Louvain, Belgique

4 LIMITER LES IMPACTS DE LA SÉCHERESSE ET MIEUX RÉAGIR À LA SÉCHERESSE

4.1 Aperçu

Ce chapitre fournit des informations sur les mesures structurelles (physiques) et non structurelles qui peuvent être mises en œuvre pour réduire les effets de la sécheresse sur les pays, les secteurs économiques et les communautés. Le chapitre fournit également des informations sur les stratégies d'intervention et d'assistance à court et à long terme pendant ou immédiatement après la sécheresse. Conformément au cadre DRAMP, le chapitre couvre les actions qui réduisent l'exposition à la sécheresse (atténuation et réponse), augmentent la résilience au risque de sécheresse (atténuation et réponse) et présentent des approches novatrices pour mieux partager les risques de sécheresse (atténuation), plutôt que de laisser le risque affecter de manière disproportionnée les communautés et les secteurs qui sont les plus vulnérables à la sécheresse. Certaines des mesures discutées ici peuvent nécessiter un changement transformationnel des structures sociales, politiques et culturelles.

4.2 Définitions

La communauté consacrée à la réduction des risques de catastrophe définit l'**atténuation des catastrophes** comme étant des mesures structurelles (par exemple, infrastructures et technologies conçues) et non structurelles (par exemple, politiques et sensibilisation) entreprises pour limiter les effets néfastes des catastrophes naturelles[9]. Par exemple, planter des cultures tolérantes à la sécheresse et sensibiliser le public au risque de sécheresse par le biais de projets d'éducation en milieu scolaire sont des actions susceptibles d'atténuer les effets de la sécheresse. Les **interventions** en cas de catastrophe sont définies comme les efforts déployés pour préserver la vie et répondre aux besoins de base des personnes touchées par la catastrophe, telles que la fourniture d'une assistance ou d'une intervention pendant ou immédiatement après une catastrophe[9].

4.3 Réduire l'exposition et augmenter la résistance à la sécheresse

La réduction de l'exposition à la sécheresse vise à réduire les pertes potentielles en ressources humaines, en moyens de subsistance, en services et ressources écosystémiques, en infrastructures, ainsi qu'en actifs économiques, sociaux et culturels. L'augmentation de la résilience à la sécheresse vise à renforcer la capacité des communautés, des écosystèmes et des économies d'anticiper, d'absorber les effets de la sécheresse, d'y faire face ou de s'attaquer aux effets de la sécheresse de manière rapide et efficace. L'exposition et la résilience sont inextricablement liées, car les options qui réduisent souvent l'exposition augmentent à leur tour la résilience. Par exemple, la diversification des systèmes agricoles et l'adoption de pratiques de gestion durable des terres, telles que l'agriculture intelligente face au climat et les infrastructures naturelles, réduisent les pertes potentielles dues à la sécheresse et aident à mieux absorber les effets de périodes prolongées de précipitations anormalement basses (Coates and Smith 2012). Des mesures structurelles telles que de nouvelles infrastructures de stockage d'eau et d'irrigation peuvent réduire les zones d'agriculture exposées aux risques de sécheresse en réduisant le potentiel de pertes économiques, tout en augmentant la résilience en améliorant la sécurité de l'eau en période de stress.

4.3.1 Diversifier et moderniser l'agriculture

Réduire le nombre de personnes, de moyens de subsistance et de secteurs touchés par la sécheresse implique de dépeupler et/ou de réduire la dépendance à l'égard des modes de subsistance et de monoculture dans les zones les plus touchées et les plus vulnérables. Les politiques qui encouragent la diversification des terres et des systèmes de production agricole afin de réduire la dépendance à des cultures uniques et à des types d'utilisation des terres uniques réduiront également l'exposition

[9] https://www.unisdr.org/we/inform/terminology

des communautés à la sécheresse (Collier and Dercon 2014, Lei et al. 2014). La résilience à la sécheresse dans les systèmes agricoles peut être améliorée en diversifiant la composition et les déplacements du bétail, ainsi que les types de culture et les périodes d'ensemencement, en gérant la capacité de charge des pâturages et des prairies, en fonction des fluctuations climatiques, en augmentant la disponibilité et l'accès à l'eau - notamment en Afrique - en soutenant les systèmes agricoles qui accueillent les petits exploitants et les grandes exploitations (Goldman and Riosmena 2013, Collier and Dercon 2014, Opiyo et al. 2015).

La migration massive hors des zones sujettes à la sécheresse n'est pas une alternative légitime, à moins qu'elle ne fasse partie du processus de transition socio-économique et structurel de commercialisation et de modernisation agricole des pays en développement (Pingali 1997, Collier and Dercon 2014). Les politiques qui soutiennent la commercialisation, la mécanisation et l'augmentation de la productivité du travail résultant de l'adoption de nouvelles technologies et de la diversification des cultures se traduiront généralement par une augmentation des rendements et une réduction de la demande de main-d'œuvre. Par exemple, la migration de masse de la main-d'œuvre des zones rurales en Chine depuis les années 1970 découle de la politique agricole et de la réforme du commerce du gouvernement central, ainsi que de la réforme du régime foncier, de la libéralisation du marché alimentaire et des investissements généraux dans les infrastructures et la recherche agricoles (Carter et al. 2012, Deininger et al. 2014). La proportion de citoyens travaillant dans l'agriculture a chuté d'environ 70 % en 1978 à 38 % en 2009 et, pendant la même période, le secteur agricole a progressé de plus de 300 % en chiffres réels (Carter et al. 2012). Il est important de noter que l'augmentation de la productivité agricole observée en Chine a été partiellement obtenue en ouvrant de nouvelles terres à l'agriculture dans la partie plus sèche du nord du pays, ce qui n'a été possible que grâce au développement de l'irrigation des eaux souterraines. L'épuisement rapide des ressources en eaux souterraines qui en résulte est insoutenable et constitue une préoccupation majeure pour les gouvernements centraux et régionaux (Carter et al. 2012).

4.3.2 Gestion durable des ressources en terres et en eau

La modernisation et l'intensification durable de l'agriculture qui favorisent le passage d'une agriculture de subsistance à une agriculture de marché pourraient conduire à l'abandon de terres marginales et de zones sujettes à la sécheresse si les possibilités d'exploiter les eaux souterraines sont limitées (Pingali 1997) et/ou si la dégradation des terres et la désertification rendent l'agriculture non rentable. Dile et al. (2013) soutiennent que la **modernisation, l'intensification durable et l'adoption de technologies de récupération de l'eau** pourraient réduire l'écart de rendement dans l'agriculture subsaharienne, en limitant l'expansion de l'agriculture et en encourageant la restauration des terres dégradées. Les pratiques de récupération de l'eau in situ comprennent la formation de crêtes dans les champs pour ralentir le ruissellement, le paillage aux fins de réduire l'évaporation de l'humidité du sol et la réduction, voire l'absence de labourage. Les options ex-situ comprennent des petits barrages de récupération d'eau et des mesures agroforestières qui stabilisent les sols et améliorent les microclimats afin de réduire l'évaporation. Outre l'effet positif de la récupération de l'eau sur les rendements agricoles, de nombreux avantages pour la biodiversité, la qualité de l'eau, la restauration des sols et la réduction de l'érosion des sols peuvent être obtenus grâce à des techniques principalement conçues pour réduire l'exposition et accroître la résistance à la sécheresse (Dile et al. 2013).

Les principes de mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) visant à réduire la pression sur les ressources en eau et l'élaboration de politiques encourageant la collecte des eaux de pluie pour accroître la disponibilité de l'eau peuvent réduire l'exposition des communautés agricoles vulnérables aux risques de sécheresse en Afrique subsaharienne et ailleurs (Mwenge Kahinda et al. 2010, Lebel et al. 2015). De nombreuses options de GIRE sont disponibles pour améliorer l'offre et réduire la demande en ressources en eau afin de limiter l'exposition.[10] Certaines des options sont des mesures à long terme mises en œuvre en prévision de la sécheresse future, tandis que d'autres sont à court terme et peuvent être mises en œuvre pendant la sécheresse afin de réduire l'exposition. Les améliorations apportées à l'approvisionnement sont principalement des options à long terme, en dehors de la récupération de l'eau de pluie et des approches basées sur la nature déjà évoquées, et impliquent de grands projets d'infrastructure, tels que des stockages nouveaux ou élargis, des aqueducs et des canaux, le dessalement, le traitement et la réutilisation de l'ensemencement des nuages. Les options de réduction de la demande sont nettement plus rentables et peuvent être mises en œuvre à court terme, elles sont donc adaptées à une implémentation pendant la sécheresse en réponse à des déclencheurs spécifiques de sévérité. Les mesures de la demande comprennent des programmes d'éducation en matière d'économie d'eau, la réglementation de l'allocation et de l'utilisation de l'eau, la surveillance de l'eau, les systèmes de mesure et de prévision, les marchés et la tarification de l'eau, ainsi que les technologies permettant d'économiser l'eau. La mise en œuvre des options d'augmentation de l'offre et de gestion de la demande doit être juste, équitable et viser à réduire la vulnérabilité.

Pour chaque secteur vulnérable à la sécheresse, de nombreuses options spécifiques sont disponibles permettant d'augmenter l'offre et de réduire la demande. Elles sont trop nombreuses pour être énumérées ici. **Il est recommandé d'élaborer des directives sectorielles pour la GIRE, le niveau de déclenchement de la sécheresse et la réduction de l'exposition.**

Les approches fondées sur la nature ou sur les infrastructures vertes en matière d'utilisation durable des terres et de gestion des terres, qui supposent une utilisation rationnelle des ressources naturelles afin d'améliorer les conditions du sol (par exemple, l'ajout de carbone organique dans le sol), d'accroître la biodiversité et la couverture terrestre, ainsi que de fournir des services écosystémiques, réduira ou arrêtera la dégradation des terres et

[10] Voir http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/571/mod_page/content/85/FAO.pdf

la désertification, et augmentera la résilience des communautés vulnérables et exposées aux risques de sécheresse (Tsegai et al. 2015, Lei et al. 2016, Tadesse 2016). Le sol est particulièrement important pour réduire la vulnérabilité. Par exemple, les caractéristiques de la porosité, de la texture, de l'exposition, du relief, de la quantité de matière organique et de la densité apparente du sol auront toutes une influence sur la rétention d'eau du sol. Une combinaison d'infrastructures radicales (telles que l'augmentation de l'approvisionnement en eau) et de solutions douces (telles que le renforcement des capacités, l'infrastructure verte et les solutions basées sur la nature) est la meilleure solution pour absorber et se remettre des effets de la sécheresse (Coates and Smith 2012).

4.3.3 Éducation et renforcement des capacités

Les mesures non structurelles destinées à réduire l'exposition et à accroître la résilience aux risques de sécheresse sont centrées sur les méthodes permettant de communiquer et d'éduquer les communautés sur les risques de sécheresse (UNISDR 2015, Tadesse 2016) et de renforcer les capacités d'adaptation. Par exemple, l'identification et la démonstration de liens clairs entre les interventions de réduction des risques de sécheresse dans les systèmes agricoles et l'amélioration des moyens de subsistance incitera les agriculteurs à investir des ressources limitées dans les interventions (Global Water Partnership Eastern Africa 2016). Les niveaux relativement élevés d'investissements technologiques dans les exploitations et/ou la modification des pratiques de gestion des terres visant à réduire les risques de sécheresse peuvent obliger les agriculteurs à s'endetter. Ils hésiteront à prendre cette mesure si les avantages de leurs moyens de subsistance ne sont pas clairement démontrés. Une communication réussie des stratégies de réduction des risques de sécheresse aux agriculteurs et de la manière dont ils peuvent en tirer parti est possible grâce à des approches de groupe et de réseaux sociaux pour la diffusion d'informations (Global Water Partnership Eastern Africa 2016). Les téléphones portables et les TIC largement répandus dans les économies moins développées constituent non seulement une plate-forme pour la diffusion des avertissements de sécheresse (voir chapitre 2), mais peuvent également être utilisés pour diffuser des informations sur les pratiques de gestion durable des terres qui améliorent la résilience. Les initiatives ascendantes dirigées par les communautés peuvent développer un sentiment d'appropriation des stratégies de résilience à la sécheresse et de réduction des risques (Global Water Partnership Eastern Africa 2016, Tadesse 2016), qui engagent et autonomisent des groupes typiquement marginalisés, tels que les pauvres, les migrants, les populations autochtones, les femmes, les jeunes, les personnes âgées et les handicapés (UNISDR 2015, Tadesse 2016, Windhoek Declaration 2016).

4.4 Transférer et partager les risques de la sécheresse

Partager les risques de la sécheresse signifie transférer les risques des personnes les plus vulnérables à la communauté plus large, qui, traditionnellement, peut ne pas être directement touchée par la sécheresse, mais qui bénéficient de l'atténuation ou de l'élimination de ses effets. L'objectif est de concevoir et de mettre en œuvre des stratégies financières intelligentes, réduisant les risques, qui soutiennent les secours, la reconstruction et le rétablissement des moyens de subsistance dans les zones touchées. Ces outils doivent mobiliser des ressources financières, impliquant le secteur privé (Tadesse 2016). Les produits d'assurance (micro-assurance, réassurance) et l'élargissement des groupes de risques aux échelles nationale, régionale et mondiale sont des exemples d'approches intelligentes.

Une approche novatrice présentée par Shiferaw et al. (2014) est le développement de l'assurance indicielle météorologique. L'assurance indicielle est un type d'assurance lié à un indice tel que les précipitations, la température ou le rendement des cultures, par opposition aux pertes réelles qui pourraient être difficiles à évaluer. L'assurance indicielle a des coûts de transaction moins élevés et une large applicabilité dans les zones rurales par le biais de stations météorologiques, la rendant ainsi plus adaptée aux agriculteurs pauvres (Alderman and Haque 2007). L'indice météorologique est régressé en fonction des variations de la productivité agricole et le paiement des indemnités est déclenché lorsque l'indice passe en dessous d'un certain niveau. Par exemple, une période prolongée de faibles précipitations peut déclencher un paiement d'assurance, s'il existe une corrélation établie précédemment entre les niveaux enregistrés de faibles précipitations et les mauvaises récoltes. Des indices de sécheresse (voir le chapitre 2) tels que le simple SPI ou les indicateurs composites plus complexes seraient idéaux pour une utilisation dans le cadre d'une assurance indicielle météorologique contre la sécheresse. Toute assurance indicielle devrait inclure un programme de surveillance visant à atténuer la probabilité de conséquences défavorables, les paiements d'indemnités étant nettement insuffisants pour couvrir les pertes. La possibilité d'accéder aux marchés mondiaux de l'assurance et de transférer les risques associés à des événements à probabilité faible et à conséquences élevées rend l'assurance indicielle sur les conditions météorologiques potentiellement utile pour gérer le risque de sécheresse (Shiferaw et al. 2014).

L'assurance météo peut également être utilisée pour informer les paiements effectués dans le cadre de systèmes de protection sociale (Shiferaw et al. 2014). Les mesures de protection sociale fournissent un soutien aux moyens de subsistance et assurent la sécurité alimentaire en période de stress. Ils sont souvent axés sur la communauté et répartissent les ressources entre les groupes les plus vulnérables et les plus touchés par les phénomènes météorologiques extrêmes. La Banque mondiale a mis en place plusieurs programmes et initiatives de partage des risques et des mesures de protection, fournissant une assurance aux agriculteurs touchés par la sécheresse.[11] Leur *programme de développement d'une assurance agricole* et le *Mécanisme mondial d'assurance indicielle (Global Index Insurance Facility - GIIF)* renforcent l'assurance de l'agriculture pour les agriculteurs vulnérables aux phénomènes météorologiques catastrophiques. En Inde, la Banque mondiale a mis au point un programme novateur d'assurance-récolte qui a profité à un million d'agriculteurs. Les détails techniques de ces programmes sont considérables et la Banque devrait donc être contactée pour une consultation.

[11] http://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/reduce-risk-vulnerability-and-gender-inequality-in-agriculture

5 RECOMMANDATIONS

1. **Mise en place des systèmes de surveillance de la sécheresse et d'alerte rapide**
   De nombreux indices et indicateurs sont disponibles pour surveiller et prévoir la sécheresse, et chacun doit être associé à des déclencheurs d'intervention appropriés lorsque la sécheresse s'aggrave. Les indicateurs et les déclencheurs pertinents doivent être sélectionnés avec soin. Les travaux de Steinemann et d'autres (Steinemann and Cavalcanti 2006, Steinemann et al. 2015) proposent des directives utiles pour choisir des indicateurs et des points de déclenchement. Le Tableau 1 et le Manuel des indicateurs de la sécheresse et des indices (World Meteorological Organization and Global Water Partnership 2016) doivent être consultés pour choisir les indices et indicateurs appropriés. Le Centre national de surveillance de la sécheresse des États-Unis (US National Drought Monitoring Centre) a mis au point un système de surveillance et de prévision de la sécheresse à la pointe de la technologie, qui devrait servir de modèle pour la mise au point de nouveaux systèmes de surveillance de la sécheresse.

2. **Évaluations du risque de sécheresse**
   L'évaluation des risques de sécheresse fournit des informations importantes pour aider les autorités à adapter les mesures de prévention, d'atténuation et d'intervention en cas de crises de sécheresse destinées aux communautés et aux secteurs les plus vulnérables à la sécheresse, et dans les endroits où les caractéristiques de la sécheresse sont ou devraient être les plus sévères. L'évaluation de la vulnérabilité est une composante essentielle de l'évaluation du risque. Une évaluation de la vulnérabilité doit s'appuyer sur un cadre conceptuel et comporter des données et des indicateurs décrivant les composantes biophysiques et socio-économiques de la vulnérabilité. Les indicateurs des systèmes de surveillance et d'alerte rapide en cas de sécheresse et des évaluations de la vulnérabilité doivent être cohérents, de sorte que l'apparition d'une sécheresse et son impact sur les systèmes vulnérables soient clairs et rapidement reconnus. La sélection appropriée d'indicateurs, en particulier pour la capacité d'adaptation, peut illustrer la possibilité des communautés vulnérables à réagir et à s'adapter aux risques actuels et émergents. Le Tableau 4 devrait être utilisé comme point de départ pour choisir les indicateurs à utiliser dans l'évaluation des risques de sécheresse. Les indicateurs mondiaux (Tableau 4) doivent être complétés ou interchangés avec des données pertinentes aux échelles nationale et locale, si elles sont disponibles.

3. **Identifier, tester et mettre en œuvre des actions permettant d'atténuer les risques de sécheresse**
   De nombreuses mesures structurelles (physiques) et non structurelles peuvent être utilisées par les pays, les secteurs et les communautés pour réduire les effets de la sécheresse. La priorité doit être donnée aux politiques et aux interventions qui diversifient et modernisent l'agriculture et les économies au sens large, qui encouragent une gestion judicieuse des ressources en terres et en eau, qui sensibilisent les communautés au risque de sécheresse et développent des capacités d'adaptation. De nombreuses options spécifiques sont disponibles pour chaque secteur économique vulnérable à la sécheresse afin d'augmenter l'offre et de réduire la demande en ressources en eau (en fonction de différents niveaux de déclenchement), et de mieux gérer les terres et la biodiversité et améliorer ainsi la résilience à la sécheresse. Ces options sont trop nombreuses pour être énumérées ici. Des directives sectorielles pour la GIRE, les niveaux de déclenchement de la sécheresse, la gestion des terres et de la biodiversité, la réduction de l'exposition et la résilience accrue sont recommandées pour les secteurs les plus exposés.

4. **Partage de risques**
   Il existe plusieurs outils innovants qui protègent les communautés contre les sécheresses extrêmes, notamment les produits d'assurance intelligents (micro-assurance, réassurance) et l'extension des pools de risques aux échelles nationale, régionale et mondiale. Bien que la conception et la mise en œuvre de ces outils soient complexes, l'assurance indicielle météorologique utilisant des indices de sécheresse est une approche intuitive qui peut également soutenir la distribution intelligente des paiements des mesures de protection sociale pour assurer les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire en période de sécheresse. La Banque mondiale, qui dispose de nombreuses informations et d'études de cas sur les programmes d'assurance et de partage des risques, peut être consultée pour plus d'informations.

6 RÉFÉRENCES

Adger, W. N. 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16:268-281.

AghaKouchak, A. 2015. A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010–2011 East Africa drought. Journal of Hydrology 526:127-135.

Alam, K. 2015. Farmers' adaptation to water scarcity in drought-prone environments: A case study of Rajshahi District, Bangladesh. Agricultural Water Management 148:196-206.

Alderman, H., and T. Haque. 2007. Insurance Against Covariate Shocks. The World Bank.

Alley, W. M. 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. Journal of Climate and Applied Meteorology 23:1100-1109.

Anderson, M. C., C. Hain, B. Wardlow, A. Pimstein, J. R. Mecikalski, and W. P. Kustas. 2010. Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. Journal of Climate 24:2025-2044.

Bachmair, S., K. Stahl, K. Collins, J. Hannaford, M. Acreman, M. Svoboda, C. Knutson, K. H. Smith, N. Wall, B. Fuchs, N. D. Crossman, and I. C. Overton. 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. Wiley Interdisciplinary Reviews-Water 3:516-536.

Bird, T. J., A. E. Bates, J. S. Lefcheck, N. A. Hill, R. J. Thomson, G. J. Edgar, R. D. Stuart-Smith, S. Wotherspoon, M. Krkosek, J. F. Stuart-Smith, G. T. Pecl, N. Barrett, and S. Frusher. 2014. Statistical solutions for error and bias in global citizen science datasets. Biological Conservation 173:144-154.

Bonney, R., J. L. Shirk, T. B. Phillips, A. Wiggins, H. L. Ballard, A. J. Miller-Rushing, and J. K. Parrish. 2014. Next Steps for Citizen Science. Science 343:1436.

Brown, J. F., B. D. Wardlow, T. Tadesse, M. J. Hayes, and 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.

Byun, H.-R., and D. A. Wilhite. 1999. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. Journal of Climate 12:2747-2756.

Carrão, H., G. Naumann, and P. Barbosa. 2016. Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. Global Environmental Change 39:108-124.

Carter, C. A., F. Zhong, and J. Zhu. 2012. Advances in Chinese Agriculture and its Global Implications. Applied Economic Perspectives and Policy 34:1-36.

Chandrasekar, K., M. V. R. Sesha Sai, P. S. Roy, and 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.

Coates, D., and M. Smith. 2012. Natural infrastructure solutions for water security. Pages 167-188 in R. Ardakanian and D. Jaeger, editors. Water and the Green Economy – Capacity Development Aspects. UN-Water Decade Programme on Capacity Development, Bonn, Germany.

Collier, P., and S. Dercon. 2014. African Agriculture in 50 Years: Smallholders in a Rapidly Changing World? World Development 63:92-101.

Corbeels, M., J. de Graaff, T. H. Ndah, E. Penot, F. Baudron, K. Naudin, N. Andrieu, G. Chirat, J. Schuler, I. Nyagumbo, L. Rusinamhodzi, K. Traore, H. D. Mzoba, and I. S. Adolwa. 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 187:155-170.

Crain, R., C. Cooper, and J. L. Dickinson. 2014. Citizen Science: A Tool for Integrating Studies of Human and Natural Systems. Annual Review of Environment and Resources 39:641-665.

Crossman, N. D. 2017. Drought Resilience, Adaptation and Management Policy (DRAMP) Framework., UNCCD, Bonn.

Deininger, K., S. Jin, F. Xia, and J. Huang. 2014. Moving Off the Farm: Land Institutions to Facilitate Structural Transformation and Agricultural Productivity Growth in China. World Development 59:505-520.

Dile, Y. T., L. Karlberg, M. Temesgen, and J. Rockström. 2013. The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. Agriculture, Ecosystems & Environment 181:69-79.

Dogan, S., A. Berktay, and V. P. Singh. 2012. Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. Journal of Hydrology 470–471:255-268.

Eriksen, S. H., and P. M. Kelly. 2007. Developing Credible Vulnerability Indicators for Climate Adaptation Policy Assessment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12:495-524.

Fluixá-Sanmartín, J., D. Pan, L. Fischer, B. Orlowsky, J. García-Hernández, F. Jordan, C. Haemmig, F. Zhang, and J. Xu. 2018. Searching for the optimal drought index and timescale combination to detect drought: a case study from the lower Jinsha River basin, China. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22:889-910.

Füssel, H.-M., and R. J. T. Klein. 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. Climatic Change 75:301-329.

Ganapuram, S., N. Nagarajan, and V. Balaji. 2013. Village-level Drought Vulnerability Assessment Using Geographic Information System (GIS). International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering 3:1-10.

Gbetibouo, G. A., C. Ringler, and R. Hassan. 2010. Vulnerability of the South African farming sector to climate change and variability: An indicator approach. Natural Resources Forum 34:175-187.

Gibbs, W. J., and J. V. Maher. 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48. Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.

Global Water Partnership Eastern Africa. 2016. Building resilience to drought: Learning from experience in the Horn of Africa. Integrated Drought Management Programme in the Horn of Africa. Entebbe, Uganda.

Goldman, M. J., and F. Riosmena. 2013. Adaptive capacity in Tanzanian Maasailand: Changing strategies to cope with drought in fragmented landscapes. Global Environmental Change 23:588-597.

Gommes, R., R. Balaghi, A. Challinor, H. P. Das, M. A. A. Dawod, L. Mariani, and B. Tychon. 2010. Agrometeorlogical Forecasting.in WMO, editor. Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO, Geneva.

González Tánago, I., J. Urquijo, V. Blauhut, F. Villarroya, and L. De Stefano. 2016. Learning from experience: a systematic review of assessments of vulnerability to drought. Natural Hazards 80:951-973.

Grasso, V. F. n.d. Early Warning Systems: State-of-Art Analysis and Future Directions. Draft Report. United Nations Environment Program.

Guttman, N. B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. Journal of the American Water Resources Association 35:311-322.

Hao, Z., and A. AghaKouchak. 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. Advances in Water Resources 57:12-18.

Hao, Z., A. AghaKouchak, N. Nakhjiri, and A. Farahmand. 2014. Global integrated drought monitoring and prediction system. Scientific Data 1:140001.

Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall, and M. Widhalm. 2010. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. Bulletin of the American Meteorological Society 92:485-488.

Hayes, M. J. 2005. Drought Indices. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc.

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.

Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, and L. G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment 83:195-213.

IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Field, C. B., 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, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacobi, J., D. Perrone, L. L. Duncan, and G. Hornberger. 2013. A tool for calculating the Palmer drought indices. Water Resources Research 49:6086-6089.

Jain, V. K., R. P. Pandey, M. K. Jain, and H.-R. Byun. 2015. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. Weather and Climate Extremes 8:1-11.

Keetch, J. J., and 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.

Keyantash, J., and J. A. Dracup. 2002. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. Bulletin of the American Meteorological Society 83:1167-1180.

Kim, H., J. Park, J. Yoo, and T.-W. Kim. 2015. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea. Journal of Hydro-environment Research 9:28-35.

Kogan, F. N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research 15:91-100.

Kogan, F. N. 2001. Operational Space Technology for Global Vegetation Assessment. Bulletin of the American Meteorological Society 82:1949-1964.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123:1-22.

Lebel, S., L. Fleskens, P. M. Forster, L. S. Jackson, and S. Lorenz. 2015. Evaluation of In Situ Rainwater Harvesting as an Adaptation Strategy to Climate Change for Maize Production in Rainfed Africa. Water Resources Management 29:4803-4816.

Lei, Y., J. a. Wang, Y. Yue, Y. Yin, and Z. Sheng. 2014. How adjustments in land use patterns contribute to drought risk adaptation in a changing climate—A case study in China. Land Use Policy 36:577-584.

Lei, Y., H. Zhang, F. Chen, and L. Zhang. 2016. How rural land use management facilitates drought risk adaptation in a changing climate — A case study in arid northern China. Science of the Total Environment 550:192-199.

Lipper, L., P. Thornton, B. M. Campbell, T. Baedeker, A. Braimoh, M. Bwalya, P. Caron, A. Cattaneo, D. Garrity, K. Henry, R. Hottle, L. Jackson, A. Jarvis, F. Kossam, W. Mann, N. McCarthy, A. Meybeck, H. Neufeldt, T. Remington, P. T. Sen, R. Sessa, R. Shula, A. Tibu, and E. F. Torquebiau. 2014. Climate-smart agriculture for food security. Nature Clim. Change 4:1068-1072.

Liu, W. T., and F. N. Kogan. 1996. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. International Journal of Remote Sensing 17:2761-2782.

Logar, I., and J. C. J. M. van den Bergh. 2013. Methods to Assess Costs of Drought Damages and Policies for Drought Mitigation and Adaptation: Review and Recommendations. Water Resources Management 27:1707-1720.

Lyon, B. 2004. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. Geophysical Research Letters 31: n/a-n/a.

McNeeley, S. M., T. A. Beeton, and D. S. Ojima. 2016. Drought Risk and Adaptation in the Interior United States: Understanding the Importance of Local Context for Resource Management in Times of Drought. Weather, Climate, and Society 8:147-161.

Mehran, A., O. Mazdiyasni, and A. AghaKouchak. 2015. A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120:7520-7533.

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

Mwenge Kahinda, J., A. E. Taigbenu, and R. J. Boroto. 2010. Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 35:742-751.

Nalbantis, I., and G. Tsakiris. 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resources Management 23:881-897.

Naumann, G., P. Barbosa, L. Garrote, A. Iglesias, and J. Vogt. 2014. Exploring drought vulnerability in Africa: an indicator based analysis to be used in early warning systems. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18:1591-1604.

Nijssen, B., S. Shukla, C. Lin, H. Gao, T. Zhou, Ishottama, J. Sheffield, E. F. Wood, and D. P. Lettenmaier. 2014. A Prototype Global Drought Information System Based on Multiple Land Surface Models. Journal of Hydrometeorology 15:1661-1676.

O'Brien, R. M. 2007. A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. Quality & Quantity 41:673-690.

Opiyo, F., O. Wasonga, M. Nyangito, J. Schilling, and R. Munang. 2015. Drought Adaptation and Coping Strategies Among the Turkana Pastoralists of Northern Kenya. International Journal of Disaster Risk Science 6:295-309.

Palmer, W. C. 1968. Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index. Weatherwise 21:156-161.

Pew Research Center. 2015. Cell Phones in Africa: Communication Lifeline.

Pingali, P. L. 1997. From Subsistence to Commercial Production Systems: The Transformation of Asian Agriculture. American Journal of Agricultural Economics 79:628-634.

Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C. J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin*, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll. 2004. The Global Land Data Assimilation System. Bulletin of the American Meteorological Society 85:381-394.

Scaini, A., N. Sánchez, S. M. Vicente-Serrano, and J. Martínez-Fernández. 2015. SMOS-derived soil moisture anomalies and drought indices: a comparative analysis using in situ measurements. Hydrological Processes 29:373-383.

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

Sheffield, J., and E. F. Wood. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. Climate Dynamics 31:79-105.

Sheffield, J., E. F. Wood, N. Chaney, K. Guan, S. Sadri, X. Yuan, L. Olang, A. Amani, A. Ali, S. Demuth, and L. Ogallo. 2013. A Drought Monitoring and Forecasting System for Sub-Sahara African Water Resources and Food Security. Bulletin of the American Meteorological Society 95:861-882.

Shiferaw, B., K. Tesfaye, M. Kassie, T. Abate, B. M. Prasanna, and A. Menkir. 2014. Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. Weather and Climate Extremes 3:67-79.

Steinemann, A., S. F. Iacobellis, and D. R. Cayan. 2015. Developing and Evaluating Drought Indicators for Decision-Making. Journal of Hydrometeorology 16:1793-1803.

Steinemann, A. C., and L. F. N. Cavalcanti. 2006. Developing Multiple Indicators and Triggers for Drought Plans. Journal of Water Resources Planning and Management 132:164-174.

Stringer, L. C., J. C. Dyer, M. S. Reed, A. J. Dougill, C. Twyman, and D. Mkwambisi. 2009. Adaptations to climate change, drought and desertification: local insights to enhance policy in southern Africa. Environmental Science & Policy 12:748-765.

Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens. 2002. The Drought Monitor. Bulletin of the American Meteorological Society 83:1181-1190.

Tadesse, T. 2016. Strategic Framework for Drought Management and Enhancing Resilience in Africa. Draft White Paper. National Drought Mitigation Center, Nebraska, USA.

Taschetto, A. S., A. S. Gupta, C. C. Ummenhofer, and M. H. England. 2016. Can Australian Multiyear Droughts and Wet Spells Be Generated in the Absence of Oceanic Variability? Journal of Climate 29:6201-6221.

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

Tsegai, D., J. Liebe, and R. Ardakanian. 2015. Capacity Development to Support National Drought Management Policies: Synthesis. UNW-DPC, Bonn, Germany.

UNCCD, FAO, and WMO. 2013. High Level Meeting on National Drought Policy (HMNDP). Science Document: Best Practices on National Drought Management Policy. UNCCD, FAO, WMO, Geneva.

UNISDR. 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030.

Van Loon, A. F. 2015. Hydrological drought explained. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 2:359-392.

Van Loon, A. F., T. Gleeson, J. Clark, A. I. J. M. Van Dijk, K. Stahl, J. Hannaford, G. Di Baldassarre, A. J. Teuling, L. M. Tallaksen, R. Uijlenhoet, D. M. Hannah, J. Sheffield, M. Svoboda, B. Verbeiren, T. Wagener, S. Rangecroft, N. Wanders, and H. A. J. Van Lanen. 2016. Drought in the Anthropocene. Nature Geosci 9:89-91.

Van Loon, A. F., and G. Laaha. 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. Journal of Hydrology 526:3-14.

Verdin, J., and R. Klaver. 2002. Grid-cell-based crop water accounting for the famine early warning system. Hydrological Processes 16:1617-1630.

Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno. 2009. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate 23:1696-1718.

Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, J. Lorenzo-Lacruz, J. J. Camarero, J. I. López-Moreno, C. Azorin-Molina, J. Revuelto, E. Morán-Tejeda, and A. Sanchez-Lorenzo. 2012. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. Earth Interactions 16:1-27.

Wang, H., J. C. Rogers, and D. K. Munroe. 2015. Commonly Used Drought Indices as Indicators of Soil Moisture in China. Journal of Hydrometeorology 16:1397-1408.

Wilhelmi, O. V., and D. A. Wilhite. 2002. Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. Natural Hazards 25:37-58.

Wilhite, D. A., and M. H. Glantz. 1985. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International 10:111-120.

Windhoek Declaration. 2016. The Windhoek Declaration for Enhancing Resilience to Drought in Africa. Namibia.

Wiréhn, L., Å. Danielsson, and T.-S. S. Neset. 2015. Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change. Journal of Environmental Management 156:70-80.

Wood, E. F., S. D. Schubert, A. W. Wood, C. D. Peters-Lidard, K. C. Mo, A. Mariotti, and R. S. Pulwarty. 2015. Prospects for Advancing Drought Understanding, Monitoring, and Prediction. Journal of Hydrometeorology 16:1636-1657.

World Meteorological Organization. 2012. Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). 2014. National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action (D.A. Wilhite). Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines Series 1. WMO, Geneva, Switzerland and GWP, Stockholm, Sweden.

World Meteorological Organization and Global Water Partnership. 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. WMO, Geneva, Switzerland and GWP, Stockholm, Sweden.

Zargar, A., R. Sadiq, B. Naser, and F. I. Khan. 2011. A review of drought indices. Environmental Reviews 19:333-349.

United Nations
Convention to Combat
Desertification

Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD)

UN Campus Platz der Vereinten Nationen 1
53113 Bonn Allemagne
www.unccd.int