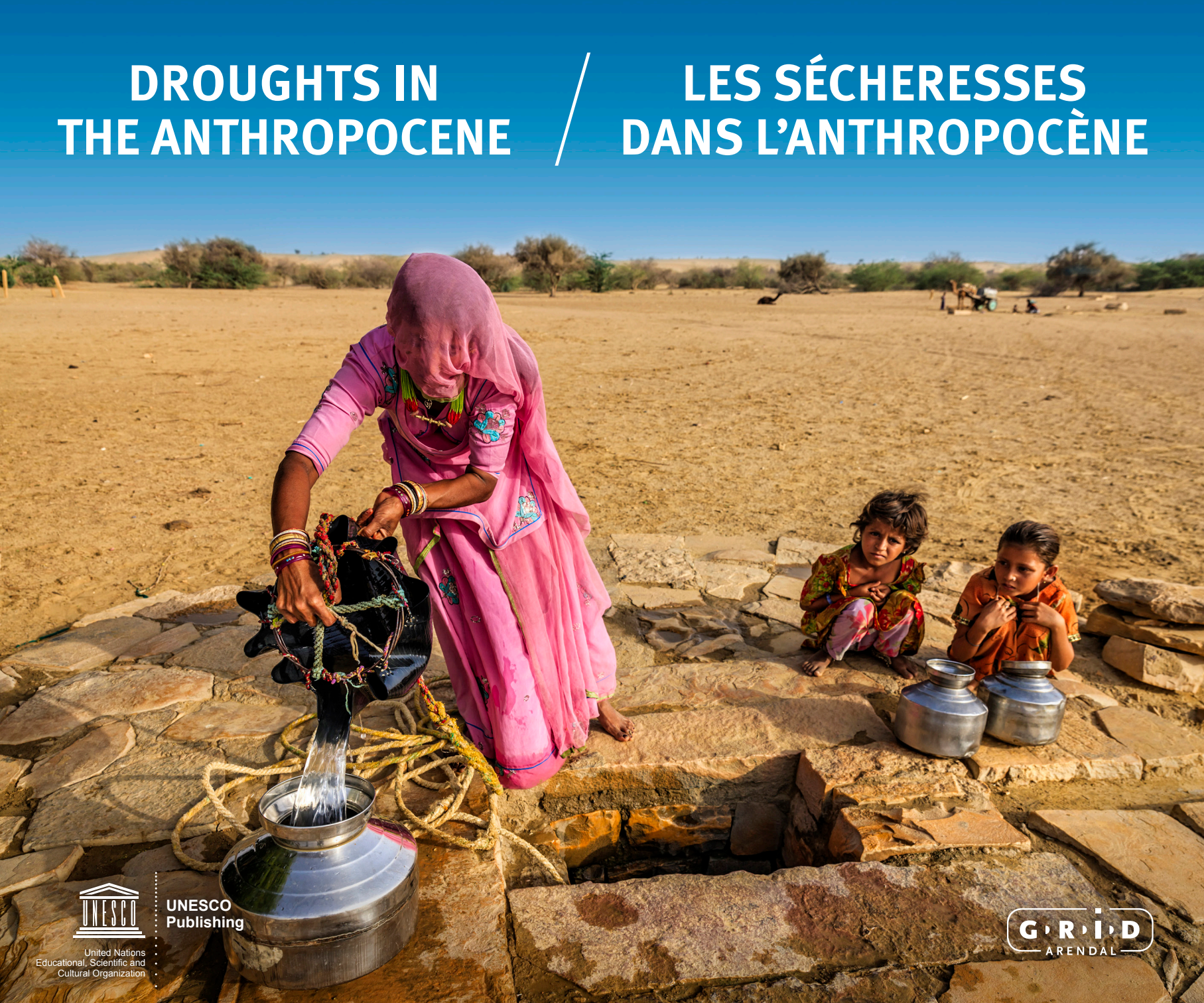
DROUGHTS IN THE ANTHROPOCENE / LES SÉCHERESSES DANS L'ANTHROPOCÈNE



UNESCO Publishing
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

GRID ARENDAL

DROUGHTS IN THE ANTHROPOCENE / LES SÉCHERESSES DANS L'ANTHROPOCÈNE

Published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France, and GRID-Arendal, P.O. Box 183, N-4802 Arendal, Norway

© UNESCO and GRID-Arendal, 2019

UNESCO ISBN 978-92-3-100353-0
GRID-Arendal ISBN 978-82-7701-191-2



This publication is available in Open Access under the Attribution ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/). By using the content of this publication, the users accept to be bound by the terms of use of the UNESCO Open Access Repository (http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en).

The designations employed and the presentation of material throughout this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO or GRID-Arendal concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The ideas and opinions expressed in this publication are those of the authors; they are not necessarily those of UNESCO or GRID-Arendal and do not commit these organizations.





Recommended citation:
Gjerdi, H. L., Gunn, T., Mishra, A., Pulwarty, R. S. and Sheffield, J. 2019. *Droughts in the Anthropocene/Les sécheresses dans l'Anthropocène*. UNESCO and GRID-Arendal.

Authors
Hanna Lønning Gjerdi, GRID-Arendal, Norway
Tobias Gunn, GRID-Arendal, Norway
Anil Mishra, UNESCO, France
Roger S. Pulwarty, NOAA, USA
Justin Sheffield, University of Southampton, UK

Content contributors and reviewers
Wyatt Arnold, California Department of Water Resources, USA
Steve Darby, University of Southampton, UK
Guy Debonnet, UNESCO WHC, France
Harry Dixon, Centre for Ecology & Hydrology, UK
Miguel Doria, UNESCO, Uruguay
David Farrell, Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology, Barbados
Renée Gift, UNESCO, France
Verónica González, UNESCO LINKS, France
Jamie Hannaford, Centre for Ecology & Hydrology, UK
Charlotte Hipkiss, University of Southampton, UK
Adelaide Hitchings, University of Southampton, UK
Craig Hutton, University of Southampton, UK
Lisa Hymas, GRID-Arendal, Norway
Hindou Oumarou Ibrahim, AFPAT, Chad
Feng Jing, UNESCO WHC, France
Kasper Johansen, KAUST, Saudi Arabia
Akmal Karimov, TIIAME, Uzbekistan
Bakhtiyor Karimov, TIIAME, Uzbekistan
Waldo Lavado, Peruvian National Service of Meteorology and Hydrology, Peru
Jessica Lawson, USA
Roland Lin, UNESCO WHC, France
William S. Logan, ICIWaRM, US Army Corps of Engineers, USA
Romani Maendly, California Department of Water Resources, USA
Gabriel Mancilla, CAZALAC, Chile
Matt McCabe, KAUST, Saudi Arabia
Mizuki Murai, IUCN World Heritage Programme, UK
Akane Nakamura, UNESCO WHC, France
Siri Olsson, GRID-Arendal, Norway
Jean-Marie Kileshye Onema, University of Witwatersrand, South Africa
Jayakumar Ramasamy, UNESCO, Kenya
Steven Robins, Stellenbosch University, South Africa
Abdulkhakim Salokhiddinov, TIIAME, Uzbekistan
David Sear, University of Southampton, UK
Vadim Sokolov, IFAS, Uzbekistan
Astrid Vannoppen, Belgium
Koen Verbist, UNESCO, Zimbabwe
Omogbemi Omoloju Yaya, RC-IRBM, National Water Resources Institute, Nigeria

Other contributions
Mariela Antonakopoulou, UNESCO, France
Maud Berthelot, UNESCO, France
Patrycja Breskvar, UNESCO, France
Claire Marine Hugon, France
Hong Huynh, UNESCO, France
Runa Lindebjerg, GRID-Arendal, Norway
Barbara Kavuma Lwanga, UNESCO, France
Alexander Otte, UNESCO, France
Tina Schoolmeester, GRID-Arendal, Norway
Marco Vinaccia, GRID-Arendal, Norway

Layout
GRID-Arendal

Copy-editing
Strategic Agenda, London

Front cover photo: iStock/Bartosz Hadyniak
Back cover photo: California Department of Water Resources

Publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France et GRID-Arendal, P.O. Box 183, N-4802 Arendal, Norvège

© UNESCO et GRID-Arendal, 2019

UNESCO ISBN 978-92-3-100353-0
GRID-Arendal ISBN 978-82-7701-191-2

Œuvre publiée en libre accès sous la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/). Les utilisateurs du contenu de la présente publication acceptent les termes d'utilisation de l'Archive ouverte de libre accès UNESCO (www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-fr).

Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO ni de GRID-Arendal aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les idées et les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs; elles ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'UNESCO ni de GRID-Arendal et n'engagent en aucune façon ces organisations.

Flanders
State of the Art

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
International Hydrological Programme

Citation recommandée:
Gjerdi, H. L., Gunn, T., Mishra, A., Pulwarty, R. S. and Sheffield, J. 2019. *Droughts in the Anthropocene/Les sécheresses dans l'Anthropocène*. UNESCO and GRID-Arendal.

Auteurs
Hanna Lønning Gjerdi, GRID-Arendal, Norvège
Tobias Gunn, GRID-Arendal, Norvège
Anil Mishra, UNESCO, France
Roger S. Pulwarty, NOAA, États-Unis
Justin Sheffield, Université de Southampton, Royaume-Uni

Contributeurs et relecteurs de contenus
Wyatt Arnold, California Department of Water Resources, États-Unis
Steve Darby, Université de Southampton, Royaume-Uni
Guy Debonnet, UNESCO WHC, France
Harry Dixon, Centre for Ecology & Hydrology, Royaume-Uni
Miguel Doria, UNESCO, Uruguayz
David Farrell, Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology, Barbados
Renée Gift, UNESCO, France
Verónica González, UNESCO LINKS, France
Jamie Hannaford, Centre for Ecology & Hydrology, Royaume-Uni
Charlotte Hipkiss, Université de Southampton, Royaume-Uni
Adelaide Hitchings, Université de Southampton, Royaume-Uni
Craig Hutton, Université de Southampton, Royaume-Uni
Lisa Hymas, GRID-Arendal, Norvège
Hindou Oumarou Ibrahim, AFPAT, Tchad
Feng Jing, UNESCO WHC, France
Kasper Johansen, KAUST, Arabie saoudite
Akmal Karimov, TIIAME, Ouzbékistan
Bakhtiyor Karimov, TIIAME, Ouzbékistan
Waldo Lavado, Peruvian National Service of Meteorology and Hydrology, Pérou
Jessica Lawson, États-Unis
Roland Lin, UNESCO WHC, France
William S. Logan, ICIWaRM, US Army Corps of Engineers, États-Unis
Romani Maendly, California Department of Water Resources, États-Unis
Gabriel Mancilla, CAZALAC, Chili
Matt McCabe, KAUST, Arabie saoudite
Mizuki Murai, Programme du patrimoine mondial de l'UICN, Royaume-Uni
Akane Nakamura, UNESCO WHC, France
Siri Olsson, GRID-Arendal, Norvège
Jean-Marie Kileshye Onema, Université de Witwatersrand, South Africa
Jayakumar Ramasamy, UNESCO, Kenya
Steven Robins, Université de Stellenbosch, Afrique du Sud
Abdulkhakim Salokhiddinov, TIIAME, Ouzbékistan
David Sear, Université de Southampton, Royaume-Uni
Vadim Sokolov, IFAS, Ouzbékistan
Astrid Vannoppen, Belgique
Koen Verbist, UNESCO, Zimbabwe
Omogbemi Omoloju Yaya, RC-IRBM, National Water Resources Institute, Nigeria

Autres contributions
Mariela Antonakopoulou, UNESCO, France
Maud Berthelot, UNESCO, France
Patrycja Breskvar, UNESCO, France
Claire-Marine Hugon, France
Hong Huynh, UNESCO, France
Runa Lindebjerg, GRID-Arendal, Norvège
Barbara Kavuma Lwanga, UNESCO, France
Alexander Otte, UNESCO, France
Tina Schoolmeester, GRID-Arendal, Norway
Marco Vinaccia, GRID-Arendal, Norvège

Conception
GRID-Arendal

Traduction et révision
Strategic Agenda, London

Photo de couverture : iStock/Bartosz Hadyniak
Photo en quatrième de couverture : California Department of Water Resources

TABLE OF CONTENTS

Introduction	8
Cape Town – Countdown to Day Zero and the way forward	10
Lake Chad – Tackling drought through cooperation	14
Sub-Saharan Africa – Knowledge to overcome water and food challenges	18
Zambia – Managing multiple objectives in a changing environment	22
Morocco – Harvesting fog in the mountains	26
Saudi Arabia – Sustainable solutions for making the desert bloom	30
Aral Sea – Conserving and rehabilitating a lost sea	34
Keoladeo National Park – A World Heritage site threatened by drought	38
Marshall Islands –Addressing water scarcity in a changing climate	42
Vietnam – The impact of drought in the Lower Mekong	46
California – Mitigating the socioeconomic impacts of drought	50
United Kingdom – Understanding the complexities of drought	54
The Caribbean – Navigating through changing risks	58
Chile – The Mega Drought	62
Peru – Diverse landscapes and monitoring challenges	66
References	70
Photo credits	74

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	9
Le Cap – Compte à rebours avant le « jour zéro » : quelles solutions ?	13
Lac Tchad – Un travail collaboratif pour combattre la sécheresse	17
Afrique subsaharienne – Les connaissances comme solutions aux problèmes hydriques et alimentaires	21
Zambie – Gérer des objectifs multiples dans un environnement en évolution	25
Maroc – Recueillir l'eau du brouillard dans les montagnes	29
Arabie saoudite – Des solutions durables pour cultiver le désert	33
Mer d'Aral – Conserver et restaurer une mer disparue	37
Parc national de Keoladeo – Un patrimoine mondial menacé d'assèchement	41
Îles Marshall – Faire face à la pénurie d'eau dans une période de changement climatique	45
Viet Nam – Les effets de la sécheresse dans le Bas-Mékong	49
Californie – Atténuer les conséquences socioéconomiques de la sécheresse	53
Royaume-Uni – Comprendre les complexités de la sécheresse	57
Caraïbes – Composer avec des risques changeants	61
Chili – Une sécheresse sans précédent	65
Pérou – Des paysages variés pour un suivi complexe	69
Bibliographie	70
Crédits photo	74

Introduction

Droughts are slow-onset natural hazards that can last from a few months to decades and affect anything from small watersheds to hundreds of thousands of square kilometres. In addition to their direct impacts on water resources, agriculture and ecosystems, droughts are potential catalysts for fires, heatwaves and invasive incursions, thereby creating multi-hazard environments and furthering the impact on and vulnerability of ecosystems and societies. Though droughts are natural events, there is an increasing understanding of how humans have amplified their severity and worsened their effects on both the environment and human populations. Humans have altered both meteorological droughts through human-induced climate change and hydrological droughts through management of water movement and processes within a landscape, such as by diverting rivers or changing land use. In the Anthropocene (the ongoing period in which humans are the dominant influence on climate and the environment), droughts are closely entwined with human actions, cultures and responses.

Droughts affect economies (causing economic damage in the range of tens of billions of US$ each year) as well as ecosystems and societies, particularly in arid and subtropical regions and in developing countries. Between 1995 and 2015, drought-related natural disasters affected 1.1 billion people and caused about 22,000 fatalities [1]. Women and girls are typically the hardest affected by drought due to gender inequalities, unequal power distribution and limited control over resources, making them even more vulnerable to drought impacts.

Addressing water scarcity in transboundary basins is a complex challenge: climate change and human influences put pressure on freshwater supplies, while lakes and rivers that cross international borders require coordinated interventions that take into consideration the basin as a whole. Droughts in the Anthropocene will therefore require us to take new approaches and share knowledge to find sustainable solutions. To mitigate the effects of droughts, we must increase human and institutional capacity, provide access to relevant early warning information that supports decision-making and completes the 'last mile' in communication and response, identify vulnerable communities and integrate these components into proactive drought management policies [2].

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) has been involved in water management and science for over 70 years, supporting research, capacity-building and management of water resources. Between 1948 and 1964, the Arid Zone Initiatives helped draw attention to the importance of hydrology and water management within arid landscapes. The following International Hydrological Decade of 1965–1974 enabled significant progress at the regional level in terms of research, training, capacity-building and hydrological investigations, which laid the foundation for the establishment of the International Hydrological Programme (IHP) in 1975. This programme gave UNESCO a more active role across the global, regional and local levels of governance to enhance water sustainability. Since its establishment, IHP has expanded through initiatives, associated programmes and the development of regional and global centres and focal points with UNESCO chairs. IHP's activities, as well as its initiatives such as the Global Network on Water and Development Information for Arid Lands (G-WADI) and the International Drought Initiative (IDI), continue to support countries in identifying and addressing drought management gaps and needs by strengthening global, regional and local capacities to manage water resources and by providing access to data and policy recommendations to ensure more integrated drought management. Furthermore, IHP's From Potential Conflict to Cooperation Potential (PCCP) initiative aims to promote the collaborative and sustainable management of transboundary waters as a means of enabling peace and water security.

This publication has been produced as part of the digital interactive exhibition Droughts in the Anthropocene, prepared for the fortieth session of the UNESCO General Conference, and for the UNFCCC COP 25. The exhibition uses a number of case studies from around the world to showcase the social, environmental and cultural impacts of droughts and water scarcity. It highlights solutions offered by collaboration between scientists and local communities, and the important work of IHP and partners in bridging science with society and policymakers to better address the impact of droughts. The exhibition also features youth action on climate change and the work of young water scientists and professionals. In preparation for the exhibition, young scientists have helped compile case studies and been involved in developing an interactive web-based platform that provides real-time forecast information on weather and drought conditions. This publication and the exhibition are the result of the work of UNESCO IHP in partnership with GRID-Arendal, the University of Southampton and the U.S. National Integrated Drought Information System (NIDIS).

Introduction

Les sécheresses sont des aléas naturels à évolution lente qui peuvent durer de quelques mois à plusieurs décennies et toucher des étendues plus ou moins importantes, qu'il s'agisse de petits bassins versants ou de surfaces de centaines de milliers de kilomètres carrés. Outre leurs effets directs sur les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes, les sécheresses peuvent provoquer des incendies et des canicules et favoriser les proliférations d'espèces envahissantes, créant des environnements aux risques multiples, aggravant les conséquences sur les écosystèmes et les sociétés et accentuant leur vulnérabilité. Bien qu'il s'agisse de phénomènes naturels, on comprend de mieux en mieux comment l'homme a accru la gravité et les effets des sécheresses à la fois sur l'environnement et sur les populations humaines. L'homme influence les sécheresses météorologiques et hydrologiques respectivement par son action sur le changement climatique et par sa gestion des flux et des processus hydriques à l'échelle paysagère, par exemple en détournant les cours d'eau ou en modifiant l'utilisation des terres. À l'Anthropocène (période actuelle où l'homme exerce une influence dominante sur le climat et l'environnement), les sécheresses sont étroitement liées aux activités, aux cultures et aux réactions humaines.

Les sécheresses touchent les économies (entraînant des dommages qui se chiffrent à plusieurs dizaines de milliards de dollars chaque année) mais également les écosystèmes et les sociétés, en particulier dans les régions arides et subtropicales et dans les pays en développement. Entre 1995 et 2015, les catastrophes naturelles liées à la sécheresse ont frappé 1,1 milliard de personnes et ont fait 22 000 morts [1]. Les femmes et les filles sont souvent les plus durement touchées par les sécheresses, les inégalités entre les sexes, la répartition inéquitable du pouvoir et le contrôle limité des ressources les rendant encore plus vulnérables aux effets de ce phénomène.

Pallier la pénurie d'eau dans les bassins transfrontaliers est un défi complexe : d'un côté, le changement climatique et les influences humaines exercent des pressions sur les réserves d'eau douce ; de l'autre côté, les lacs et les rivières qui traversent les frontières internationales exigent la mise en œuvre d'interventions coordonnées qui prennent en considération les bassins dans leur ensemble. Par conséquent, la lutte contre les sécheresses à l'ère de l'Anthropocène exige l'adoption de nouvelles approches et la mise en commun des connaissances pour trouver des solutions durables. Afin d'atténuer les effets des sécheresses, il est important de prendre les mesures suivantes : renforcer les capacités humaines et institutionnelles, assurer l'accès aux informations pertinentes d'alerte rapide qui aident à la prise de décisions et permettent aux communications et aux interventions d'atteindre le « dernier kilomètre », recenser les communautés vulnérables, et intégrer l'ensemble de ces composantes dans des politiques proactives de gestion de la sécheresse [2].

L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) œuvre dans les domaines de la gestion de l'eau et de l'hydrologie depuis plus de 70 ans en soutenant la recherche, le renforcement de capacités, et la gestion des ressources en eau. Entre 1948 et 1964, les Initiatives sur les zones arides ont permis d'attirer l'attention sur l'importance de la recherche hydrologique et de la gestion de l'eau dans les paysages arides. La Décennie hydrologique internationale qui a suivi (1965-1974) a permis des avancées considérables au niveau régional en matière de recherche, de formation, de renforcement des capacités et d'études hydrologiques, posant les fondations du Programme hydrologique international (PHI) lancé en 1975. Ce programme a donné à l'UNESCO un rôle plus actif aux différents niveaux de gouvernance (mondial, régional et local), en vue d'accroître la durabilité des ressources en eau. Depuis sa création, le PHI a élargi son champ d'action grâce à des initiatives et à des programmes associés, et en instaurant des centres mondiaux et régionaux ainsi que des points focaux en collaboration avec les chaires UNESCO. Par l'intermédiaire de son programme principal et de ses initiatives telles que le Réseau mondial d'information sur l'eau et le développement dans les zones arides (G-WADI) ou l'Initiative internationale sur la sécheresse (IDI), le PHI continue d'aider les pays à recenser et à combler les lacunes et les besoins en matière de gestion de la sécheresse, d'une part en renforçant les capacités de gestion des ressources en eau aux niveaux mondial, régional et local et, d'autre part, en fournissant un accès aux données et aux recommandations stratégiques visant à mieux intégrer la gestion de la sécheresse. Parallèlement à ces initiatives, le PHI mène le programme « Du conflit potentiel au potentiel de coopération » (PCCP), qui vise à promouvoir une gestion collaborative et durable des eaux transfrontières afin d'assurer la paix et la sécurité hydrique.

Ce document a été élaboré dans le cadre de l'exposition numérique interactive intitulée Les sécheresses dans l'Anthropocène, organisée à l'occasion de la quarantième session de la Conférence générale de l'UNESCO et de la 25e Conférence des États parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC). L'exposition présente plusieurs études de cas provenant du monde entier qui visent à montrer les effets sociaux, environnementaux et culturels des sécheresses et de la pénurie d'eau. Elle met en avant les solutions issues de la collaboration entre les scientifiques et les communautés locales, ainsi que les actions majeures menées par l'UNESCO-PHI afin de rapprocher la science de la société et des décideurs, en vue de combattre plus efficacement les effets des sécheresses. L'exposition présente également les initiatives menées par la jeunesse afin de lutter contre le changement climatique, ainsi que les travaux de jeunes hydrologues et professionnels de l'eau. En préparation de l'exposition, de jeunes chercheurs ont aidé à rassembler les études de cas et ont participé à la conception d'une plateforme en ligne interactive donnant des prévisions en temps réel sur les conditions météorologiques et la sécheresse. Cette publication et l'exposition qui lui est associée sont le fruit du travail réalisé par l'UNESCO-PHI en partenariat avec GRID-Arendal, l'Université de Southampton et le National Integrated Drought Information System (NIDIS) des États-Unis.

Cape Town – Countdown to Day Zero and the way forward

In 2018, the world watched as Cape Town, South Africa's second largest city, edged towards becoming the first major city to run out of water. Three consecutive years of low rainfall starting in 2015 had led to one of the worst droughts in Cape Town's history. Water use outstripped the rate of replenishment in the reservoirs behind Cape Town's six dams, causing the capacity to rapidly decline from 97 per cent in 2014 [1] to just 21 per cent in 2018 [2]. Facing a complete collapse of its water system, the city introduced a countdown to Day Zero, the day when dam water reserves would hit just 13.5 per cent capacity [3]. Day Zero would trigger the restriction of water to only critical services, causing the taps of just over 4 million residents to run dry [3]. The drought affected the everyday lives of Cape Town's residents, including schooling, recreation and Government services, and caused large disruptions to agriculture, industry and tourism, resulting in a considerable loss of jobs.

Impacts of climate change, rapid population growth and a comparatively high water consumption rate within Cape Town left the city exposed to the effects of drought. Two years before the crisis, officials had declared there was no need to increase water supplies until 2020, a decision made at a time when the reservoirs were at full capacity after receiving the highest rainfall in decades [1]. The failure to implement adequate responses to curb water consumption in the early stages of the drought was a core factor that led to the crisis. The failure to diversify Cape Town's water supply made the city particularly vulnerable to droughts, as it relied on surface water run-off from rain for 95 per cent of its water needs [4]. Climate change is increasing this vulnerability as rainfall has been declining and temperatures have been rising in the region, resulting in the likelihood of drought tripling [5].

The drought brought to light existing inequalities, which some water crisis management strategies exacerbated. If Day Zero had been reached, residents of Cape Town would have been required to collect their 25-litre allocation of water per day from one of 200 planned distribution points throughout the city [6]. But for the tens of thousands of residents in informal settlements, Day Zero would have had little impact; they were already living in a constant state of water crisis. Residents within informal settlements account for 13.5 per cent of Cape Town's population [7], but only use 4.7 per cent of the city's water, compared with wealthier areas which consume over 70 per cent [8]. As the crisis evolved, further burdens were placed on poorer populations via the fitting of water management devices, removal of free water allocations and tariff increases. In contrast, among rich populations the drilling of private bore holes rapidly increased, as they had the financial means to adapt.

Ultimately, Cape Town was able to avoid a complete failure of its water systems by drastically reducing water consumption. Throughout the Day Zero countdown, officials communicated with the public about dam levels, consumption rates and the importance of water-conserving behaviours. In the most acute stages of the drought, water was restricted to just 50 litres per person [9]. Agricultural water use was also restricted. An overall reduction in water use was achieved through a broad range of measures including restrictions, improved monitoring, education, communication and the improvement of water infrastructure and management. These water-saving interventions were highly effective: the city's average daily consumption dropped from 1,200 ML (million litres) in 2015 to just 500 ML in 2018 [9]. Conserving existing supplies allowed time for new supplies to be added through desalination plants, water recycling and increasing groundwater extraction. The crisis was finally ended by rainfall that replenished reservoir levels.

IHP and partners organized a training workshop on Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) in Cape Town in May 2019, in collaboration with the Alliance for Global Water Adaptation (AGWA), the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Deltares, the Dutch Ministry of Water and Infrastructure and the International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) [10]. The workshop trained key stakeholders on the different aspects of the CRIDA approach and identified potential case studies and causes of the crisis faced by Cape Town.







Decreasing water levels in the Theewaterskloof Dam.

Diminution des niveaux d'eau dans le barrage de Theewaterskloof.

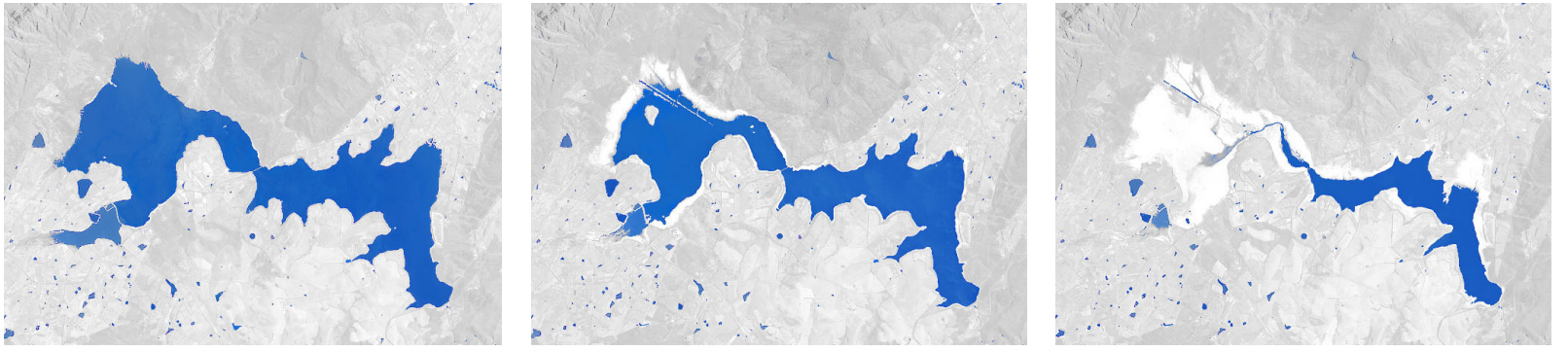


Many people of Cape Town collected water from natural springs daily during the drought crisis.

De nombreux habitants du Cap recueillaient quotidiennement l'eau des sources naturelles pendant la crise de la sécheresse.

Water levels in Theewaterskloof Dam (2014, 2016 and 2018).

Niveaux d'eau dans le barrage de Theewaterskloof (2014, 2016 et 2018).



Le Cap – Compte à rebours avant le « jour zéro » : quelles solutions ?

2018 : Le Cap, la deuxième ville d'Afrique du Sud, est sur le point de devenir, sous les yeux du monde entier, la première grande ville à connaître une pénurie d'eau. Trois années consécutives de faibles précipitations depuis 2015 ont placé la ville face à l'une des pires sécheresses de son histoire. La consommation d'eau a dépassé le rythme de réalimentation des réservoirs situés en amont des six barrages du Cap, entraînant une diminution rapide des réserves d'eau utilisables, passées de 97 % en 2014 [1] à tout juste 21 % en 2018 [2]. Face à l'effondrement complet de son système d'approvisionnement en eau, la ville a lancé un compte à rebours jusqu'au « jour zéro », date à laquelle le niveau d'eau des barrages aura atteint 13,5 % de leur capacité [3]. Des restrictions seraient alors imposées, l'eau serait exclusivement réservée aux services essentiels, et un peu plus de quatre millions d'habitants se retrouveraient avec des robinets à sec [3]. La sécheresse a influé sur la vie quotidienne des habitants du Cap (écoles, loisirs et services publics) et a fortement perturbé l'activité agricole, industrielle et touristique, provoquant de nombreuses pertes d'emplois.

Les effets du changement climatique, une croissance démographique rapide et une consommation d'eau comparativement plus élevée ont rendu la ville plus vulnérable aux conséquences de la sécheresse. Deux ans avant la crise, les autorités ont déclaré qu'il n'était pas nécessaire d'accroître les approvisionnements en eau d'ici à 2020, une décision prise alors que les réservoirs étaient à leur pleine capacité après les plus fortes précipitations enregistrées depuis des décennies [1]. L'incapacité des pouvoirs publics à mettre en œuvre des réponses adaptées afin de réduire la consommation d'eau dès les premiers stades de la sécheresse est l'un des facteurs majeurs ayant conduit à cette crise. L'absence de diversification de l'approvisionnement en eau a rendu la ville particulièrement vulnérable aux sécheresses, 95 % de ses ressources hydriques provenant du ruissellement des eaux de surface [4]. Cette vulnérabilité s'accentue sous les effets du changement climatique que connaît la région (baisse des précipitations et hausse des températures), multipliant par trois le risque de sécheresse [5].

La sécheresse a mis en lumière les inégalités existantes, que certaines stratégies de gestion de l'eau ont contribué à accentuer. Si le « jour zéro » arrive, les habitants du Cap devront aller retirer leur ration d'eau quotidienne de 25 litres dans l'un des 200 points de distribution de la ville prévus à cet effet [6]. Mais, pour les dizaines de milliers d'habitants qui vivent dans les quartiers informels de la ville, le « jour zéro » ne changerait pas grand-chose ; pour eux, la crise de l'eau est permanente. Ces habitants représentent 13,5 % de la population de la ville [7] mais seulement 4,7 % de la consommation d'eau de la ville, laquelle s'élève à plus de 70 % dans les quartiers plus riches [8]. À mesure que la crise a progressé, les pressions se sont accrues sur les populations les plus démunies, qui ont assisté à l'installation de dispositifs de gestion de l'eau, à la suppression des points de distribution d'eau gratuite et à une augmentation du prix des services de l'eau. À l'inverse, les forages de puits privés ont connu une augmentation rapide parmi les populations aisées, qui avaient les moyens financiers de s'adapter.

En fin de compte, la ville est parvenue à éviter la faillite totale de son système d'approvisionnement en eau grâce à une réduction massive de sa consommation d'eau. Tout au long du compte à rebours vers le « jour zéro », les autorités ont informé le public du niveau des barrages et des taux de consommation, et ont sensibilisé la population à l'importance d'adopter des comportements économes en eau. Pendant les épisodes les plus aigus de la sécheresse, la consommation d'eau s'est limitée à 50 litres par jour et par personne [9]. L'utilisation d'eau à des fins agricoles faisait également l'objet de restrictions. La ville a pu réduire globalement sa consommation d'eau en mettant en place un large éventail de mesures (restrictions, renforcement du suivi, sensibilisation, communication, amélioration des infrastructures et de la gestion de l'approvisionnement en eau, etc.). Ces interventions destinées à favoriser les économies d'eau se sont révélées très efficaces : la consommation moyenne de la ville est passée de 1,2 milliard de litres par jour en 2015 à 500 millions seulement en 2018 [9]. La conservation des réserves existantes a laissé le temps d'en constituer de nouvelles grâce à des stations de dessalement, au recyclage de l'eau et à l'extraction accrue des eaux souterraines. La crise a pris fin avec l'arrivée des précipitations qui ont restauré les niveaux d'eau.

Le PHI et ses partenaires ont organisé un atelier de formation sur l'Analyse de décision fondée sur les risques climatiques (CRIDA) au Cap en mai 2019, en collaboration avec Alliance for Global Water Adaptation (AGWA), le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis (USACE), l'institut Deltares, le ministère de l'Infrastructure et de la Gestion de l'eau des Pays-Bas et le Centre international pour la gestion intégrée des ressources en eau (ICIWaRM) [10]. Cet atelier a permis de former les principales parties prenantes aux différents aspects de l'approche CRIDA, de recenser d'éventuelles études de cas et de déterminer les causes potentielles à l'origine de la crise traversée par la ville du Cap.

Lake Chad – Tackling drought through cooperation

Lake Chad is a productive yet fragile ecosystem of vital importance to the bordering countries of Cameroon, Nigeria, Niger and Chad, as close to 30 million people's livelihoods rely on it [1]. The region is highly impoverished and increasingly vulnerable, with extremely high population growth, land degradation, pollution and conflict further straining the region's resources and management. Lake Chad's rapid decline, from a 22,000 km^2 expanse in the 1960s to just 1,700 km^2 in 1985 [2], became a symbol of environmental deterioration. The idea that Lake Chad was disappearing due to human disturbance (for example, through irrigation) or climate change became a scientific and popular belief [3]. However, neither of these factors played a significant role; rather, the lake's decline was primarily caused by two prolonged droughts in the 1970s and 1980s that ended a wet period of peak water levels [4].

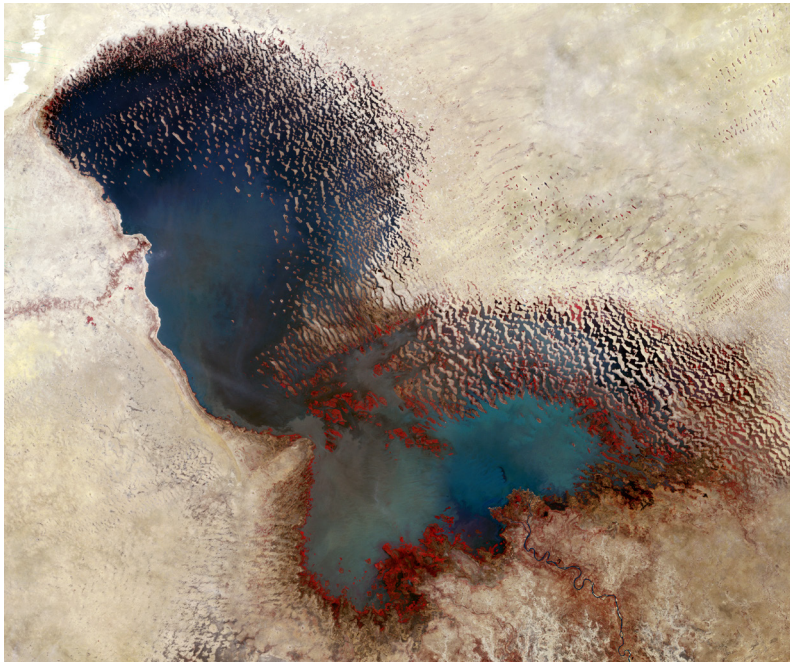
The profound and unexpected change in the lake had a devastating socioeconomic and environmental impact in the surrounding countries. The droughts played a fundamental role in the development of resource use in the Lake Chad Basin. Large internal migrations occurred towards Lake Chad as crops failed and water scarcity increased. The population around the lake tripled from just 700,000 in 1973 to 2.2 million today [5] and, without sustainable agricultural developments to support it, increased pressure on the decreasing resources. Resource conflict arose out of tensions among different communities and countries, which challenged resource management and development [5]. The changes in the size of Lake Chad over time are both considerable and continuous, however the average size has remained stable at approximately 8,000 km^2 since 2000 [2]. Although the 'trend to disappearance' has not materialized, development challenges and drought continue to threaten to tip the region's acute vulnerability into crisis.

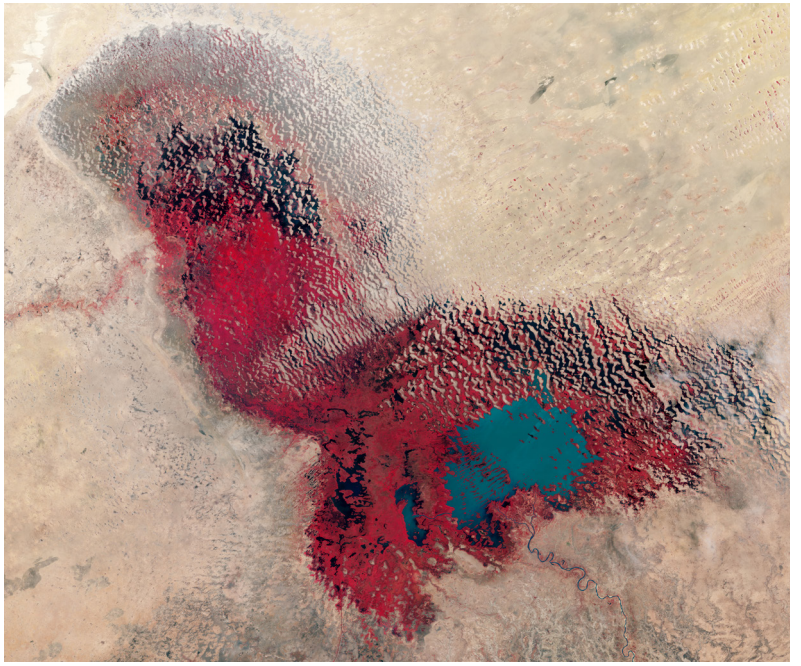
The shallow nature of the lake means that its surface area frequently changes between wet and dry seasons, as well as shrinking or expanding for prolonged periods. Communities have long adapted to these seasonal changes by transitioning from fishing in the wet season to livestock herding or planting crops as the water retreats [2]. The lake's variability poses challenges to both development and food security, and long-term changes in the lake's surface extent will affect the viability of certain livelihoods. Therefore, monitoring and early warning of hydrological conditions would support actions to mitigate and adapt to climatic shocks such as droughts.

To promote sustainable development for reconciliation and peace in the Lake Chad region, UNESCO developed a multisectoral and multidisciplinary response through the project BIOsphere and Heritage of Lake Chad (BIOPALT) implemented in Cameroon, Central African Republic, Chad, Niger and Nigeria. The regional flood and drought monitoring system developed by Princeton University, University of Southampton and Princeton Climate Analytics in collaboration with IHP for the Lake Chad Basin is a critical tool to support the management of resources and further understand the hydrological dynamics. The system's use of remotely sensed data from satellites addresses the very limited and unreliable ground monitoring network that inhibits the provision of accurate information and timely predictions. The system provides close to real-time information on both droughts and floods affecting the surface extent of Lake Chad. Furthermore, it provides short-term to seasonal forecasts, enabling decisions to be made on the management of resources and risks.

Such information is important in dynamic systems such as Lake Chad as it can better inform communities about the situation they are facing, enabling them to adapt to it and mitigate its effects. The transboundary nature of the monitoring system allows for open information-sharing between the surrounding countries, which is currently limited but crucial to understanding the potential implications of new dams or irrigation projects. The monitoring system is also important for understanding the effects of climate change in the region. The ability to monitor changes over time will be important in confirming reports of changes in the intensity and timing of weather events. In partnership with the Local and Indigenous Knowledge Systems (LINKS) programme, the Association des Femmes Peules Autochtones du Tchad [Association of Fulani Women and Indigenous Peoples of Chad, AFPAT] has carried out community research with Fulani M'Bororo indigenous pastoralists. Due to the lake's crucial role in their livelihoods, pastoralists have developed detailed knowledge about its ecology and hydrology. Held in collective memory and passed down through oral histories, this knowledge enables complex assessments of the lake's condition and resources to be made. The inclusion of this knowledge in monitoring systems can provide localized data and historical context to both projections and real-time information. Furthermore, it can increase the usefulness of the monitoring systems by collecting information that connects climatic and hydrological events to their influence on social, cultural and economic well-being.







Lake Chad, changes in water extent between 1973 and 2017.

Évolution de la superficie des eaux du lac Tchad, entre 1973 et 2017.



Boats on the shore of Lake Chad.

Bateaux sur les rives du lac Tchad.

Lac Tchad – Un travail collaboratif pour combattre la sécheresse

Le lac Tchad est un écosystème productif mais fragile d'une importance capitale pour les pays limitrophes (Cameroun, Nigéria, Niger et Tchad), car il fournit des moyens de subsistance à près de 30 millions de personnes [1]. La région est extrêmement pauvre et de plus en plus vulnérable ; explosion démographique, dégradation des terres, pollution et conflits accroissent les contraintes exercées sur les ressources de la région et leur gestion. La diminution rapide de la superficie du lac Tchad, passée de 22 000 km^2 dans les années 1960 à 1 700 km^2 à peine en 1985 [2], est devenue un symbole de la dégradation de l'environnement. L'idée selon laquelle la disparition du lac Tchad serait le résultat de perturbations anthropiques telles que l'irrigation ou de changement climatique s'est répandue parmi la communauté scientifique et le grand public [3]. Toutefois, aucun de ces facteurs n'a joué de rôle déterminant. La disparition du lac serait essentiellement due à deux sécheresses prolongées qui se sont produites dans les années 1970 et 1980, mettant fin à une période humide où les niveaux d'eau étaient au plus haut [4].

La transformation profonde et imprévue du lac a eu des effets dévastateurs sur la société, l'économie et l'environnement des pays environnants. Les sécheresses ont joué un rôle fondamental dans l'évolution de l'utilisation des ressources du bassin du lac Tchad. D'importantes migrations internes ont eu lieu vers le lac en raison de mauvaises récoltes et de l'aggravation de la pénurie d'eau. La population autour du lac a ainsi triplé, passant de 700 000 habitants en 1973 à 2,2 millions à ce jour [5]. Faute d'évolutions agricoles durables permettant de subvenir aux besoins de cette population, la pression s'est accrue sur des ressources qui s'épuisaient déjà. Les tensions entre différents pays et communautés ont donné lieu à des conflits liés aux ressources qui ont entravé la gestion et l'accroissement de ces dernières [5]. Les variations de superficie du lac Tchad dans le temps s'inscrivent dans un processus constant et de grande ampleur ; toutefois sa superficie moyenne s'est stabilisée autour de 8 000 km^2 depuis 2000 [2]. Bien que ce « phénomène de disparition » ne se soit pas encore matérialisé, les problèmes de développement et les sécheresses menacent toujours de faire passer la région d'une situation de vulnérabilité aiguë à un état de crise.

La faible profondeur du lac provoque des variations fréquentes de sa surface entre la saison humide et la saison sèche, et entraîne son rétrécissement ou son agrandissement pendant de longues périodes. Les communautés se sont depuis longtemps adaptées à ces changements saisonniers, passant de la pêche durant la saison humide à l'élevage ou à l'agriculture lorsque l'eau se retire [2]. La variabilité du lac pose des difficultés à la fois sur le plan du développement et de la sécurité alimentaire, et la transformation à long terme de sa surface mettra en péril la viabilité de certains moyens de subsistance. Par conséquent, le suivi des conditions hydrologiques et l'alerte rapide en cas d'évolution de ces dernières pourraient appuyer les actions destinées à atténuer les chocs climatiques tels que les sécheresses et à s'y adapter.

Afin de promouvoir le développement durable aux fins de réconciliation et de paix dans la région du lac Tchad, l'UNESCO a conçu une intervention multisectorielle et multidisciplinaire dans le cadre du projet BIOsphère et PAtrimoine du Lac Tchad (BIOPALT) mis en œuvre au Cameroun, en République centrafricaine, au Tchad, au Niger et au Nigéria. Le système de suivi régional des inondations et des sécheresses, élaboré par l'Université de Princeton, l'Université de Southampton et Princeton Climate Analytics en collaboration avec le PHI pour le bassin du lac Tchad, est un outil essentiel d'appui à la gestion des ressources et permet une meilleure compréhension des dynamiques hydrologiques. Pour pallier l'insuffisance et le manque de fiabilité du réseau de surveillance des sols qui font obstacle à l'obtention d'informations précises et de prévisions actualisées, ce système utilise des données satellitaires obtenues par télédétection. Il fournit des informations en temps quasi réel sur les sécheresses et les inondations qui modifient la surface du lac Tchad. En outre, il offre des prévisions à court terme ou saisonnières afin de permettre la prise de décisions concernant la gestion des ressources et des risques.

Ces informations sont essentielles dans des systèmes dynamiques tels que le lac Tchad, car elles permettent de mieux informer les communautés sur la situation actuelle, leur donnant ainsi la possibilité de s'adapter afin d'en réduire les effets. La nature transfrontière du système de suivi permet un partage ouvert de l'information entre pays voisins, ces interactions étant actuellement limitées mais indispensables pour cerner les répercussions potentielles de nouveaux projets de barrage ou d'irrigation. Le système de suivi joue également un rôle important dans la compréhension des effets du changement climatique sur la région. La capacité à surveiller l'évolution du lac dans le temps sera fondamentale pour confirmer les signalements de changements d'intensité et de période des événements climatiques. En partenariat avec le programme Systèmes de savoirs locaux et autochtones (LINKS), l'Association des Femmes Peules Autochtones du Tchad (AFPAT) a mené des recherches communautaires avec les pasteurs autochtones du peuple peul MBororo. Compte tenu de l'importance cruciale du lac dans leurs moyens de subsistance, ces pasteurs ont acquis une connaissance approfondie de son écologie et de son hydrologie. Conservées dans la mémoire collective et transmises au moyen de récits oraux, ces connaissances permettent de réaliser des évaluations complexes de l'état et des ressources du lac. L'intégration de ces connaissances aux systèmes de suivi peut aider à fournir des données localisées et un contexte historique qui permettront de produire des projections et des informations en temps réel. Par ailleurs, ces savoirs peuvent renforcer l'utilité des systèmes de suivi car ils permettent d'établir un lien entre les événements climatiques et hydrologiques et leur influence sur le bien-être social, culturel et économique.

Sub-Saharan Africa – Knowledge to overcome water and food challenges

In the sub-Saharan African countries of Ghana, Kenya and Malawi, people's access to food and water is severely affected by climate variability. The most vulnerable groups in society, whose livelihoods are dependent on pastoralism or subsistence farming in semi-arid and arid regions, are often acutely affected. Water-related disasters can perpetuate the cycle of poverty, and droughts are a central driver of both famine and malnutrition in sub-Saharan Africa [1], and an inhibiting factor to economic growth and development [2]. Pressures from climate change, land degradation and increasing populations converge to create local, national and regional challenges to water and food security.

Although there is a need to assess water resources and how they relate to agricultural production and the resilience of local communities, local research and data have been scarce. A collaborative project is working to fill this gap. Called Building Research Capacity for Sustainable Water and Food Security in Drylands of sub-Saharan Africa (BRECcIA), it is supported by the United Kingdom (UK) Government through its Global Challenges Research Fund (GCRF) and led by the University of Southampton, in coordination with IHP [3]. The four-year project seeks to understand the dynamic relationships between food production, dryland water variability and policies, and how this can inform resilience and adaptation opportunities. It aims to build research capacity in local institutions, especially among early-career researchers, focusing on informing policies to improve food and water security for the poorest within society.

BRECcIA is based on a locally driven interdisciplinary approach, involving 52 researchers in five research teams [4]. The research starts with stakeholder engagement to help identify specific research questions that are important to decision makers, communities and those experiencing the impact of climate change. Once research questions have been identified, small research projects are designed by interdisciplinary teams working closely with stakeholders so that the user perspective is kept central. In some cases, stakeholders even join these project teams to form partnerships with academic institutes, strengthen existing links and create new ones.

The project is being implemented across several sites, drawing on indigenous and local knowledge to identify challenges and inform solutions. The research combines institutional and legal reviews, focus groups, hydrological mapping, biophysical assessments and interviews with key informants of policymakers and community leaders. The analysis will be used to identify capacity gaps that have resulted in low adaptive ability and resilience in the area. Examples of specific projects include the use of drones to assess small-scale irrigated cropland in southern Malawi, where high spatial resolution satellite images are used to classify agricultural areas and land-use types [5]. Understanding how agricultural land use is changing is necessary in order to understand food security and using this type of data can bridge the knowledge gap in Ghana, Kenya and Malawi. BRECcIA is also working with IHP to understand the potential of rainwater harvesting for addressing water scarcity in some regions. UNESCO's Rainwater Harvesting App developed in collaboration with several partners allows people to obtain information on how to collect rainwater and store it appropriately [6]. It also offers a rainwater calculator allowing people to estimate how much water they can harvest in a given geographical area [7]. The tool contains rainfall data for all the 54 African countries and is available in three languages: English, French and Kiswahili.

The overall approach and specific projects will have an impact on local communities through improved access to reliable information, increased capacity of local institutions, and connections to a network of partners. Ultimately, BRECcIA is focused on improving the lives of those in the most vulnerable communities, whose livelihoods depend on critical ecosystem services.



Massai Women carrying water in Kenya.

Femmes massaï transportant de l'eau (Kenya).





A herd of goats in the Kaisut Desert, Kenya.

Un troupeau de chèvres dans le désert de Kaisut (Kenya).



Young researchers collecting soils data on a smallholder farm in Malawi.

De jeunes chercheurs recueillent des données sur les sols dans une petite exploitation (Malawi).



Participatory mapping of resources in Malawi.

Cartographie participative des ressources au Malawi.

Afrique subsaharienne – Les connaissances comme solutions aux problèmes hydriques et alimentaires

Dans les trois pays d'Afrique subsaharienne que sont le Ghana, le Kenya et le Malawi, la variabilité du climat entrave fortement l'accès à la nourriture et à l'eau. Les groupes les plus vulnérables de la société, qui vivent du pastoralisme ou de l'agriculture de subsistance dans les régions semi-arides et arides, sont souvent gravement touchés. Les catastrophes liées à l'eau peuvent perpétuer le cycle de la pauvreté, et les sécheresses constituent un facteur majeur de famine et de malnutrition en Afrique subsaharienne [1], ainsi qu'un obstacle à la croissance économique et au développement [2]. Les pressions exercées par le changement climatique, la dégradation des terres et la croissance démographique concourent à créer des problèmes hydriques et alimentaires aux niveaux local, national et régional.

Bien qu'il soit nécessaire d'évaluer les ressources en eau et d'examiner leur relation avec la production agricole et la résilience des communautés locales, les études et les données locales sont peu nombreuses dans ce domaine. Un projet collaboratif est actuellement déployé pour pallier à cette insuffisance. Intitulé « Building REsearch Capacity for sustainable water and food security In drylands of sub-Saharan Africa » (BRECcIA), il est financé par le Global Challenges Research Fund (GCRF) du Royaume-Uni et dirigé par l'Université de Southampton, en coordination avec le PHI [3]. D'une durée de quatre ans, ce projet vise à comprendre les relations dynamiques entre la production alimentaire, la fluctuation des ressources en eau dans les zones arides et les politiques, et à déterminer comment ces éléments peuvent orienter les possibilités de résilience et d'adaptation. Il a également pour objectif de renforcer les capacités de recherche des institutions locales, notamment parmi les jeunes chercheurs, en vue d'étayer les politiques destinées à améliorer la sécurité alimentaire et hydrique des personnes les plus démunies.

Le projet BRECcIA repose sur une approche interdisciplinaire dirigée à l'échelle locale, et regroupe 52 chercheurs répartis en cinq équipes [4]. Pour commencer, les parties prenantes contribuent à définir les thèmes de recherche qui intéressent les décideurs, les communautés et les populations soumises aux effets du changement climatique. Une fois les sujets d'étude définis, les équipes interdisciplinaires élaborent des petits projets de recherche. Elles travaillent en lien étroit avec les parties prenantes, afin que le point de vue des usagers reste au cœur de leur démarche. Il arrive même que des parties prenantes rejoignent ces équipes de projet pour former des partenariats avec des établissements universitaires, consolider les liens existants ou en tisser de nouveaux.

Le projet est ensuite mis en œuvre dans différents sites, en s'appuyant sur les connaissances autochtones et locales pour repérer les difficultés et orienter les solutions. La recherche associe plusieurs éléments : analyses institutionnelles et juridiques, groupes de discussion, cartographie hydrologique, évaluations biophysiques et entretiens avec les informateurs clés parmi les décideurs et les responsables communautaires. L'étude ainsi réalisée permettra de mettre en évidence les lacunes à l'origine de la faible capacité d'adaptation et de résilience de la zone concernée. Par exemple, l'un de ces projets de recherche portait sur le recours à des drones afin d'analyser de petites surfaces agricoles irriguées situées au sud du Malawi, où les images satellitaires à haute résolution spatiale servent à classer les zones agricoles et les différents types d'utilisation des terres [5]. Il est nécessaire de comprendre comment évolue l'utilisation des terres pour mieux appréhender les problématiques liées à la sécurité alimentaire, c'est en cela que le recours à ce type de données peut combler le manque de connaissances au Ghana, au Kenya et au Malawi. Le projet BRECcIA intervient également dans le cadre d'une collaboration avec l'UNESCO-PHI afin de déterminer le potentiel qu'offre la collecte des eaux de pluie en matière de lutte contre la pénurie d'eau dans certaines régions. Ainsi, l'application « Récupération des eaux pluviales » développée par l'UNESCO avec la collaboration de différentes parties prenantes permet aux populations de se renseigner sur les moyens adaptés de collecte et de stockage des eaux pluviales [6]. Elle comprend en outre un calculateur d'eau de pluie qui permet d'estimer la quantité d'eau pouvant être prélevée dans une zone géographique donnée [7]. Cette application rassemble les données pluviométriques des 54 pays du continent africain et est disponible en trois langues : anglais, français et swahili.

L'approche globale et les projets mis en œuvre permettront d'obtenir des résultats en faveur des communautés locales : meilleur accès à des informations fiables, renforcement des capacités des institutions locales, et mise en relation avec un réseau de partenaires. Enfin, le projet BRECcIA s'attache à améliorer la vie des personnes issues des communautés les plus vulnérables qui tirent leurs moyens de subsistance des services écosystémiques essentiels.

Zambia – Managing multiple objectives in a changing environment

In the centre of southern Africa lies the landlocked country of Zambia. In its capital, Lusaka, an estimated 60–70 per cent of the 2.5 million inhabitants live in informal settlements or peri-urban areas [1] [2]. During the dry season, Zambia is prone to drought and has struggled with insufficient water resources. Climate change is projected to lead to lower rainfall and higher temperatures in the region, which in turn would lead to lower water levels and higher levels of evaporation. The Iolanda water treatment plant provides about 40 per cent of the water supply for the utility that serves Lusaka, with boreholes providing the rest [3]. This treatment plant depends on hydropower to operate and often experiences power shortages.

The water supply for Iolanda comes from the Kafue River, and the hydropower supply comes from the Kafue Gorge dam. This means that the water level in the Kafue Gorge reservoir affects both water availability and power availability, making Lusaka especially vulnerable to climate-related risks, since lower levels of water cause power shortages, which in turn affect the town's service water supply [3].

Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) is a bottom-up approach to decision-making specifically designed to address water-related issues in vulnerable areas. It targets practitioners and stakeholders in developing countries facing drought and other factors that are difficult to predict, such as climate change. Its core approach is based on involving all relevant stakeholders and collaboratively defining the objectives of specific decisions to be made. The Millennium Challenge Corporation (MCC) piloted this approach as it considered how to address the problems facing the Iolanda water treatment plant. MCC had previously committed to rehabilitate the Iolanda plant as a part of the Lusaka Water Supply, Sanitation and Drainage (LWSSD) project [4].

IHP has worked within the CRIDA framework to engage various stakeholders in different regions to design a robust climate stress test in order to identify the uncertainty of climate projections for water resources management in cooperation and collaboration with Category 2 centres and centres of excellence. In collaboration with the Alliance for Global Water Adaptation (AGWA), the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Deltares and the Dutch Ministry of Water and Infrastructure, UNESCO and the International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) have recently published Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future [5].

The CRIDA approach analyses risk through a process called decision scaling, which means first identifying the status of current operations in the water supply system before taking different risks into the analysis. In the Iolanda case, the treatment facility required investment regardless of future climate risks, due to frequent power shortages. The subsequent vulnerability analysis identified the main problem as the lack of power, since a power shortage would occur before the water level fell below the treatment plant intake valves. A lack of treated water from the plant could lead to increases in waterborne diseases, stunting, increased mortality and lower economic productivity. Since the risk was deemed to be high, robust and flexible mitigation strategies were needed [3].

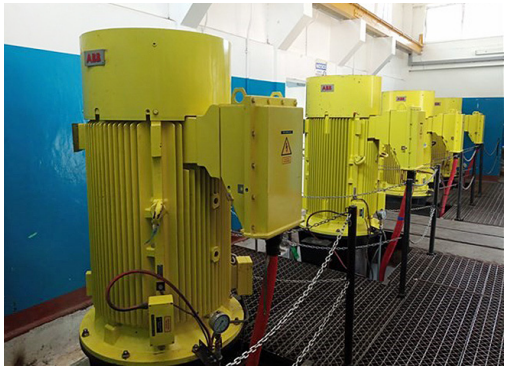
Three strategies were identified: buying and installing back-up generators, creating a power agreement that would favour the plant during power shortages and building large transfer tanks to store water for the city. These alternatives were then evaluated for effectiveness, feasibility and cost. The final strategy selected via incremental cost analysis and considering political will, recommended the option of generators. While it was not deemed necessary to implement the solution at the time, ongoing rehabilitation work could ensure infrastructure is in place for when the generators are needed [3].

Infrastructure development that considers current and future risks enables more robust services, increasing the chance of long-term sustainability of water and power supplies. The improvement of the Iolanda water treatment facility cannot be solely attributed to the CRIDA approach, since the MCC-funded work at Iolanda was inscribed in a larger development project aimed at improving water, sanitation and sewage in Zambia. However, this example is one of several projects initiating a new global community of practice, which can inspire others to use similar methods to make informed and sustainable decisions related to water resource management.

Kafue Intake Pump House.

Station de pompage à la prise d'eau de la rivière Kafue.





New Pumps at Kafue Intake.

Nouvelles pompes à la prise d'eau de la rivière Kafue.

Iolanda treatment plant in Kafue.

L'usine de traitement Iolanda (Kafue).



Watermelon vender in Lusaka city.
Vendeuse de pastèques à Lusaka.



Zambie – Gérer des objectifs multiples dans un environnement en évolution

La Zambie est un pays enclavé situé au centre de l'Afrique australe. Selon les estimations, 60 à 70 % des 2,5 millions d'habitants que compte sa capitale, Lusaka, vivent dans des quartiers informels ou des zones périurbaines [1][2]. Pendant et le pays a déjà connu la saison sèche, la Zambie est exposée aux sécheresses et a déjà connu des pénuries d'eau. D'après les prévisions, le changement climatique devraient entraîner une diminution des précipitations et une hausse des températures dans la région, ce qui aurait pour effet de baisser les niveaux d'eau et d'augmenter l'évaporation. La station de traitement des eaux de Iolanda alimente environ 40 % de l'approvisionnement en eau des services publics de Lusaka, le reste de l'alimentation étant assuré par l'eau provenant des puits [3]. Cette station de traitement fonctionne à l'énergie hydraulique et connaît fréquemment des coupures d'électricité.

L'approvisionnement en eau qui alimente Iolanda provient de la rivière Kafue, et l´hydroélectricité provient des barrages situés dans les gorges de Kafue. Cela signifie que le niveau d'eau dans le réservoir des gorges de la rivière Kafue influe non seulement sur la disponibilité des ressources hydriques, mais également sur l'alimentation électrique. Cette situation rend la ville de Lusaka particulièrement vulnérable aux risques climatiques, la baisse des niveaux d'eau entraînant des coupures d'électricité qui se répercutent à leur tour sur l'alimentation en eau de la ville [3].

L'analyse de décision fondée sur les risques climatiques (CRIDA) est une approche ascendante du processus décisionnel spécialement conçue pour répondre aux problématiques hydriques dans les zones vulnérables. Elle s'adresse aux professionnels et aux parties prenantes des pays en développement confrontés à la sécheresse et à d'autres facteurs difficilement prévisibles tels que le changement climatique. L'approche CRIDA repose sur un principe fondamental qui consiste à impliquer l'ensemble des parties prenantes afin de définir de manière collaborative des objectifs précis pour chaque décision à prendre. Le Millennium Challenge Corporation (MCC) a adopté cette démarche pour décider des modalités de résolution des problèmes détectés au niveau de la station de traitement de Iolanda, que le MCC s´était engagé a réhabiliter dans le cadre du Projet d'alimentation en eau, d'assainissement et de drainage de Lusaka (LWSSD) [4]. Le PHI a également adopté l'approche CRIDA pour impliquer les diverses parties prenantes de différentes régions dans la conception d'un test de stress climatique fiable, destiné à mettre en évidence les incertitudes des projections climatiques en matière de gestion des ressources en eau, en coopération avec des centres de catégorie 2 et des centres d'excellence. L'Alliance for Global Water Adaptation (AGWA), le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis (USACE), l'institut Deltares, le ministère de l'Infrastructure et de la Gestion de l'eau des Pays-Bas, l'UNESCO et le Centre international pour la gestion intégrée des ressources en eau (ICIWaRM) ont récemment publié un document intitulé Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future [5].

L'approche CRIDA permet d'analyser les risques au moyen d'un processus appelé « échelonnement des décisions », qui consiste à examiner l'état actuel de fonctionnement du système d'approvisionnement en eau avant d'intégrer les différents risques à l'analyse. Dans le cas de la station de traitement de Iolanda, la fréquence des coupures d'électricité exigeait la réalisation d'investissements, et ce, indépendamment des risques climatiques à venir. L'analyse de vulnérabilité a ensuite révélé que le problème principal était le manque d'électricité, dans la mesure où une coupure se produirait avant que le niveau d´eau ne soit descendu en deça des valves d´entrée. La pénurie d'eau traitée en provenance de la station pourrait entraîner une augmentation des maladies d'origine hydrique, des retards de croissance et de la mortalité, ainsi qu'une baisse de productivité économique. Le niveau de risque étant considéré élevé, il a été convenu de mettre en place des stratégies d'atténuation solides et souples [3].

Trois stratégies ont donc été définies : acquisition et installation de groupes électrogènes ; conclusion d'une convention d'alimentation électrique qui donnerait priorité à la station de traitement en cas de coupure; et construction de grands réservoirs de transfert permettant de stocker l'eau destinée à alimenter la ville. L'efficacité, la faisabilité et le coût de ces solutions ont ensuite été évalués. Après une analyse des coûts supplémentaires tenant compte de la volonté exprimée au niveau politique, la première stratégie a finalement été choisie (groupes électrogènes). S'il n'a pas été jugé nécessaire de mettre en application la solution retenue à ce moment-là, les travaux de réhabilitation en cours devraient permettre aux infrastructures d'accueillir les groupes électrogènes en temps voulu [3].

Le fait d'assurer un développement infrastructurel tenant compte des risques présents et futurs permet de fournir des services plus fiables, ce qui accroît la probabilité de durabilité à long terme des ressources en eau et en électricité. Les améliorations apportées à la station de traitement de Iolanda ne sont pas seulement attribuables à l'approche CRIDA; by car le travail financé par le MCC à Iolanda s´est inscrit dans un projet plus large de développement visant à améliorer l'approvisionnement en eau, l'assainissement et le traitement des eaux usées en Zambie. Il s'agit là d'un seul exemple parmi les différents projets qui contribuent à l'émergence d'une nouvelle communauté de pratique mondiale. Cet exemple pourrait inciter d'autres acteurs à employer des méthodes similaires afin de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau, qui s'inscrivent dans une optique de durabilité.

Morocco – Harvesting fog in the mountains

In south-west Morocco, the Aït Baamrane region stretches along the Anti-Atlas Mountains with the Atlantic Ocean to the west and the Sahara Desert to the east. The region is one of the poorest in Morocco, with low levels of literacy and a lack of access to adequate education and health services. The Berber people inhabiting the foothills of these mountains predominantly rely on pastoralism and agriculture, activities that are both highly dependent on water. Access to reliable water sources has long been a challenge that limits people's livelihood opportunities.

Intermittent drought and low levels of rainfall coupled with evapotranspiration due to hot, dry winds from the Sahara Desert are common across North Africa, but in the Aït Baamrane region, increased cultivation practices in low-rainfall areas combined with more erratic rainfall patterns have led to drought having increased impacts on the local population [1]. Communities in the region are highly dependent on wells for access to water as well as cisterns for rainwater collection. Traditionally, people hand-dug wells to collect water for domestic use, but now they commonly use drilling machines to reach deeper into the aquifers, which has led to overextraction of groundwater and pollution of the aquifers [2].

Persistent drought and the absence of proper water infrastructure have made the communities living in these areas highly vulnerable. Not only are wells scarce, but the quality of the water is very low. Water samples have shown high concentrations of sulphates and nitrates [1]. The lack of clean water has contributed to a weakening of the social structures of many Berber communities. Due to the challenging living conditions, many households have migrated to cities. Among families who have stayed, many of the working-age members, mainly men, have out-migrated, leaving women, children and the elderly behind. Women and girls therefore bear the burden of upholding the traditional way of life and spend up to four hours a day fetching water from wells [3].

However, a solution to address the complex challenges of water scarcity, sustainable development and marginalization in the region can be found in the Anti-Atlas Mountains. Clouds accumulating over the Atlantic Ocean are transported to the mountains and transformed into fog, a resource that is abundant for six months a year. Dar Si Hmad, a local non-governmental organization (NGO), has worked with several partners to install one of the biggest fog water collection systems in the world in Mount Boutmezguida, helping to reduce the water scarcity problem for a number of local communities [2]. The project's design and implementation were carried out in collaboration with community members, researchers and practitioners, resulting in an innovative water system with clear benefits for the rural population.

The harvesting system comprises several large, metal mesh nets connected to gutters and cisterns, which are placed up in the mountains facing the ocean. The wind pushes the fog through the nets, which catch the condensation, with the water droplets then collected in the gutters below, filling the cisterns. In optimal fog conditions, one net can collect up to 22 litres of water per day, with the entire Mount Boutmezguida installation able to provide around 6,300 litres of water per day [2]. Solar-powered pumps distribute the water through underground pipes to nearby villages, benefiting around 500 people.

Fog was traditionally viewed as something negative by the local communities, making the path to the pastures slippery and dangerous and causing equipment to rust. Today it is a sustainable and reliable source of water. Through community training and trust-building, women are now responsible for managing these water systems. The installation of the fog water collection system has improved access to clean water and sanitation in rural Berber communities, alleviating water anxiety for hundreds of people and providing a source of drinking water that surpasses national health standards [2]. This contributes to community development, sustainable livelihoods and the health of the local people.

Dar Si Hmad has also started water schools that teach children about sustainable water practices and how the availability or absence of water shapes the environment around them [4]. The main goal of these water schools is to empower children and their communities to improve their living conditions. Dar Si Hmad is now introducing a greywater recycling project for agriculture.



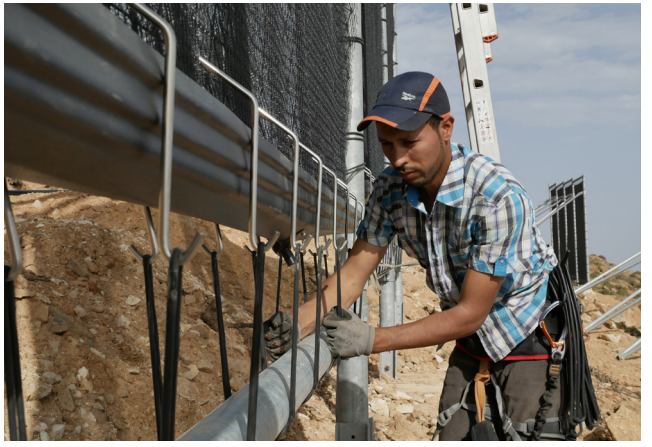
Anti-Atlas Mountains, Morocco.
Montagnes de l'Anti-Atlas (Maroc).





Installation of fog harvesting system.

Installation du système de récupération d'eau de brouillard.



Fog harvesting system, Morocco.
Système de récupération d'eau de brouillard (Maroc).



Maroc – Recueillir l'eau du brouillard dans les montagnes

Au sud-ouest du Maroc, la région d'Aït Baamrane s'étend le long des montagnes de l'Anti-Atlas, bordée à l'ouest par l'océan Atlantique et à l'est par le désert du Sahara. La région est l'une des plus pauvres du Maroc ; le taux d'alphabétisation est faible et l'accès à des services d'éducation et de santé adéquats est insuffisant. Les populations berbères installées au pied de ces montagnes vivent essentiellement du pastoralisme et de l'agriculture, des activités toutes deux très dépendantes des ressources en eau. L'accès à des sources fiables d'approvisionnement en eau constitue depuis longtemps un obstacle qui limite les moyens de subsistance.

La sécheresse intermittente et les faibles précipitations, associées à l'évapotranspiration provoquée par les vents secs et chauds du Sahara, sont des phénomènes fréquents en Afrique du Nord. Toutefois, dans la région d'Aït Baamrane, l'intensification de l'agriculture dans des zones de faible pluviosité, conjuguée à des précipitations plus irrégulières, ont entraîné un accroissement des effets de la sécheresse sur la population locale [1]. L'approvisionnement en eau des communautés de la région est fortement tributaire des puits et des citernes de collecte des eaux pluviales. Traditionnellement, les puits destinés à collecter l'eau à usage domestique étaient creusés à la main. Aujourd'hui, des engins sont couramment utilisés pour prélever plus profondément les aquifères. Cette méthode entraîne toutefois une surexploitation des eaux souterraines et une pollution des aquifères [2].

La sécheresse prolongée et l'absence d'infrastructures hydrauliques appropriées ont rendu les communautés qui vivent dans ces zones extrêmement vulnérables. Non seulement les puits sont peu nombreux, mais la qualité de l'eau extraite est très faible. Des prélèvements d'eau ont ainsi révélé des concentrations élevées en sulfates et en nitrates [1]. Le manque d'eau potable a contribué à fragiliser les structures sociales de nombreuses communautés berbères. En raison des conditions de vie difficiles, de nombreux ménages se sont installés dans les villes. Parmi les familles qui sont restées, la plupart des membres en âge de travailler, essentiellement des hommes, sont partis gagner leur vie, laissant derrière eux les femmes, les enfants et les personnes âgées. C'est donc aux femmes et aux filles qu'il revient de préserver le mode de vie traditionnel, et de passer jusqu'à quatre heures par jour à aller chercher l'eau aux puits [3].

Toutefois, les montagnes de l'Anti-Atlas peuvent offrir une solution qui permet de répondre aux défis complexes que sont le manque d'eau, le développement durable et la marginalisation de la région. Les nuages qui s'accumulent au-dessus de l'océan Atlantique arrivent jusqu'aux montagnes où ils se transforment en brouillard, une ressource présente en abondance six mois par an. Dar Si Hmad, une organisation non gouvernementale (ONG) locale, a travaillé avec plusieurs partenaires afin d'installer au sommet du mont Boutmezguida l'un des plus grands systèmes de collecte de brouillard au monde. L'objectif est de lutter contre le problème du manque d'eau auquel sont confrontées de nombreuses communautés locales [2]. La conception et la mise en œuvre du projet ont été assurées en collaboration avec les membres des communautés, des chercheurs et des professionnels. L'initiative a abouti à la mise en place d'un système de collecte d'eau innovant offrant de nets avantages aux populations rurales.

Le système de collecte se compose de plusieurs filets métalliques de grande dimension reliés à des gouttières et à des citernes. Ces filets sont placés au sommet des montagnes, face à l'océan. Le vent pousse le brouillard à travers les filets, qui retiennent la condensation, et les gouttelettes d'eau sont ensuite collectées dans les gouttières situées en contrebas, qui remplissent les citernes. Dans des conditions de brouillard optimales, un filet peut collecter jusqu'à 22 litres d'eau par jour. L'ensemble des filets installés sur le mont Boutmezguida peuvent ainsi fournir environ 6 300 litres d'eau par jour [2]. Des pompes à énergie solaire acheminent l'eau par des canalisations souterraines jusqu'aux villages voisins, où vivent quelque 500 habitants.

Autrefois, les communautés locales redoutaient le brouillard, car il rend les sentiers pastoraux glissants et dangereux et fait rouiller les équipements. Aujourd'hui, il constitue une source durable et fiable d'approvisionnement en eau. Grâce aux activités de formation communautaire et de renforcement de la confiance, ce sont désormais les femmes qui assurent la gestion de ces systèmes. L'installation du système de collecte de brouillard a permis d'améliorer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement dans les communautés berbères rurales, atténuant ainsi l'angoisse liée à l'approvisionnement en eau de centaines de personnes, et fournissant une source d'eau potable d'une qualité supérieure aux normes sanitaires nationales [2]. Cette avancée contribue au développement des communautés, à la pérennité des moyens de subsistance et à la bonne santé des populations locales.

Dar Si Hmad a également créé des écoles de l'eau où les enfants apprennent les pratiques durables de gestion de l'eau et découvrent comment la présence ou l'absence d'eau façonne leur environnement [4]. L'objectif principal de ces écoles est de donner aux enfants et à leurs communautés les moyens d'améliorer leurs conditions de vie. Dar Si Hmad est en train de mettre en place un projet de recyclage des eaux grises à des fins agricoles.

Saudi Arabia – Sustainable solutions for making the desert bloom

The Kingdom of Saudi Arabia – the largest country on the Arabian peninsula – is located in a tropical and subtropical desert region. Almost all of the country is arid, and its cloudless skies provide little rain, with just 114 mm/year of precipitation estimate for the whole country [1]. In summer months, temperatures can reach over 50°C and winds can stir up great sand and dust storms.

Although the climate and environmental conditions are not well-suited to agricultural production, it has long been part of the country's food security plans. Saudi Arabia's policies and programmes have encouraged private sector investment in its agricultural sector and provided uncultivated land along with attractive finance and Government subsidies [1]. The country has also made investments in the development of infrastructure to accommodate agricultural production, such as roads, dams, drainage canals and irrigation systems. These interventions have, at different stages, led the country to be self-sufficient in several agricultural products such wheat, dates, eggs and milk.

In recent years, there has been growing awareness regarding the unsustainable use of water driving this agricultural expansion. In the 1980–2006 period, the volume of water used for agriculture tripled from 6.8 km^3 to 21 km^3 [1]. The water used for cultivation comes almost exclusively from fossil groundwater formed around 20,000 years ago that is stored in six major sedimentary aquifers [1]. The total reserve of these aquifers is difficult to quantify, but it is clear that with the low natural recharge simple mass balance means that these systems will eventually run dry. Given these concerns, Saudi Arabia's policies have changed in recent years, removing incentives for agricultural production and implementing guidelines for reducing water use for farming, industry and household consumption [2].

The situation in Saudi Arabia requires solutions for effective and sustainable water use. Although Saudi Arabia has a permanently dry landscape, its problems are similar to those that occur during a drought, though at a different timescale. Desalinating seawater is one effort being put in place. With more than 30 plants in operation, the country is the largest producer of desalinated water in the world [3]. Another solution being implemented and developed on the ground in Saudi Arabia is precision agriculture.

Precision agriculture aims to minimize the inputs required for agricultural production (water, nutrients, chemicals), while maximizing the crop yield. The approach helps farmers understand the variation of water and nutrients across an area of land, while monitoring crop health and condition, allowing them to determine what each crop needs to be most productive [4]. These farm-level data can then be used to efficiently allocate resources such as irrigation water and fertilizers to maximize output and limit waste for farmers, instilled in the concept of more crop per drop. This is especially valuable in arid regions or during drought, when water resources are at their most scarce. Precision agriculture can also be used to identify early stages of disease, crop stress or infestation, allowing farmers to implement preventative measures [4].

Precision agriculture relies on a wide variety of information spanning vegetation, soil condition and crop water use via evapotranspiration, and uses remote-sensing approaches to observe these details and to monitor changes. This includes data from the European Space Agency's Sentinel-2 satellite, which has a higher spatial and temporal resolution than previous platforms [4]. Another form of satellite information comes from CubeSats, miniaturized and relatively low-cost satellites that provide much higher resolution in space and time when flown in 'flocks' or constellations [5]. The information collected through satellites can be supplemented by the use unmanned aerial vehicles (UAVs), which provide an incredibly precise level of detail [6]. Together, CubeSats and UAVs can provide information on crop health, condition and production through their use of optical, multi- and hyperspectral sensors, which can be used to map everything from basic vegetation indices through to chlorophyll content as an indicator of productivity, stress and yield. Other forms of monitoring from UAVs are also possible, with a range of hydrological variables being explored from these emerging platforms. Although the concept of precision agriculture is quite mature, there is still much that needs to be done to realize its full potential and turn it from a research tool into an active agent in combating food security, water scarcity and drought-related issues. In Saudi Arabia, the work on using UAVs is still research focused and primarily used to help identifying crops that are suited to particular environments (resiliency to heat, drought, etc). For CubeSats the objective is to quantify crop water use and provide feedback on crop-health, with the aim to turn it into useable products.



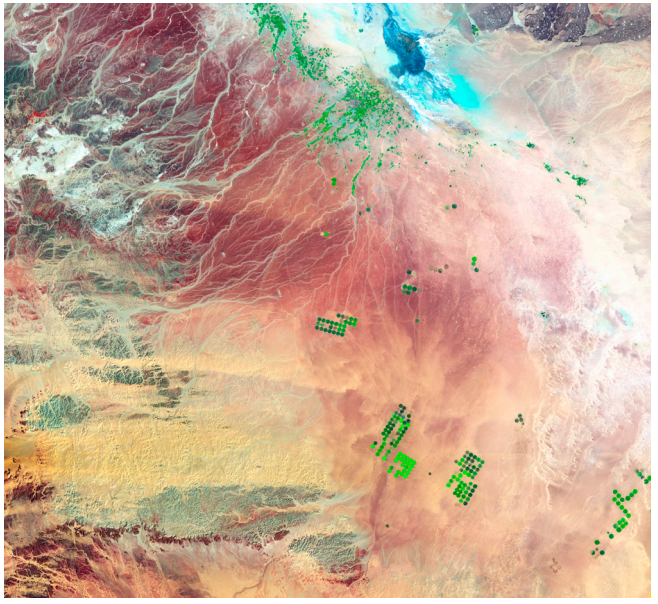
Thermal and hyper-spectral data collected to identify salinity tolerance traits across 200 different accessions of tomato at a field site in Saudi Arabia.

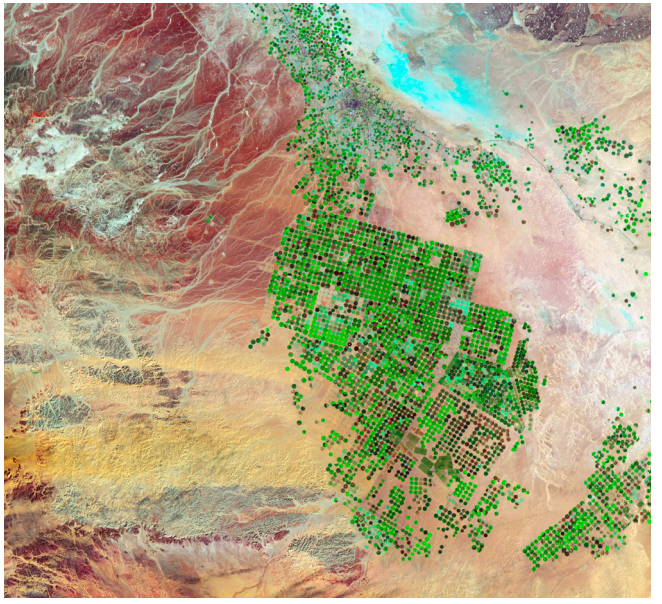
Collecte de données thermiques et hyperspectrales pour identifier les caractères de tolérance à la salinité de 200 accessions différentes de tomates sur un terrain en Arabie saoudite.



Herd of roaming camels.

Troupeau de chameaux en liberté.





Agricultural expansion within the Saudi Arabian desert (1991 and 2012).

Expansion agricole dans le désert saoudien (1991 et 2012).



Arabie saoudite – Des solutions durables pour cultiver le désert

Le Royaume d'Arabie saoudite, le plus grand pays de la péninsule arabique, est situé dans une région désertique tropicale et subtropicale. Le pays est presque totalement aride, et son ciel sans nuages offre peu de précipitations : à peine 114 millimètres de pluie par an selon les estimations [1]. Pendant la période estivale, les températures peuvent dépasser les 50 °C et les vents peuvent provoquer de fortes tempêtes de sable et de poussière.

Malgré des conditions climatiques et environnementales peu propices à l'agriculture, cette activité fait depuis longtemps partie intégrante des plans de sécurité alimentaire du pays. L'Arabie saoudite a adopté des politiques et des programmes visant à encourager les investissements privés dans le secteur agricole, et a fourni des terres non cultivées ainsi que des subventions gouvernementales et des financements avantageux [1]. Le pays a également investi dans le développement d'infrastructures destinées à soutenir la production agricole, telles que des routes, des barrages, des canaux de drainage ou des réseaux d'irrigation. Grâce à ces mesures, le pays parvient à produire certaines denrées agricoles en quantité suffisante pour subvenir à ses propres besoins (principalement du blé, des dates, des œufs et du lait).

Ces dernières années, la prise de conscience s'est accrue concernant l'utilisation non durable de l'eau stimulant cette expansion agricole. Entre 1980 et 2006, le volume d'eau consommé par l'agriculture a été multiplié par trois, passant de 6,8 km^3 à 21 km^3 [1]. L'eau utilisée à des fins agricoles provient presque exclusivement des nappes fossiles formées il y a quelque 20 000 ans et contenues dans six grands aquifères sédimentaires [1]. La réserve totale de ces aquifères est difficile à quantifier, néanmoins il est clair qu'au vu du faible taux de reconstitution naturelle des nappes, un simple bilan de masse permet d'affirmer que ces ressources finiront par s'épuiser. Face à cette situation préoccupante, l'Arabie saoudite a modifié ses politiques au cours des dernières années, en supprimant les incitations agricoles et en appliquant des directives destinées à réduire la consommation d'eau dans l'agriculture, l'industrie et les ménages [2].

La situation du pays exige la mise en place de solutions qui garantissent une utilisation efficace et durable de l'eau. Bien que l'Arabie saoudite soit soumise à un climat aride permanent, les problèmes rencontrés par le pays sont semblables à ceux qui sont observés pendant un épisode de sécheresse, à une échelle temporelle néanmoins différente. Le dessalement de l'eau fait partie des initiatives actuellement mises en place. Avec plus de 30 usines en activité, le pays est le premier producteur d'eau dessalée dans le monde [3]. Une autre solution actuellement déployée et développée sur le terrain en Arabie saoudite est l'agriculture de précision.

Cette technique vise à réduire au maximum les intrants nécessaires à la production agricole (eau, nutriments, produits chimiques) tout en optimisant le rendement des cultures. Cette approche permet aux agriculteurs d'étudier les variations des teneurs en eau et en nutriments sur une parcelle donnée tout en surveillant la santé et l'état des cultures. Ils peuvent ainsi identifier ce dont chaque culture a besoin pour être plus productive [4]. Les données recueillies au niveau des exploitations agricoles peuvent ensuite être utilisées pour affecter efficacement les ressources telles que l'eau d'irrigation et les engrais, afin de maximiser la production et de limiter les déchets. Il s'agit d'une démarche inspirée du concept « produire plus avec moins d'eau ». Cette approche est particulièrement intéressante dans les régions arides ou en période de sécheresse, lorsque les ressources en eau sont au plus bas. L'agriculture de précision peut aussi servir à détecter les premiers stades d'une maladie, les stress ou les infestations de culture, ce qui permet aux agriculteurs de mettre en œuvre des mesures préventives [4].

Elle s'appuie sur un large éventail d'informations (végétation, état des sols, consommation d'eau des cultures par évapotranspiration, etc.) et utilise des méthodes de télédétection qui permettent d'observer différents éléments et d'en suivre les variations. Il s'agit notamment de données provenant du satellite Sentinel-2 de l'Agence spatiale européenne, dont la résolution spatiale et temporelle est plus élevée que celle des plateformes précédemment utilisées [4]. D'autres informations satellitaires proviennent des CubeSats, de petits satellites relativement peu coûteux qui offrent une résolution spatiale et temporelle bien supérieure lorsqu'ils volent en groupes ou en constellations [5]. Les données recueillies par les satellites peuvent être complétées par l'utilisation de drones, qui offrent un degré de précision incroyable [6]. Utilisés ensemble, les CubeSats et les drones peuvent fournir des indications sur la santé, l'état et la production des cultures grâce à leurs capteurs optiques multi et hyperspectraux. Ils peuvent également servir à cartographier n'importe quel élément, qu'il s'agisse d'indices de végétation basique établis à partir de la teneur en chlorophylle ou bien d'indicateurs de productivité, de stress et de rendement. Les drones permettent d'effectuer d'autres types de suivi à partir des variables hydrologiques observées depuis ces nouvelles plateformes. Bien qu'il s'agisse d'une technique largement éprouvée, il reste encore beaucoup à faire pour que l'agriculture de précision donne la pleine mesure de son potentiel et passe du statut d'outil de recherche à celui d'agent actif de la lutte contre l'insécurité alimentaire, le manque d'eau et les problèmes de sécheresse. En Arabie saoudite, les drones sont encore utilisés à des fins de recherche et servent essentiellement à repérer les cultures qui sont adaptées à certains environnements particuliers (résistance à la chaleur, à la sécheresse, etc.). De leur côté, les CubeSats permettent de quantifier la consommation d'eau des cultures et de transmettre des données sur la santé de ces dernières en vue d'en faire des produits exploitables.

Aral Sea – Conserving and rehabilitating a lost sea

The Aral Sea, once one of the largest lakes in the world, lies dry barring a few small surviving oases of water. Significant desertification in the region has led to the emergence of a new desert, the Aralkum [1]. Located between Kazakhstan and Uzbekistan, it was once a vast expanse of water, supporting rich biodiversity and ecosystems that underpinned a bustling economy [2]. The Aral Sea's basin is spread across seven countries in Central Asia that feed the Syr Darya and Amu Darya rivers, which replenished the lake's water lost by evaporation. The diversion of large quantities of water from the Syr Darya and Amu Darya rivers in the 1960s to turn arid land into irrigated cotton crops in Kazakhstan, Turkmenistan and Uzbekistan tipped the balance. The loss of inflows into the terminal lake led to a rapid drying of the Aral Sea and a catastrophic decline of the ecosystems and societies it supported. The once abundant fisheries had all but collapsed by the 1980s, as salinity levels rose to toxic levels [3] and wet land habitats shrunk by 95% [4].

The rapid drying of the Aral Sea was compounded by two decades of drought that furthered the imbalance between water inflow and evaporation loss. The Aral Sea split into two parts in the late 1980s, the Small Aral Sea and the Large Aral Sea, as it continued to dry. By 2006, the lake's water level had fallen 23 metres, reducing its surface area by 74 per cent and its volume by 90 per cent [5]. The loss of water has seen salinity levels rise around twelve-fold since 1957 [6], making it toxic to many species it once supported. The lake also played an essential role in the area, as it had an influence on weather and water regimes that supported the ecosystems and societies that surrounded it. The decrease in water affected the replenishment of groundwater, causing the surrounding landscape and ecosystems to dry out, furthering pressures on livelihoods as the land became increasingly saline and harsh and reducing productivity. The continued drying out of the local region combined with increasing temperatures driven by climate change has created large dust storms. These whip up salts and toxic chemicals such as pesticides and fertilizers deriving from cotton farms upstream, causing health issues in the surrounding areas and concerns around the degradation of soil and land productivity [2]. The Aral Sea catastrophe provides evidence of how human water interventions can create droughts that significantly impact both the environment and societies.

Improving the health of the Aral Sea is a complex undertaking, as it stretches across various countries, and transboundary management of water needs to be coordinated more effectively to provide maximum benefits both environmentally and economically across all countries. Capacity-building of water management organizations, improvement of education in the water sector and environmental conservation will be vitally important to improve monitoring, information-sharing, water budgeting and modernization of water infrastructure.

The rehabilitation of the Aral Sea itself is very unlikely. However, improving the maintenance and securing the water supply of remnant and newly created deltaic ecosystems can facilitate the partial recovery of the social, economic and ecological systems it once supported. Conserving the remaining parts of the sea is essential to sustain livelihoods and to maintain the surviving biodiversity and capture fisheries. Supported by the Central Asian Governments, the International Fund for Saving the Aral Sea (IFAS) is one organization working on solving the complex issues of the Aral Sea basin. Kazakhstan has also implemented a project to conserve the Aral Sea: the construction of the Kok-Aral Dam. The Dam separated the two parts of the Aral Sea by preventing flow from the North ('the Small Sea') into the lower-elevation South Aral ('the Large Sea') and has helped to restore the delta and revive fisheries and the wetland ecosystem [7]. Several other dams have been proposed to support the remaining parts of the Aral Sea. In 2018, the Republic of Uzbekistan committed to upgrading almost 30 per cent of its irrigated area to modern water-saving technologies over five years [8]. This initiative has the potential to improve water supply to the Aral Sea. The country has also nearly completed the targeted planting of 500,000 hectares of forests on the bottom of the Aral Sea to combat desertification and reduce salt dust storms that impact health and agricultural productivity [8].

The provision of water is critical to improve the water balance and replenish the Aral Sea, but it may also help insure against the prolonged pressures of droughts and climate change. The projected temperature rise may negatively alter the water balance through higher rates of evaporation. These uncertainties should be built into strategies to conserve the Aral Sea.



Workers pack fish ready for sale.

Travailleurs emballant du poisson prêt à être vendu.

Camels shelter behind a rusted ship in the dried bed of the Aral Sea.

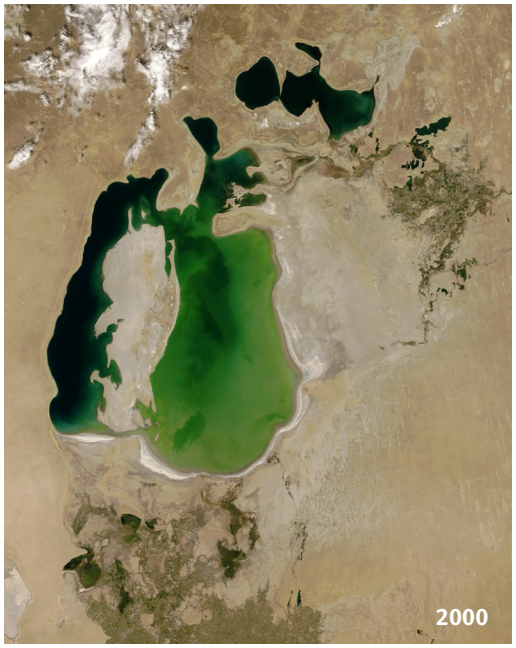
Chameaux s'abritant derrière une épave de bateau rouillée dans le lit asséché de la mer d'Aral.

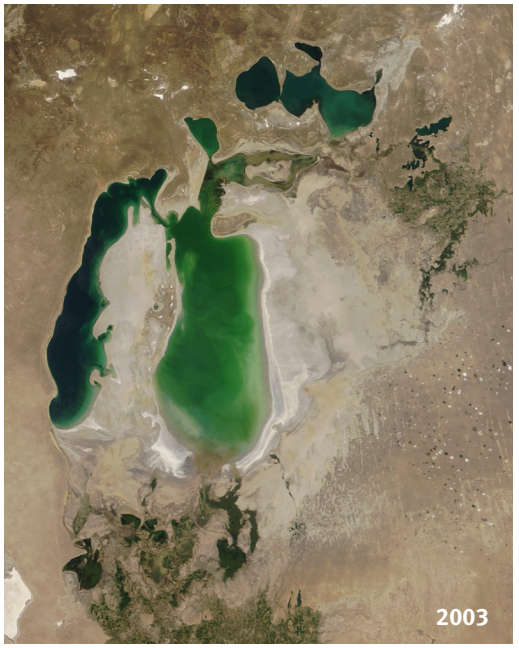




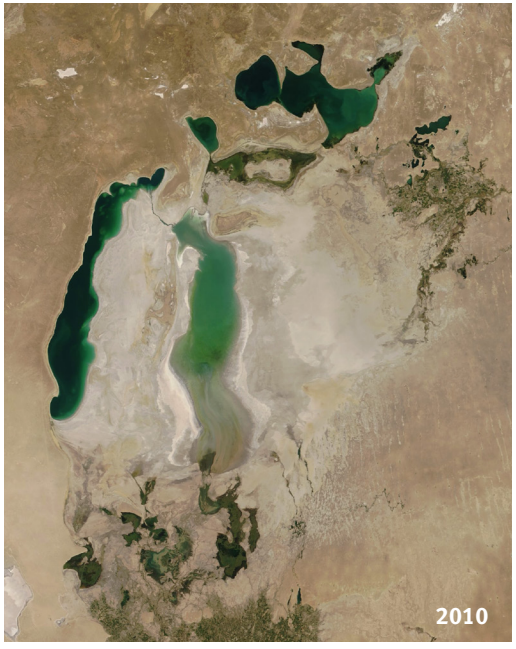
Ships rust in the dry seabed of the Aral Sea.

La rouille s'attaque aux épaves abandonnées dans les fonds marins asséchés de la mer d'Aral.

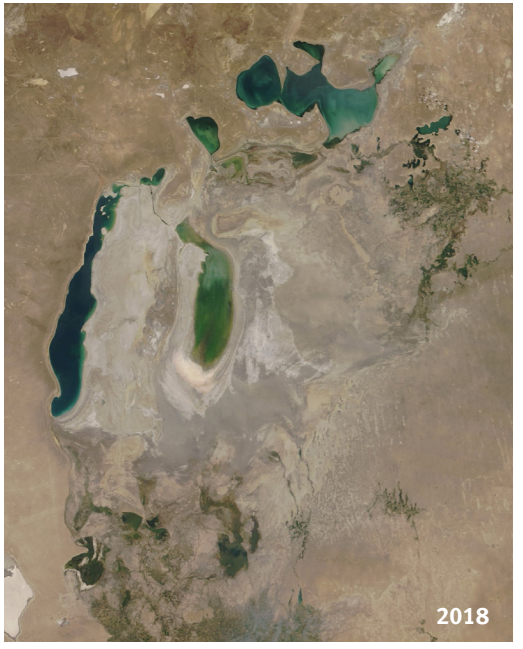

2000


2003


2006


2010


2015


2018

Mer d'Aral – Conserver et restaurer une mer disparue

La mer d'Aral, jadis l'un des plus grands lacs du monde, est aujourd'hui asséchée, à l'exception des quelques oasis qui subsistent ça et là. La désertification de grande ampleur qui sévit dans la région a donné naissance à un nouveau désert, l'Aralkum [1]. Située entre le Kazakhstan et l'Ouzbékistan, la mer d'Aral était autrefois une vaste étendue d'eau à la biodiversité et aux écosystèmes riches qui soutenaient une économie florissante [2]. Le bassin de la mer d'Aral couvre sept pays de l'Asie centrale. Il était alimenté par les fleuves Syr-Daria et Amou-Daria, qui compensaient les pertes d'eau dues à l'évaporation. Dans les années 1960, le détournement d'importantes quantités d'eau provenant du Syr-Daria et de l'Amou-Daria afin d'irriguer des terres arides du Kazakhstan, de l'Ouzbékistan et du Turkménistan pour y implanter des champs de coton a fait basculer cet équilibre. Le manque d'apport en eau assèche alors rapidement le lac et entraîne une dégradation catastrophique de ses écosystèmes et des sociétés qui en dépendaient. Dans les années 1980, les ressources halieutiques autrefois abondantes avaient presque complètement disparu, les niveaux de salinité ayant atteint des seuils toxiques [3], et les habitats des zones humides avaient diminué de 95 % [4].

Deux décennies de sécheresse ont accéléré le processus d'assèchement de la mer d'Aral, accentuant le déséquilibre entre les apports en eau et les pertes par évaporation. Alors que son assèchement se poursuit, le lac se scinde en deux à la fin des années 1980, formant la Petite Aral et la Grande Aral. En 2006, le niveau d'eau du lac avait chuté de 23 mètres, réduisant sa superficie de 74 % et son volume de 90 % [5]. Les pertes d'apport en eau ont multiplié par douze le taux de salinité du lac depuis 1957 [6], le rendant toxique pour de nombreuses espèces qui y vivaient autrefois. Le lac jouait également un rôle essentiel dans la région, par son influence sur les régimes météorologiques et hydriques dont dépendaient les écosystèmes et les sociétés qui l'entouraient. La baisse des niveaux d'eau a perturbé la reconstitution des nappes souterraines, provoquant l'assèchement des paysages et des écosystèmes environnants, accentuant les pressions exercées sur les moyens de subsistance à mesure que la terre durcissait et devenait de plus en plus saline, et réduisant la productivité. L'assèchement continu de la région, associé à la hausse des températures sous l'effet du changement climatique, a provoqué de fortes tempêtes de poussière. Ces dernières ont soulevé du sel et des produits chimiques toxiques tels que des pesticides et des engrais provenant de champs de coton situés en amont, et ont engendré des problèmes sanitaires dans les zones avoisinantes. Ces tempêtes ont également suscité des préoccupations concernant la détérioration des sols et la productivité des terres [2]. La catastrophe de la mer d'Aral montre comment les interventions humaines sur l'eau peuvent créer des sécheresses aux effets considérables tant sur l'environnement que sur les sociétés.

L'amélioration de l'état de la mer d'Aral est une entreprise complexe, car cette dernière s'étend sur plusieurs pays. La gestion des eaux transfrontières doit être coordonnée de manière plus efficace afin d'assurer le maximum d'avantages environnementaux et économiques à tous les pays concernés. Le renforcement des capacités des organismes chargés de la gestion de l'eau, l'amélioration de la sensibilisation sur le thème de l'eau et la préservation de l'environnement seront d'une importance cruciale pour renforcer le suivi, le partage d'informations, la budgétisation des ressources en eau et la modernisation des infrastructures hydrauliques.

La restauration de la mer d'Aral est très peu probable en soi. Toutefois, le maintien d'un approvisionnement en eau plus sûr des écosystèmes restants ou nouvellement créés dans le delta peut faciliter le relèvement partiel des systèmes sociaux, économiques et écologiques qui en dépendaient autrefois. Il est essentiel de conserver les parties encore intactes du lac afin de maintenir les moyens de subsistance et d'assurer la survie de la biodiversité et des activités de pêche. Financé par les gouvernements d'Asie centrale, le Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral (IFAS) est l'un des organismes qui œuvrent pour répondre aux problématiques complexes du bassin de la mer d'Aral. Le Kazakhstan a également mis en œuvre un projet visant à préserver la mer d'Aral : la construction du barrage de Kokaral. Ce dernier a permis de séparer les deux parties de la mer en empêchant la Petite Aral, située au nord, de se déverser dans la Grande Aral située au sud, à plus faible altitude. Il a également permis de restaurer le delta et de redonner vie aux écosystèmes des zones humides et aux activités de pêche [7]. D'autres projets de construction de barrages ont été soumis afin de conserver les parties encore intactes de la mer d'Aral. En 2018, la République d'Ouzbékistan s'est engagée à moderniser en cinq ans près de 30 % de ses surfaces irriguées au moyen de technologies économes en eau [8]. Cette initiative pourrait améliorer l'alimentation en eau de la mer d'Aral. Par ailleurs, le pays a également presque atteint l'objectif fixé de planter 500 000 hectares d'arbres dans l'ancien fond marin afin de lutter contre la désertification et de réduire les tempêtes de poussière saline qui ont des effets néfastes sur la santé et sur la productivité agricole [8].

L'alimentation en eau est essentielle pour améliorer l'équilibre hydrique et restaurer la mer d'Aral, et elle permet en outre de lutter contre les pressions prolongées exercées par les sécheresses et le changement climatique. L'élévation prévue des températures peut altérer l'équilibre hydrique sous l'effet de la hausse des taux d'évaporation. Les stratégies de conservation de la mer d'Aral doivent tenir de compte ces incertitudes.

Keoladeo National Park – A World Heritage site threatened by drought

Keoladeo National Park is located within the Indus-Ganges Monsoon Forest biogeographic province in Rajasthan, India, covering roughly 29 km^2 of wetlands, grasslands and scrublands [1]. Originally created as a duck hunting area for the Maharaja of Bharatpur in the 1850s, the park was designated as a bird sanctuary in 1956, received status as a Ramsar site in 1981 and became a National Park in 1982 [1]. In 1985, the park was included on the UNESCO World Heritage List as a natural property, recognized for its exceptional biodiversity, notably its large assembly of wintering and resident breeding birds. Around 370 different bird species have been recorded in the park [2]. Due to its strategic location in the middle of the Central Asian migratory flyway, it has been an important wintering area for migratory birds, including critically endangered species such as the Siberian Crane, the Greater Spotted Eagle and the Imperial Eagle [2].

Located in a natural depression, the park is dependent upon and maintained by a system of canals and dykes. During the monsoon period, from June to September, it receives water through the Ajan Bund artificial dam, supplied with water from the Banganga and Gambhiri rivers [1]. The continued existence of the park depends on this regulated water supply, but over the past 30 years the park has suffered from drought and water crises resulting from a complex relationship of inadequate water resource management and unsustainable water extraction, coupled with the enormous inter-annual variability of the seasonal monsoons, which is affected by climate change [3].

In 1990, the World Heritage Committee noted that the site was threatened by insufficient water delivery, resulting in a decline in the number of migrating Siberian Cranes [4]. The annual requirement of water to maintain the ecological functions of the wetland was estimated to be about 15,5 million cubic meters (m^3) [3]. The joint World Heritage Centre and International Union for Conservation of Nature (IUCN) Mission carried out in 2005 concluded that over the 15 preceding years, an average of about 9,3 million m^3 of water had been made available to the park annually from the Ajan Bund [5]. The 2005 mission noted that the adverse impacts became visible in the form of dense growth of grass and advances of woodland species into the wetland parts of the park, reducing the wetland habitat available to the water birds [3]. This was partly due to the insufficient release of water from the Panchana Dam on the River Gambhir, 90 km upstream from the park, which supplies the Ajan Bund. These findings made it clear that without sufficient water delivery the wetland ecosystem was unlikely to survive. The recommendation was to secure minimum water flow from the Ajan Bund annually, and to increase data-collection and monitoring on changes in wetland habitat extent and the numbers and diversity of wintering and nesting birds [6]. In the following years, water levels continued to decline, and in 2008 the World Heritage Committee reviewed the state of conservation of the property and concluded that the situation had worsened due to reduced monsoon rainfall in 2006 and 2007, resulting in low numbers of both breeding and wintering water birds [6].

From 2008 onwards, Keoladeo National Park received financial support through the United Nations Foundation-funded World Heritage India programme. This included provisions to enhance management effectiveness and build staff capacity, as well as to increase the involvement of local communities in managing the property and promoting sustainable development. Based on recommendations from the Committee, the Government of Rajasthan introduced three remedial measures to better protect the park from drought by providing new sources of water during the monsoon season: firstly, installing the Chiksana Canal drain to supply 2,8 million m^3 of surface water; secondly, piping water from the Govardhan Drain to provide 9,9 million m^3 of water; and thirdly, implementing the Chambal-Dholpur-Bharatpur drinking water supply project to contribute 8,7 million m^3 for the first four years [6]. By the end of 2011, the completion of the Chiksana Canal was providing 1,4 million m^3 of water to the property annually [7]. In 2012, the Chambal-Dholpur-Bharatpur drinking water supply project was completed, providing 7 million m^3 of water [8]. Similarly, the Govardhan Drain was completed in September 2012, but was only able to provide 5,9 million m^3 of water in 2013 – 3,9 million m^3 lower than anticipated [9].

In 2016, the overall water release to the park was 17,8 million m^3, stemming from the Panchana Dam, the Chambal-Dholpur-Bharatpur Pipeline Project and the Govardhan Drain [10]. The World Heritage Committee reviewed the state of conservation of the property in 2018 and concluded that in four out of the seven years between 2010 and 2016, the minimum requirement of 15,5 million m^3 to sustain its wetland values was not met [10]. In view of this long-standing concern over water provision, the Committee requested that an IUCN Reactive Monitoring Mission be carried out in 2019 to assess the state of conservation and progress made in addressing issues of water provision and invasive species. Although effort has been made, sustainable solutions to ensure adequate and reliable long-term water supply remains a challenge and a matter of utmost priority to secure the continued preservation of the values for which the Keoladeo National Park was listed as a World Heritage site.

Ducks in the wetlands of the Keoladeo National Park.
Canards vivant dans les zones humides du parc national de Keoladeo.





Spotted owlet.
Une chevêche brame.



Oriental Magpie Robin.
Un shama dayal.

Birds within the wetlands of the Keoladeo National Park.

Oiseaux vivant dans les zones humides du parc national de Keoladeo.



Parc national de Keoladeo – Un patrimoine mondial menacé d'assèchement

Le Parc national de Keoladeo est situé dans la province biogéographique du Rajasthan, en Inde, au cœur de la forêt tropophile des vallées du Gange et de l'Indus. Il s'étend sur une superficie de 29 km^2 (exponing) constitués de zones humides, de prairies et de terrains broussailleux [1]. Créé dans les années 1850 pour servir de réserve de chasse au canard au Maharaja de Bharatpur, le parc a été désigné sanctuaire ornithologique en 1956, a reçu le statut de site Ramsar en 1981, et est devenu un parc national en 1982 [1]. En 1985, le parc a été inscrit sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO en tant que bien naturel renommé pour sa biodiversité exceptionnelle, en particulier ses sites d'hivernage majeurs et ses grandes concentrations d'oiseaux reproducteurs non migrateurs. Quelque 370 espèces y ont été recensées [2]. En raison de sa situation stratégique au cœur de l'axe migratoire de l'Asie centrale, il constitue une importante aire d'hivernage pour les oiseaux migrateurs, notamment les espèces en danger critique d'extinction telles que la grue de Sibérie, l'aigle criard et l'aigle impérial [2].

Situé dans une dépression naturelle, le parc est tributaire d'un système de canaux et de digues qui permet d'assurer sa conservation. Pendant la mousson, de juin à septembre, l'eau qu'il reçoit provient du barrage artificiel de l'Ajan Bund, alimenté par les rivières Banganga et Gambhiri [1]. Sa pérennité dépend de cet approvisionnement en eau régulé. Cependant, au cours des trente dernières années, le parc a souffert de la sécheresse et de crises de l'eau dues au rapport complexe entre une gestion inadéquate des ressources hydriques et une extraction non durable de celles-ci, associé à l'extrême variabilité interannuelle des moussons saisonnières, qui sont affectées par le changement climatique [3].

En 1990, le Comité du patrimoine mondial remarquait que le site était menacé par une alimentation en eau insuffisante, ayant pour conséquence un recul de la migration chez les grues de Sibérie [4]. La quantité d'eau annuelle nécessaire pour préserver les fonctions écologiques de la zone humide était estimée à environ 15,5 millions de mètres cubes (m^3) [3]. La mission conjointe de l'UNESCO et de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) réalisée en 2005 concluait qu'au cours des 15 années précédentes, l'Ajan Bund avait fourni en moyenne quelque 9,3 millions de m^3 d'eau annuels [5]. Cette mission a noté l'apparition d'effets néfastes tels qu'une croissance dense des herbacées et la progression des espèces forestières dans les zones humides du parc [3]. Ce phénomène s'expliquait en partie par l'apport d'eau insuffisant du barrage de Panchana situé sur la rivière Gambhir, à 90 km en amont du parc. Ces conclusions indiquaient clairement que l'écosystème des zones humides avait peu de chance de survivre sans une alimentation en eau suffisante. Selon les recommandations, le barrage de l'Ajan Bund devait fournir un minimum annuel d'eau. En outre, il convenait de recueillir davantage de données et d'améliorer le suivi sur l'évolution de l'étendue de l'habitat des zones humides et sur le nombre et la diversité des oiseaux les ayant choisies comme aires d'hivernage et de nidification [6]. Au cours des années suivantes, les niveaux d'eau ont continué à baisser. En 2008, après avoir examiné l'état de conservation du parc, le Comité du patrimoine mondial a conclu que la situation avait empiré. Les arrivées d'eau vers les zones humides ayant été limitées voire inexistantes en 2006 et 2007 à cause de pluies de mousson éparses, le nombre d'oiseaux aquatiques venus hiverner et nidifier dans leurs habitats a été faible [6].

En 2008, le parc national Keoladeo a commencé à recevoir un soutien financier par le biais du programme World Heritage India, financé par la Fondation pour les Nations Unies. Celui-ci comportait notamment des dispositions visant à rendre la gestion du parc plus efficace et à renforcer les capacités de son personnel, ainsi qu'à accroître la participation des communautés locales à la gestion du domaine et à la promotion du développement durable. S'appuyant sur les recommandations du Comité, le gouvernement du Rajasthan a pris trois mesures correctives afin de mieux protéger le parc de la sécheresse, en mettant en place de nouvelles sources d'approvisionnement en eau en période de mousson : premièrement, l'installation d'une voie d'écoulement sur le canal de Chiksana, destinée à fournir 2,8 millions de m^3 d'eau de surface ; deuxièmement, la dérivation de l'eau provenant de la voie d'écoulement de Govardhan, visant à fournir 9,9 millions de m^3 d'eau ; et troisièmement, la mise en œuvre du projet d'approvisionnement en eau potable Chambal-Dholpur-Bharatpur, qui apporterait 8,7 millions de m^3 d'eau pendant les quatre premières années [6]. Achevés fin 2011, les travaux réalisés sur le canal de Chiksana ont permis de fournir 1,4 million de m^3 d'eau annuel au domaine [7]. En 2012, parvenu à son terme, le projet d'approvisionnement en eau potable Chambal-Dholpur-Bharatpur a fourni 7 millions de m^3 d'eau [8]. Parallèlement, la dérivation de la voie d'écoulement de Govardhan, achevée en septembre 2012, n'a pu fournir que 5,9 millions de m^3 d'eau en 2013, soit 3,9 millions de m^3 de moins que prévu [9].

En 2016, l'apport d'eau global reçu par le parc était de 17,8 millions de m^3, provenant du barrage de Panchana, du projet de canalisation Chambal-Dholpur-Bharatpur et de la voie d'écoulement de Govardhan [10]. Après examen de l'état de conservation du parc en 2018, le Comité du patrimoine mondial a conclu que la quantité minimum attendue de 15,5 millions de m^3 d'eau n'avait pas été atteinte pendant quatre années sur les sept observées entre 2010 et 2016 [10]. Dans la perspective du déficite d'eau prolongé, le Comité a également demandé à l'UICN d'effectuer une mission de suivi réactif afin d'évaluer l'état de conservation du parc et les progrès réalisés en matière de résolution des problèmes liés à l'approvisionnement en eau et aux espèces invasives. En dépit des avancées, les solutions durables permettant de répondre aux besoins en eau à long terme demeurent difficiles à trouver et constituent à la fois un défi et une priorité absolue pour garantir la survie du Parc national de Keoladeo et la préservation des valeurs pour lesquels il a été inscrit au Patrimoine mondial.

Marshall Islands –Addressing water scarcity in a changing climate

In the Pacific Ocean, 29 low-lying coral atolls make up the Republic of the Marshall Islands, a picturesque paradise with sandy beaches and crystal-clear waters. However, the Pacific Islands are highly exposed to climate extremes such as droughts. The physical characteristics of the Marshal atolls – not rising higher than 3 to 4 metres above sea level – also result in limited freshwater reservoirs and sources of groundwater. This makes the Marshallese highly dependent upon rainwater as their primary source of potable water, which at times exposes the island nation to life-threatening challenges of water availability.

Climate extremes are exacerbated and occur over extended timescales during phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO), which is one of the main drivers of drought events for the Pacific Islands [1]. ENSO takes place in the equatorial Pacific Ocean and is able to change the global atmospheric circulation, which in turn influences temperature and precipitation. It comprises a warm phase (El Niño), a cold phase (La Niña), and a neutral phase. During an El Niño event, rainfall is typically lower and ocean surface temperatures higher than average, and the frequency and amplitude of ENSO is expected to increase in the coming years due to climate change.

Drought events are becoming an increasing reality for the Marshallese: the islands were hit by serious droughts in 1998, 2012 and 2016. The depletion of water resources became critical during these events, leading to states of emergency being declared. The droughts had a number of adverse social, economic and health impacts on the islands. The contamination of drinking water due to the drought conditions resulted in an increased number of diseases [1]. The droughts significantly impacted crop production and food security, which affected the majority of the population as most Pacific Islanders either depend on or significantly supplement their diets with subsistence crops that they grow on their own land. This is particularly true of remote rural communities, but even in urban areas, fruit and vegetables are grown in household gardens. Efforts to retain traditional knowledge and practices and their value in the face of ongoing climate change have been important to increase people's resilience in the face of water scarcity [2]. This includes food preservation practices, the harvest of wild foods and the production of multiple crops that can survive a range of extreme conditions.

During the recent droughts, emergency desalinization units were brought in as a temporary solution to the water shortage, but on the remote outer islands, people had to rely on water from coconuts when water resources ran out. Although some limited freshwater groundwater lenses that can be utilized during periods of drought are available on the Marshall Islands, these become more saline as the drought persists. Furthermore, storm events and tidal surges associated with El Niño can wash over low-lying islands and contaminate freshwater lenses with ocean water. In addition, the rising sea level as a consequence of climate change threatens to reduce the size of the freshwater lenses on these atolls.

The Pacific Integrated Water Resources Management (IWRM) project was initiated in 2004 [3]. Activities for the Marshall Islands focused on establishing an integrated water management and development plan for the Laura groundwater lens in Majuro Atoll, where 27,000 people (about half of the country's population) live. The aim was to improve water resources management, reduce groundwater pollution and improve water supply around the Laura area. Activities included provision of wastewater, sanitation, solid waste and recycling facilities; repair and maintenance of infrastructure for groundwater supply; water resource use planning and monitoring and the establishment of a Laura Lens Integrated Water Resource Plan [4].

Along with the improvement of groundwater management, the severe droughts highlighted the need to improve existing water storage capacity and develop alternative water resources. During the 2011 drought, activities were implemented to increase reservoir capacity and require rainwater catchment systems to be built into all new properties [5].

The Post Disaster Needs Assessment of the 2015–2016 drought for the Marshall Islands estimated that the drought resulted in economic losses of around US$4.9 million and a majority of the population experiencing a significant decline in the quality of life [2]. Although efforts have been promoted on the island as outlined above, the 2015–2016 drought highlighted the need to improve disaster risk management and national planning and financial capacity to build resilience for the people of the Marshall Islands. A key future requirement will be improved integration of traditional water and food security practices alongside other mitigation approaches in the face of rising ocean temperatures and sea levels.



Aerial view of densely populated atoll in the Marshall Islands.

Vue aérienne d'un atoll densément peuplé (Îles Marshall).



City view.

Vue de la ville.



Aerial view of an atoll in the Marshall Islands.

Vue aérienne d'un atoll (Îles Marshall).



Drought impacts on Ailuk Atoll, 2013.
Impacts de la sécheresse sur l'atoll Ailuk (2013).



Water reservoir with new liner.
Réservoir d'eau doté d'un nouveau revêtement.



View along an atolls coastline in the Marshall Islands.
Vue le long du littoral d'un atoll (Îles Marshall).

Îles Marshall – Faire face à la pénurie d'eau dans une période de changement climatique

Dans l'océan Pacifique, 29 atolls coralliens de basse altitude constituent la République des îles Marshall, un pittoresque paradis de plages sableuses et d'eaux cristallines. Cependant, les îles du Pacifique sont fortement exposées aux phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses. En outre, les caractéristiques physiques des atolls Marshall – qui ne s'élèvent qu'à trois ou quatre mètres au-dessus du niveau de la mer – se traduisent par des réserves d'eau douce et des sources d'eau souterraine limitées. De ce fait, ils sont très dépendants des eaux de pluie, leur principale source d'eau potable, ce qui expose parfois la population insulaire à des problèmes de disponibilité de l'eau potentiellement graves.

Les épisodes climatiques extrêmes s'accentuent et se produisent sur de longues périodes lors de l'apparition de phénomènes tels qu'El Niño-oscillation australe (ENSO), l'un des principaux facteurs de sécheresse dans les îles du Pacifique [1]. Survenant dans l'océan Pacifique équatorial, l'ENSO est capable de modifier la circulation atmosphérique globale, qui à son tour influe sur la température et les précipitations. Ce phénomène comprend une phase de réchauffement (El Niño), une phase de refroidissement (La Niña) et une phase neutre. Lors d'un épisode El Niño, les précipitations sont généralement plus faibles et les températures à la surface de l'océan supérieures à la moyenne. En raison du changement climatique, la fréquence et l'amplitude de l'ENSO devraient augmenter dans les années à venir.

La sécheresse est de plus en plus présente dans les îles Marshall, qui ont été frappées par de graves épisodes en 1998, 2012 et 2016 lors desquels l'épuisement des ressources hydriques est devenu critique, au point que l'état d'urgence a été déclaré. La sécheresse a eu plusieurs effets néfastes sur les îles, aux niveaux social, économique et sanitaire. La contamination de l'eau potable a entraîné l'apparition d'un nombre croissant de maladies [1]. La sécheresse a considérablement affecté la production agricole et la sécurité alimentaire et, de ce fait, la majorité de la population, car la plupart des habitants des îles du Pacifique dépendent des cultures vivrières qu'ils pratiquent sur leurs terres ou les utilisent largement pour compléter leur alimentation. C'est particulièrement le cas des communautés rurales isolées, même si l'on trouve aussi des cultures de fruits et de légumes dans les jardins individuels des zones urbaines. Les efforts déployés pour préserver les pratiques et les savoirs traditionnels ainsi que leur valeur face au changement climatique actuels ont joué un rôle essentiel pour renforcer la résilience de la population face à la pénurie d'eau [2]. Ils ont notamment porté sur les pratiques relatives à la conservation des aliments, la récolte des plantes sauvages et la production de cultures multiples résistantes à diverses conditions extrêmes.

Lors des récentes sécheresses, des unités de désalinisation d'urgence ont été appelées pour apporter une solution provisoire au manque d'eau. Néanmoins, les habitants des îles périphériques isolées ont dû se replier sur l'eau de coco lorsque les ressources hydriques ont été épuisées. Bien que les Îles Marshall disposent de quelques lentilles d'eau douce souterraines pouvant être utilisées en période de sécheresse, leur taux de salinité augmente à mesure que la sécheresse persiste. Par ailleurs, les tempêtes et les raz-de-marée associés à El Niño submergeant parfois les îles de basse altitude, l'eau des océans pénètre alors dans les lentilles d'eau douce. En outre, l'élévation du niveau de la mer résultant du changement climatique menace de réduire la taille des lentilles d'eau douce formées sous ces atolls.

Le projet de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) du Pacifique a été lancé en 2004 [3]. Les activités prévues sur les Îles Marshall ont mis l'accent sur la mise en place d'une gestion intégrée et d'un plan de développement pour la lentille d'eau douce souterraine de Laura sur l'atoll de Majuro, où vivent 27 000 personnes (près de la moitié de la population du pays). L'objectif était d'améliorer la gestion des ressources hydriques et l'approvisionnement en eau aux alentours de la zone de Laura, et de réduire la pollution des eaux souterraines. Il s'agissait notamment de fournir des installations de traitement des eaux usées, d'assainissement, de traitement des déchets solides et de recyclage ; de réparer et d'entretenir les infrastructures d'approvisionnement en eau souterraine ; de planifier et de superviser l'utilisation des ressources hydriques et de mettre en place un plan de gestion intégrée des ressources en eau de la lentille de Laura [4].

Parallèlement à l'amélioration de la gestion des eaux souterraines, la gravité des sécheresses a mis en évidence la nécessité d'augmenter les capacités existantes en matière de stockage de l'eau et de développer d'autres ressources hydriques. Lors de la sécheresse de 2011, des travaux ont été mis en œuvre pour accroître la capacité des réservoirs. Ils ont exigé la construction de systèmes de récupération des eaux de pluie dans chaque propriété nouvelle [5].

D'après l'évaluation des besoins après une catastrophe, réalisée pour les Îles Marshall à la suite de la sécheresse de 2015–2016, cet épisode a entraîné des pertes économiques d'environ 4,9 millions de dollars US et une baisse considérable de la qualité de vie pour une grande partie de la population [2]. Bien que, comme indiqué précédemment, des efforts aient été déployés sur l'île, la sécheresse de 2015–2016 a souligné la nécessité d'améliorer la gestion des risques de catastrophes, ainsi que les capacités nationales en matière de planification et de financement, en vue de renforcer la résilience des habitants des Îles Marshall. Une meilleure intégration des pratiques traditionnelles relatives à l'utilisation de l'eau et à la sécurité alimentaire sera indispensable à l'avenir, ainsi que d'autres stratégies d'atténuation pour faire face à l'élévation des températures océaniques et du niveau de la mer.

Vietnam – The impact of drought in the Lower Mekong

The Mekong River system supports unique landscapes, rare wildlife and diverse cultures. It journeys from the heights of the Tibetan plateau, through China and Myanmar, before entering the Lower Mekong Basin (LMB) comprising Cambodia, Lao People's Democratic Republic (Lao PDR), Thailand and Vietnam's vast delta region. The Mekong Basin is home to around 70 million people, with 60 million located in the LMB [1]. Considered the 'rice bowl' of Asia, the basin is of vital importance to food production in the region and the millions of livelihoods it supports. The Mekong River is a nutrient rich system: its flows support sediment transportation vital for ecological health and the flood plain process that supports productivity, particularly in agriculture and fisheries. However, rapid development and a changing climate are altering the Mekong River. The changes imposed by nature, as well as human interventions of land-use change, urban development, dams, deforestation, overextraction of groundwater and riverbed mining, along with climate change-driven extremes such as droughts, are increasing livelihood vulnerability and the pressure on resources in the LMB.

Drought is the most significant constraint on the socioeconomic status of the Mekong Basin due to its impact on ecosystem services, with implications for well-being and livelihoods. The drought in 2016 damaged crop production and resulted in losses equal to US$300 million [2]. The current 2019 drought in Vietnam is the worst in one hundred years and consistent with future predictions showing increased probability and risk of drought in the LMB [3]. Increases in the frequency and severity of droughts are compounded by variations in the water cycle caused by changes in the timing and intensity of monsoonal rain and the influence of dams and water extraction. Variations in water availability, less predictable seasons and higher temperatures have implications for the productivity, food security and health of those living in the LMB.

Both natural and anthropocentric climatic changes, combined with water interventions, continue to influence the quantity and timing of water within the LMB. The 2016 drought in the Mekong Delta resulted in the worst recorded salinity intrusion, heavily damaging agricultural land [2]. The reduced flow at the delta mouth, allowed seawater to advance inland, damaging productivity and even rendered areas infertile. Droughts also impact the transportation of sediment, which is further amplified by dams and dykes that inhibit and alter its distribution within the LMB. If all proposed dams are constructed, it is estimated that the sediment load within the Mekong system could be reduced by 96 per cent [1]. The loss of sediment alters the relationship between the sediment deposition and the rate of erosion, leading to a potential increase in the loss of land. Overextraction of groundwater in the Mekong Delta has also resulted in land subsidence that increases the risk of salinization of land and the groundwater. The delta is also extremely low-lying and exposed to erosion from rising sea levels [4].

As a result of the anthropogenic and natural climatic changes, the Mekong Delta's river flows are becoming increasingly irregular, increasing the challenges faced and holding social, environmental and economic implications. Through multiple initiatives, IHP is assisting in finding solutions to water management challenges within its programmes on groundwater, sediment flows and climate change vulnerability mapping. In 2013, the collaborative project Solution for Groundwater Problems was launched in South Asia. IHP supported the project through its analysis and defining of the transboundary aquifer systems [5]. IHP also supported cooperation between countries to improve aquifer protection and sustainable use to address the information on shared aquifers and pollution and over extraction issues. Through the Climate change vulnerability mapping for Greater Mekong subregion case study, IHP identified countries within the Mekong basin as being highly exposed to natural hazards such as floods, droughts, and tropical cyclones and associated adverse impacts [6]. Adaptive capacity and vulnerability to the detrimental effects of climate change were mapped, producing a valuable tool for determining mitigation and adaptation measures at the provincial level for disasters such as drought.

Lastly, the recent study by the Stockholm Environment Institute and UNESCO looks to support the implementation of the IHP International Sediment Initiative [1]. The study analyses the reduction in sediment within the Mekong River that has occurred at a rate exceeding previous estimations. The study provides a knowledge base in which the implications of reduced sediment on the vital process of nutrient flow, stabilization and formation of deltas and ecosystems and production systems they support can be considered. The reduction has the potential to threaten livelihoods and is a crucial consideration within the broader context of climate change vulnerability and adaptation.



The city of Long Xuyên on the banks of the Mekong River.

La ville de Long Xuyên sur les rives du Mékong.



Housing along the Mekong River in Long Xuyên.

Logements le long du Mékong, à Long Xuyên.



Girl at the floating market.

Une fille au marché flottant.



Water collection from a well in the Mekong delta.
De l'eau est recueillie dans un puits (delta du Mékong).



Fish being sorted on the banks of the Mekong River.
Tri du poisson sur les rives du Mékong.



Fish for sale at the market.
Vente de poisson sur le marché.

Viet Nam – Les effets de la sécheresse dans le Bas-Mékong

Le fleuve Mékong abrite des espèces rares de la faune sauvage et donne vie à des paysages uniques ainsi qu'à une diversité de cultures. Prenant sa source sur les hauteurs du plateau tibétain, il traverse la Chine et le Myanmar, avant d'entrer dans son bassin inférieur, qui recouvre le Cambodge, la République démocratique populaire lao, la Thaïlande et la vaste région du delta du Viet Nam. Le bassin du Mékong abrite environ 70 millions de personnes, dont 60 millions vivent dans le bassin inférieur [1]. Considéré comme le « bol de riz » de l'Asie, le bassin est d'une importance capitale pour la production de nourriture dans la région et les millions de moyens de subsistance qu'il soutient. Le Mékong est un fleuve nourricier : son débit favorise le transport de sédiments, essentiel à la santé écologique et au système de plaines inondables qui favorise la productivité, en particulier dans les domaines de l'agriculture et de la pêche. Cependant, le développement rapide et le changement climatique transforment le fleuve. Dans le bassin inférieur du Mékong, la vulnérabilité des moyens de subsistance et la pression sur les ressources se retrouvent aggravées par un certain nombre de facteurs : les modifications imposées par la nature ; les interventions humaines de changement d'utilisation des terres, de développement urbain, de construction de barrages, de déforestation, de surextraction des eaux souterraines et d'exploitation minière du lit du fleuve ; et les événements extrêmes, tels les sécheresses, imputables au changement climatique.

La sécheresse est la principale contrainte pesant sur l'état socioéconomique du bassin du Mékong en raison de son impact sur les services écosystémiques, ce qui n'est pas sans conséquence pour le bien-être et les moyens de subsistance. La sécheresse de 2016 a endommagé les récoltes et entraîné des pertes estimées à 300 millions de dollars US [2]. La sécheresse qui touche actuellement le Viet Nam, en 2019, la plus forte jamais enregistrée en 100 ans, est conforme aux prévisions indiquant une probabilité et un risque accrus de sécheresse dans le bassin inférieur du Mékong [3]. L'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses est amplifiée par les variations du cycle de l'eau, elles-mêmes causées par la modification de la période et de l'intensité des pluies de mousson et l'influence des barrages et des activités d'extraction d'eau. La disponibilité variable de l'eau, des saisons plus difficiles à prévoir et la hausse des températures ont des répercussions sur la productivité, la sécurité alimentaire et la santé des populations vivant dans le bassin inférieur du Mékong.

Le changement climatique, aussi bien naturels qu'anthropiques, combinés aux captages d'eau, continuent d'influencer la quantité et la périodicité de cette ressource dans la région. La sécheresse qui a touché le delta du Mékong en 2016 a entraîné la pire intrusion saline jamais enregistrée, laquelle a fortement détérioré les terres agricoles [2]. La réduction du débit du fleuve dans le delta a permis à l'eau de mer de s'avancer à l'intérieur des terres, entravant ainsi la productivité et allant jusqu'à rendre les sols de certaines zones infertiles. Par ailleurs, les sécheresses influent sur le transport de sédiments, un problème aggravé par la présence de barrages et de digues qui empêchent et altèrent la distribution de ces matières au sein du bassin inférieur du Mékong. Si tous les projets de barrages voient le jour, il est estimé que la charge sédimentaire au sein du bassin du Mékong pourrait diminuer de 96 % [1]. Le déficit sédimentaire modifie la relation entre le dépôt de sédiments et le taux d'érosion, ce qui peut conduire à une perte accrue de terres. La surextraction des eaux souterraines dans le delta du Mékong a en outre engendré un affaissement du sol qui accroît le risque de salinisation des terres et des eaux souterraines. Par ailleurs, le delta est extrêmement bas et exposé à l'érosion provoquée par la hausse du niveau de la mer [4].

Du fait du changement climatique anthropiques et naturels, le débit du fleuve dans le delta du Mékong est de plus en plus irrégulier, ce qui accroît les difficultés rencontrées et s'accompagne d'incidences sociales, environnementales et économiques. Par le biais de nombreuses initiatives, le PHI aide à rechercher des solutions pour contrer les problèmes de gestion de l'eau dans le cadre de ses programmes relatifs aux eaux souterraines, aux apports sédimentaires et à la cartographie de la vulnérabilité face au changement climatique. En 2013, le projet collaboratif Solution for Groundwater Problems [Solution pour les problèmes liés aux eaux souterraines] a été lancé en Asie du Sud. Le PHI a soutenu le projet au moyen d'une analyse et d'une définition des systèmes aquifères transfrontières réalisées par ses soins [5]. Le PHI a également appuyé la coopération entre les pays pour l'amélioration de la protection et de l'utilisation durable des aquifères afin de traiter les informations sur les aquifères partagés ainsi que les problèmes de pollution et de surextraction. Dans le cadre de l'étude de cas intitulée Climate change vulnerability mapping for Greater Mekong subregion, le PHI a identifié les pays situés le long du Mékong comme durement touchés par des risques naturels majeurs tels que les sécheresses, les cyclones tropicaux et les inondations [6]. L'étude a cartographié les capacités d'adaptation et la vulnérabilité face aux incidences du changement climatique, fournissant ainsi un outil utile pour établir les niveaux des interventions d'adaptation et d'atténuation à l'échelle provinciale face à un événement tel qu'une sécheresse.

La récente étude de l'Institut de Stockholm pour l'environnement et de l'UNESCO cherche à soutenir la mise en œuvre de l'Initiative internationale relative à la sédimentation du PHI [1]. L'étude analyse la réduction des quantités de sédiments charriés par le fleuve Mékong, une baisse survenue à un rythme supérieur aux estimations antérieures. Elle fournit une base de connaissances au sein de laquelle les conséquences de la réduction de l'apport de sédiments sur le processus vital du débit de nutriments, la stabilisation et la formation de deltas et d'écosystèmes et des systèmes de production qu'ils soutiennent peuvent être pris en compte. Cette réduction, qui représente une menace pour les moyens de subsistance, ne doit surtout pas être négligée dans le contexte plus large de la vulnérabilité et de l'adaptation face au changement climatique.

California – Mitigating the socioeconomic impacts of drought

With a population of 39 million, California has one of the largest economies in the world. Population growth and urban water demand combined with increasing droughts and agricultural water use provide a significant challenge for water governance. California is often referred to as the 'salad bowl' of the United States, producing 400 agricultural commodities and two-thirds of the nation's fruits and nuts [1]. Agriculture is the key source of employment in rural areas. Agricultural workers predominantly come from low socioeconomic backgrounds and their economic stability and health are particularly vulnerable to climate change and events such as droughts [2].

Droughts have long been a part of California's climate, but the 2011–2015 drought broke records and was estimated to be the worst in 1,200 years [3], its severity increased as a result of climate change [4]. Starting in 2011, the conditions within California deteriorated, escalating from a 'drought' to an 'extreme drought' into the 'exceptional drought' category [5]. The severe lack of water undermined the social, economic and environmental systems that had developed around its availability in California. The increased pumping of groundwater mitigated some of the drought impact, yet it resulted in groundwater deficits and land subsidence and was not a sustainable solution. Agriculture, being widely reliant on irrigation, was hit hard by water scarcity and considerable increases in pumped water costs, resulting in a 45 per cent increase in unutilized farmland [6]. High costs combined with decreased crop yields resulted in 21,000 jobs being lost and economic losses of US$2.74 billion, not including losses in ecosystem services [5].

The impacts of the drought on communities were not uniform. Among low-income tribal groups and minorities, the burden of the drought was far greater due to sensitivities to increased food and water prices. In the rural communities most acutely affected, the drought impacted human health and water and food security [7], while in urban areas, the impacts were primarily limited to enforced water restrictions. The hot, dry conditions of the drought contributed to the severity of the Californian wildfires [8], including the Valley and Butte fires of 2015 that rank among the most devastating in the state's history and that each resulted in a declaration of a state of emergency. The two fires resulted in six fatalities and the loss or damage of an estimated 2,876 homes and businesses [9].

The drought revealed significant vulnerabilities within the current water management regime, threatening the agricultural sector, ecosystems and urban water resources. In 2014, the California Water Action Plan was released in response to the extreme drought. The plan acknowledged that California's water management practices were unable to meet both human and ecological water needs [10]. The action plan was holistic, incorporating governance at the federal, state, local and tribal levels and considering industry and NGOs' involvement. Importantly, it led to an improved planning approach that incorporates the uncertain effects of climate change and other major risks.

The Decision Scaling Vulnerability Assessment tool helps decision makers deal with uncertainties and understand vulnerabilities within the water management system, quantifying status quo management costs and risks compared to different adaptation scenarios. The tool is particularly useful for addressing uncertainties in climate change projections as it evaluates changes in temperature and precipitation over different climate scenarios and their potential impacts at different spatial scales. Importantly, the bottom-up approach improves the identification of vulnerabilities at a local scale, which are then aggregated into regional and state-wide scales.

The monitoring system provides information on a range of water management aspects aligned with pivotal decision-making points throughout the year, allowing decision makers to mitigate and adapt to potential water scarcities [11]. The incorporation of urban, irrigation and environmental water demands, supports a balance between these competing needs. The monitoring of river flow metrics allows for environmental water requirements to be better understood in different climatic conditions, supporting water allocation adjustments to counter saltwater intrusion, which impacts both farms and ecosystems.

Recent technological innovations, such as the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite system, have provided new information on groundwater trends and availability, which can be integrated into future models. Furthermore, the 2014 California Water Action Plan addresses the increasing demands on water resources through raising awareness of water conservation as a 'way of life'. This has been implemented in public campaigns such as Save our Water, aimed at changing behaviours around water uses. Through this holistic and comprehensive approach to management, California is building knowledge and implementing actions that can support sustainable solutions to water management in the Anthropocene.



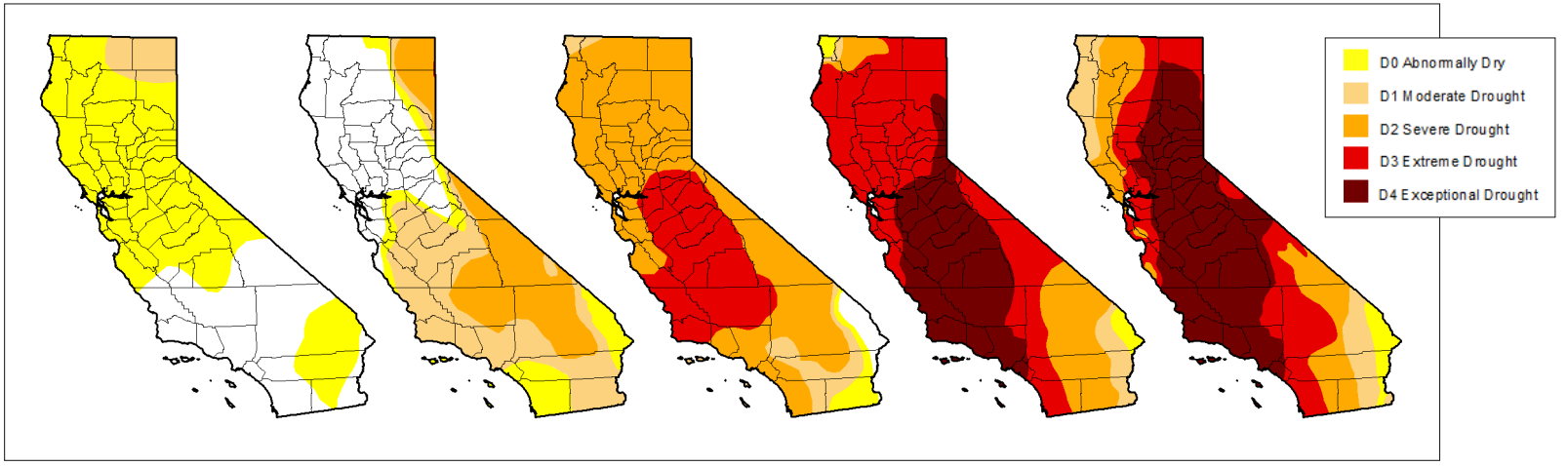
Aerial view of Folsom Lake at near full levels.
Vue aérienne du lac Folsom (niveau d'eau quasi maximal).



Aerial view of Folsom Lake in the 2015 drought.
Vue aérienne du lac Folsom lors de la sécheresse de 2015.



An irrigation channel next to a growing crop in Brawley, California.
Un canal d'irrigation installé près de cultures à Brawley (Californie).



The progression of drought in California from 2011 to its peak in 2015.

La progression de la sécheresse en Californie, de 2011 à son pic en 2015.



Save Our Water's "Fix It for Good" campaign leaflets.

Dépliants de la campagne « Fix it for Good » de Save Our Water.



Space for boats become cramped as Lake Oroville recedes.

L'espace accueillant des bateaux diminue lors des baisses du niveau d'eau du lac d'Oroville.

Californie – Atténuer les conséquences socioéconomiques de la sécheresse

Avec une population de 39 millions d'habitants, la Californie constitue l'une des plus grandes économies du monde. La croissance démographique et la demande d'eau dans les villes, combinées à la hausse des sécheresses et de l'utilisation de l'eau à des fins agricoles, constituent un défi de taille en matière de gouvernance de l'eau. La Californie est souvent désignée comme le « saladier » des États-Unis, produisant 400 produits agricoles différents et représentant les deux tiers de la production nationale de fruits et de fruits à coque [1]. L'agriculture est la principale source d'emploi dans les zones rurales. Les travailleurs agricoles viennent essentiellement de milieux socioéconomiques très modestes et leur santé et stabilité économiques sont particulièrement vulnérables face au changement climatique et aux événements tels que les sécheresses [2].

Si les sécheresses sont depuis longtemps partie intégrante du climat de la Californie, celle qui s'est produite de 2011 à 2015 a battu des records, jusqu'à être considérée comme la pire jamais enregistrée en 1 200 ans [3]. Par ailleurs, sa gravité s'est accrue en raison du changement climatique [4]. À compter de 2011, les conditions météorologiques de la Californie se sont détériorées. L'État est passé d'une « sécheresse » à une « sécheresse extrême », laquelle a ensuite pris le statut de « sécheresse exceptionnelle » [5]. Le grave manque d'eau a affaibli les systèmes sociaux, économiques et environnementaux qui s'étaient développés autour de sa disponibilité en Californie. Si le pompage accru eaux souterraines a atténué certains des effets de la sécheresse, il a cependant engendré des déficits de ces ressources ainsi qu'un affaissement du sol, et ne constituait pas une solution durable. L'agriculture, fortement tributaire de l'irrigation, a été durement touchée par la pénurie d'eau et la hausse considérable du prix de l'eau pompée ; en conséquence, la proportion de terres agricoles inutilisées a augmenté de 45 % [6]. Les coûts élevés combinés à la baisse de rendement des récoltes ont engendré la perte de 21 000 emplois et des pertes économiques s'élevant à 2,74 milliards de dollars US, sans inclure les pertes de services écosystémiques [5].

Les conséquences de la sécheresse sur les communautés ne sont pas uniformes. Parmi les minorités et les groupes tribaux, la charge de la sécheresse s'est révélée bien plus forte en raison de leurs sensibilités à la hausse des prix de la nourriture et de l'eau. Dans les communautés rurales les plus sévèrement touchées, la sécheresse a eu des conséquences néfastes sur la santé humaine tout comme sur la sécurité hydrique et alimentaire [7], alors que dans les zones urbaines, les impacts se sont principalement limités à des restrictions imposées à l'utilisation de l'eau. La chaleur et l'aridité associées à la sécheresse ont contribué à une aggravation des incendies en Californie [8], comme l'ont montré les incendies de Valley et Butte en 2015, classés parmi les plus dévastateurs de l'histoire de l'État, et qui ont chacun conduit les autorités à déclarer l'état d'urgence. Ces deux incendies ont provoqué six décès, et la perte ou la détérioration d'environ 2 876 logements et entreprises [9].

La sécheresse a mis au jour d'importantes vulnérabilités au sein du régime actuel de gestion de l'eau, menaçant le secteur agricole, les écosystèmes et les ressources en eau des villes. En 2014, le California Water Action Plan [plan d'action en faveur de l'eau pour la Californie] a été lancé en réponse à la sécheresse extrême. Ce plan a reconnu que les pratiques de gestion de l'eau de l'État n'étaient pas en mesure de répondre aux besoins à la fois humains et écologiques en matière d'eau [10]. Ce plan d'action global a intégré une gouvernance aux échelles fédérale, étatique, locale et tribale, tout en tenant compte de la participation de l'industrie et des ONG. Qui plus est, il a permis d'améliorer l'approche de planification qui tient compte des effets incertains du changement climatique et d'autres risques majeurs.

L'outil Decision Scaling Vulnerability Assessment [évaluation de la vulnérabilité pour l'échelonnement des décisions] aide les décideurs à gérer les incertitudes et à comprendre les vulnérabilités au sein du système de gestion de l'eau, en quantifiant les coûts de gestion et les risques actuels par rapport aux différents scénarios d'adaptation. Cet outil est particulièrement utile pour traiter certaines incertitudes dans les prévisions en matière de changement climatique, en cela qu'il évalue les variations de températures et de précipitations d'après différents scénarios climatiques et leurs conséquences potentielles à des échelles spatiales distinctes. Plus important encore, l'approche ascendante permet une meilleure définition des vulnérabilités à l'échelle locale, lesquelles sont ensuite agrégées aux échelles régionale et étatique.

Le système de suivi fournit des informations sur l'ensemble des aspects liés à la gestion de l'eau alignés sur des prises de décisions majeures tout au long de l'année, permettant ainsi aux décideurs d'atténuer les pénuries d'eau potentielles et de s'y adapter [11]. L'intégration des demandes en eau pour les villes, l'irrigation et l'environnement favorise un équilibre entre ces besoins concurrents. Le suivi des mesures du débit des rivières permet de mieux comprendre les besoins environnementaux en matière d'eau dans différentes conditions climatiques, facilitant ainsi les ajustements de l'attribution d'eau pour contrer l'intrusion d'eau saline, laquelle a des effets à la fois sur les exploitations agricoles et les écosystèmes.

Les innovations technologiques récentes, telles que le système satellite Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), ont fourni de nouvelles informations sur les tendances et la disponibilité des eaux souterraines, qui peuvent être intégrées à de futurs modèles. Par ailleurs, le California Water Action Plan de 2014 traite les demandes croissantes exercées sur les ressources en eau en sensibilisant à l'adoption d'un « mode de vie » sensible à la préservation de l'eau. Ce système a été mis en œuvre dans le cadre de campagnes de sensibilisation publiques telles que Save our Water [Économisez notre eau], destinées à faire changer les comportements à l'égard de l'utilisation de l'eau. Par le biais de cette approche holistique et exhaustive de la gestion, la Californie consolide ses connaissances et met en place des mesures susceptibles de soutenir des solutions durables en matière de gestion de l'eau à l'ère de l'Anthropocène.

United Kingdom – Understanding the complexities of drought

While the UK is generally regarded as a wet country, some parts are dry, experience intensive water exploitation and can already be considered water stressed. The continuing vulnerability of the UK to drought has been demonstrated in recent years. In 2012, the country was hit by a serious drought amounting to the driest spring in over a century, following two dry winters [1]. Again, in summer 2018, parts of England and Wales hardly experienced rain for months and between May 2018 and April 2019, most areas of the country received below-average rainfall [2]. Shifting rainfall frequency and rainfall patterns, along with the effects of climate change, have made it difficult to accurately predict the occurrence, duration and intensity of drought events, as well as to minimize their impacts [3]. Increasing demand and over-abstraction of water to meet the needs of industry, agriculture and a growing population put even more pressure on freshwater resources, posing a serious challenge for water management.

Traditionally, the meteorological and societal causes of drought and water shortages were considered in isolation in the UK. However, recent drought events have made their interconnectedness highly visible and widely acknowledged in the UK [4]. Taking this into account, researchers have called for a more integrated approach to understanding the multifaceted nature of water shortages and how to predict, prepare for and mitigate the effects. The UK Droughts & Water Scarcity research programme, a five-year interdisciplinary programme, was launched in 2014 [3]. It includes a number of partners from research institutions across the UK, with the aim of supporting improved decision-making in relation to droughts and water scarcity by providing research that identifies, predicts and responds to the interrelationships between multiple drivers and impacts. The programme is divided into four projects – Historic Droughts, IMPETUS, MaRIUS and DRY – and a knowledge exchange follow-on called ENDOWS. Together, the distinctive project has set out to address three major scientific goals: (1) Characterize the drivers and nature of droughts and water scarcity; (2) Examine the multiple and inter-linked impacts of UK droughts and water scarcity on the environment, agriculture, infrastructure, society and culture and the trade-offs between them; (3) Develop methods to support decision-making for drought and water scarcity planning and management, and to assess opportunities to reduce their occurrence and severity [3].

One of the key characteristics of the droughts programme has been its emphasis on supporting decision-making through co-development of research outputs with stakeholders engaged in UK drought management. This has led to a number of key transformations in UK drought and water resources management. One important outcome of the programme has been the UK Drought Portal, a tool to help visualize the current meteorological conditions across the country [5]. The portal can be used to understand the severity and magnitude of drought at different spatial scales across the UK over the past half century through interactive maps and graphics. The portal provides an assessment of drought severity based on a single precipitation data set and one particular indicator (the Standardized Precipitation Index, SPI). The portal was used extensively by water managers (including private water utilities, regulators and agricultural and conservation organizations) during the 2018–2019 drought episode, which helped put the emerging situation in a historical context, thereby providing key information to support drought management actions.

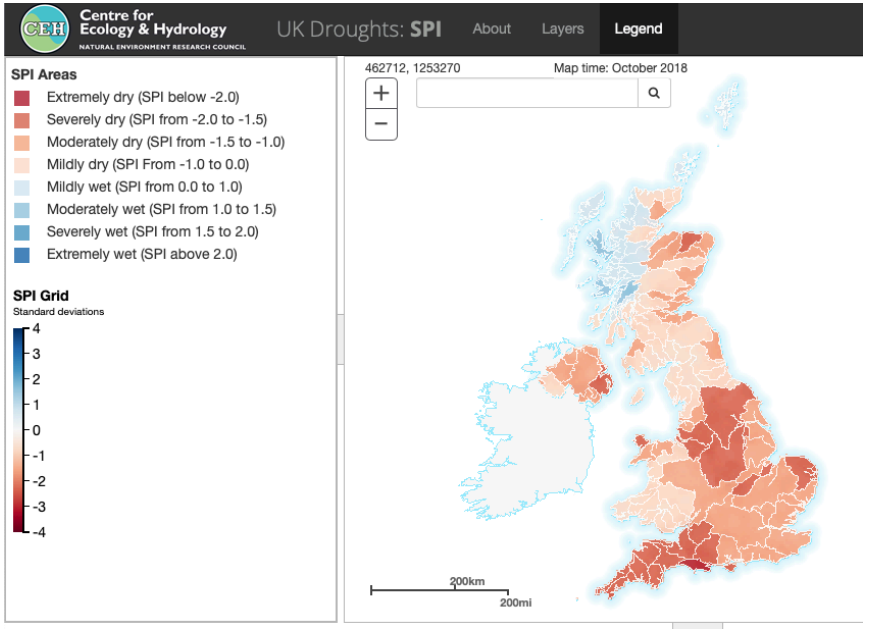
More recently, a more comprehensive monitoring and early warning tool has been co-developed alongside regulators and water companies, namely the UK Water Resources Portal [6]. This has the same functionality as the Drought Portal but also covers river flows, including daily updated real-time information and soil moisture, using a network of in situ real-time and wide-area soil moisture observation stations (COSMOS-UK). The forecasting work from within the programme was also used to help stakeholders during the 2018–2019 drought.

Another key transformational area is long-term drought planning. The Historic Droughts and MaRIUS projects, in particular, have delivered comprehensive national data sets of past drought severity and potential future drought risk under climate change and have also delivered major advances in national-scale hydrological and water supply system modelling. Within ENDOWS, the teams have been working closely alongside water companies and regulators to embed these data sets and tools into the process for the next round of water resource planning, especially in helping pave the way for the more improved regional to national-scale planning that is currently being adopted. The scientific advances which have been made in relation to drought in the UK over recent years are closely aligned with the IHP-VIII Themes of “Water-Related Disasters and Hydrological Changes” and “Addressing Water Scarcity and Quality”. UK researchers have engaged with drought experts across the world through the IHP-FRIEND programme in order to share scientific knowledge and solutions.

Drought impacts in Redmires Reservoir, Sheffield.
Impacts de la sécheresse dans les réservoirs de Redmires (Sheffield).







The UK Drought Portal visualizing meteorological conditions across the UK through interactive maps and graphs.

Le portail britannique sur la sécheresse visualise les conditions météorologiques à travers le Royaume-Uni à l'aide de cartes et de graphiques interactifs.



Low levels in Howden Reservoir (Derwent Valley, Derbyshire) during the 2018 drought.

Faibles niveaux d'eau dans le réservoir de Howden (vallée de la Derwent, Derbyshire) pendant la sécheresse de 2018.

Royaume-Uni – Comprendre les complexités de la sécheresse

Bien que le Royaume-Uni soit généralement considéré comme un pays humide, certaines parties de son territoire sont sèches, enregistrent une exploitation intensive de l'eau et peuvent déjà être considérées en situation de stress hydrique. La vulnérabilité persistante du Royaume-Uni face à la sécheresse a été démontrée ces dernières années. En 2012, le pays a été touché par une grande sécheresse qui lui a fait connaître le printemps le plus sec depuis plus d'un siècle, après deux hivers frappés par la sécheresse [1]. À nouveau, durant l'été 2018, certaines régions d'Angleterre et du pays de Galles n'ont enregistré que très peu de précipitations sur plusieurs mois et, entre mai 2018 et avril 2019, les précipitations de la majeure partie du pays étaient inférieures à la moyenne [2]. La modification de la fréquence et du régime des précipitations, associée aux effets du changement climatique, fait qu'il est difficile de prévoir précisément la survenue, la durée et l'intensité des épisodes de sécheresse et de minimiser leurs impacts [3]. La demande croissante en eau et la surexploitation des ressources hydriques pour satisfaire les besoins de l'industrie, de l'agriculture et de l'accroissement démographique exercent une pression encore plus importante sur les ressources en eau douce, ce qui constitue un défi de taille quant à la gestion de l'eau.

Historiquement, les causes météorologiques et sociétales des sécheresses et des pénuries d'eau au Royaume-Uni étaient étudiées de manière isolée. Toutefois, les récents épisodes de sécheresse ont permis de mettre en lumière et de largement reconnaître leur interdépendance au niveau national [4]. Ceci étant, les chercheurs ont appelé à mettre en œuvre une approche plus intégrée pour comprendre le caractère multidimensionnel des pénuries d'eau et savoir comment prédire leurs effets, s'y préparer et les atténuer. De cet appel, est né le projet de recherche britannique Droughts & Water Scarcity, un programme interdisciplinaire sur cinq ans, lancé en 2014 [3]. Il implique différents partenaires issus d'instituts de recherche de l'ensemble du Royaume-Uni et vise à soutenir l'amélioration de la prise de décisions liées à la lutte contre les sécheresses et les pénuries d'eau en fournissant des travaux de recherche qui identifient et prédisent les corrélations entre les différents facteurs et impacts et permettent d'y répondre. Le programme se compose de quatre projets (Historic Droughts, IMPETUS, MaRIUS et DRY), ainsi que d'un projet de suivi d'échange de connaissances intitulé ENDOWS. Ensemble, les différents projets visent à atteindre les trois principaux objectifs scientifiques suivants : (1) Définir les facteurs et la nature des sécheresses et des pénuries d'eau ; (2) Examiner les impacts multiples et interdépendants des sécheresses et des pénuries d'eau au Royaume-Uni sur l'environnement, l'agriculture, les infrastructures, la société et la culture, ainsi que les compensations qui s'opèrent entre eux ; (3) Elaborer des méthodes liées à la planification et à la gestion face aux sécheresses et aux pénuries d'eau pour soutenir la prise de décisions et pour évaluer les possibilités de réduction de leur fréquence et de leur gravité [3].

Le programme de lutte contre la sécheresse consiste essentiellement à soutenir la prise de décisions en produisant des résultats de recherche en collaboration avec des parties prenantes impliquées dans la gestion de la sécheresse au Royaume-Uni. Ce travail a permis de nombreuses transformations dans la manière de gérer la sécheresse et les ressources en eau au Royaume-Uni. L'un des résultats majeurs du programme a été la création du portail UK Drought Portal, un outil facilitant la visualisation des conditions météorologiques actuelles à travers tout le pays [5]. Grâce à ce portail et aux cartes et graphiques interactifs qu'il propose, il est possible d'évaluer la gravité et l'ampleur de la sécheresse à différentes échelles spatiales à travers tout le Royaume-Uni, et ce, sur les cinquante dernières années. Le portail permet de déterminer la gravité de la sécheresse à partir d'un seul ensemble de données relatives aux précipitations et d'un indicateur unique (l'indice normalisé des précipitations, SPI). Le portail a été largement utilisé par les gestionnaires des services d'approvisionnement en eau (y compris les compagnies des eaux privées, les organes régulateurs, les organisations agricoles et les organismes de conservation) lors de l'épisode de sécheresse de 2018–2019, ce qui a aidé à replacer la situation émergente dans un contexte historique et à fournir des informations essentielles pour étayer la gestion de la sécheresse.

Plus récemment, l'outil de suivi et d'alerte rapide plus complet UK Water Resources Portal a été développé conjointement avec des organes régulateurs et des compagnies des eaux [6]. Celui-ci offre les mêmes fonctionnalités que le portail UK Drought Portal, à la différence qu'il couvre également les cours d'eau, avec notamment des informations en temps réel mises à jour quotidiennement, et l'humidité des sols grâce à un réseau de stations d'observation in situ qui transmet des informations en temps réel et des données sur l'humidité des sols d'une grande partie du territoire (COSMOS-UK). En outre, les prévisions établies dans le cadre du programme ont aidé les parties prenantes durant la sécheresse de 2018–2019.

Le programme a aussi permis d'opérer une transformation importante, à savoir planifier les sécheresses à long terme. Les projets Historic Droughts et MaRIUS en particulier ont fourni des ensembles de données nationaux complets sur la gravité des précédents épisodes de sécheresse et sur les futurs risques potentiels de sécheresse liés au changement climatique. De plus, ils ont permis d'accomplir des progrès majeurs dans la modélisation des systèmes hydrologiques et d'approvisionnement en eau à l'échelle nationale. Dans le cadre du projet ENDOWS, les équipes ont collaboré étroitement avec les compagnies des eaux et les organes régulateurs pour intégrer ces ensembles de données et ces outils au processus du prochain cycle de planification des ressources en eau, principalement pour faciliter la mise en œuvre de la planification régionale et nationale améliorée qui est actuellement adoptée. Les avancées scientifiques enregistrées ces dernières années en matière de sécheresse au Royaume-Uni sont étroitement liées aux thèmes du PHI-VIII « Catastrophes liées à l'eau et changements hydrologiques » et « Faire face aux pénuries d'eau et améliorer la qualité de l'eau ». Les chercheurs britanniques sont entrés en contact avec d'autres spécialistes internationaux de la sécheresse par le biais du programme IHP-FRIEND afin d'échanger des connaissances scientifiques et de proposer des solutions.

The Caribbean – Navigating through changing risks

The Caribbean is a diverse region, varying from flat low-lying islands to mountainous terrain with peaks up to 3,000 metres above ground [1]. Over 40 million people live in the region and the mix of economies, languages and cultures reflects the colonial and political histories of the various states and territories [1]. The well-being of the people living here is closely linked to the natural environment, as most economies heavily depend on tourism and small-scale agriculture and fisheries. Water scarcity in the Caribbean islands is an increasing problem, growing with the expansion of the tourism industry, population growth, urbanization and ineffective water management and strategies. Existing problems will likely be exacerbated by increasing variability in rainfall events and increasing temperatures.

The history of droughts in the Caribbean reveals wide-reaching social and economic impacts across sectors. Since the 1950s, at least seven major droughts have occurred in the Caribbean, including the two most recent events in 2009–2010 and 2014–2016 [2]. During 2009 and the first quarter of 2010, the Bahamas and the Cayman Islands obtained a significant portion of their water supplies from desalination plants [3]. In Antigua, the main supply reservoir was empty by March 2010, and groundwater levels in Barbados reached extremely low levels [3]. Carriacou – an island belonging to Grenada that relies exclusively on rainwater to meet its water needs – had to have water brought by tankers from the main island, in spite of shortages also occurring there [4]. The 2014–2016 Caribbean drought was even more severe: the most extensive period of dry conditions on record in seven territories [5]. It reduced agricultural production and contributed to destructive bush fires and residential water shortages.

Climate change predictions for the region indicate that the frequency and intensity of drought will increase in the future due to an overall decrease in annual rainfall and increased temperature and evapotranspiration [6]. Saltwater intrusion associated with sea level rise and the impact of hurricanes will also reduce the quantity and quality of fresh water in coastal aquifers [2]. These changes will likely result in a decrease of ecosystem services and increased risks for wildlife, human health, agriculture and socioeconomic development in the Caribbean [2]. The combined impacts of variability and changes will pose unprecedented water-related threats to the region and addressing drought represents a critical part of the region's adaptation to climate change.

Assessments following the 2009–2010 drought uncovered several important capacity issues, including limits in early warning systems and information-sharing between key stakeholder institutions, inadequate policies and plans and limited finances to implement and sustain key activities [5]. The assessments highlighted the need to assess risks and vulnerabilities and to incorporate this information into the development of planning and drought management strategies on an ongoing basis instead of as a one-off exercise, and also highlighted the need to develop Water Safety Plans [7]. The Global Environment Facility (GEF) project on Integrating Watershed and Coastal Area Management (IWCAM) for the Small Island Development States of the Caribbean project, concluded in 2016, raised the profile of integrated water resources management (IWRM) in the region through demonstration projects and specific interventions including the preparation of IWRM road maps [1]. Desalination is widespread throughout the Caribbean, being used on 14 islands. Thanks to the increasing tendency to promote desalination as part of the solution to address water insecurity, there is growing interest in small-scale desalination plants that use renewable energy, like the one installed on the island of Bequia [1].

Significant progress has also been made in monitoring, forecasting and mitigation, such that by the 2014–2016 drought, the region was better prepared. The Latin American and Caribbean (LAC) Drought Atlas produced by IHP visualizes expected rainfall and has helped identify the frequency and exposure of meteorological droughts [8]. IHP has also organized a training activity to develop and enhance sub-seasonal to seasonal forecast capacity of the midsummer drought in the region

The Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology (CIMH) has developed the first Caribbean regional drought monitor, a sectoral early warning information system across climate timescales aimed at providing climate early warning information tailored to specific user needs. As a result of the lessons learned and implemented after the drought of 2009–2010, the region was much better prepared for the 2014–2016 event [5]. The development and improvement of the Caribbean Drought and Precipitation Monitoring Network continues to make a positive contribution to forecasting and preparedness in the region and the Caribbean Drought Bulletin has been published monthly since December 2018, providing information about the current status of the drought situation [9].



Shirley Heights in Antigua and Barbuda.
Shirley Heights (Antigua-et-Barbuda).



Valle de Viñales, Cuba.
Valle de Viñales (Cuba).



Port of Cayo Blanco, Cuba.
Port de Cayo Blanco (Cuba).





Drought impacts on Saint Martin.
Impacts de la sécheresse à Saint-Martin.



Belize.
Bélize.

Caraïbes – Composer avec des risques changeants

La région des Caraïbes est un territoire diversifié qui alterne entre des îles basses de faible altitude et des terres montagneuses pouvant culminer à 3 000 mètres d'altitude [1]. Plus de 40 millions de personnes vivent dans cette région et la diversité des économies, des langues et des cultures reflète l'histoire coloniale et politique des différents États et territoires [1]. Le bien-être des populations de la région est étroitement lié au milieu naturel, la plupart des économies dépendant largement du tourisme et des activités d'agriculture et de pêche à petite échelle. La pénurie d'eau sur les îles des Caraïbes constitue un problème grandissant entraîné par l'expansion de l'industrie du tourisme, la croissance démographique, l'urbanisation, et la gestion et les stratégies inefficaces liées aux ressources en eau. Il est en outre probable que la variabilité accrue des précipitations et la hausse des températures viennent accentuer les problèmes existants.

Les précédents épisodes de sécheresse dans la région des Caraïbes ont généré des impacts sociaux et économiques de grande ampleur dans tous les secteurs. Depuis les années 1950, pas moins de sept grandes sécheresses ont été enregistrées dans la région des Caraïbes. Les deux plus récentes ont eu lieu sur des périodes allant de 2009 à 2010 et de 2014 à 2016 [2]. Au cours de l'année 2009 et du premier trimestre de l'année 2010, les Bahamas et les îles Caïmanes dépendaient d'usines de dessalement pour fournir une grande partie de leur eau potable [3]. À Antigua, le principal réservoir d'approvisionnement en eau était vide en mars 2010, tandis qu'à la Barbade, les nappes phréatiques avaient atteint des niveaux extrêmement bas [3]. Les habitants de Carriacou, une île de la Grenade dépendant exclusivement des précipitations pour satisfaire ses besoins en eau, ont été contraints de se faire livrer de l'eau par camions-citernes depuis l'île principale, en dépit de la pénurie qui y sévissait également [4]. La sécheresse qui s'est abattue sur les Caraïbes de 2014 à 2016 a été encore plus grave ; il s'agit de la plus longue période de sécheresse jamais connue dans sept territoires [5]. Celle-ci a ralenti la production agricole et a contribué à la survenue de feux de forêt dévastateurs et de pénuries d'eau à l'échelle des ménages.

Les prévisions relatives au changement climatique dans la région indiquent une augmentation à venir de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse qui serait due à une diminution globale des précipitations annuelles et à une hausse des températures et de l'évapotranspiration [6]. Par ailleurs, l'intrusion saline engendrée par la hausse du niveau de la mer et le passage d'ouragans réduiront la quantité et la qualité de l'eau douce disponible dans les aquifères côtiers [2]. Ces changements sont susceptibles d'entraîner un appauvrissement des services écosystémiques et une augmentation des risques pour l'agriculture, la santé humaine, la vie sauvage et le développement socioéconomique des Caraïbes [2]. Les effets combinés de la variabilité et des changements constitueront une menace sans précédent pour les ressources en eau de la région, et l'adaptation au changement climatique passera inévitablement par la lutte contre la sécheresse.

Les évaluations entreprises à la suite de la sécheresse de 2009–2010 ont mis au jour plusieurs lacunes importantes en matière de capacités. On peut par exemple citer les limites des systèmes d'alerte rapide et de l'échange d'informations entre les principales institutions impliquées, l'inadéquation des politiques et des programmes et le manque de ressources financières pour mettre en œuvre les activités les plus importantes et les maintenir [5]. Ces évaluations ont souligné le besoin d'évaluer les risques et les vulnérabilités et de prendre en compte ces informations dans la planification et l'élaboration des stratégies de gestion des sécheresses de façon continue plutôt que ponctuelle. Elles ont également mis en lumière la nécessité d'élaborer des plans de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau [7]. Le projet du Fonds pour l'environnement mondial (FEM) relatif à la gestion intégrée des bassins versants et des zones côtières pour les petits États insulaires en développement des Caraïbes, achevé en 2016, a mis en avant la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans la région au moyen de projets pilotes et d'interventions spécifiques, telles que l'élaboration de feuilles de route sur la GIRE [1]. Le dessalement est un moyen d'approvisionnement en eau largement employé dans les Caraïbes (14 îles y ont recours). Du fait de la tendance croissante à proposer le dessalement comme l'une des solutions au problème d'approvisionnement en eau, on constate un intérêt grandissant pour les usines de dessalement à petite échelle alimentées par des énergies renouvelables, à l'image de l'installation mise en place sur l'île de Bequia [1].

Des progrès considérables ont aussi été enregistrés en matière de suivi, de prévision et d'atténuation, de sorte que la région était mieux préparée pour faire face à la période de sécheresse qui s'est étalée de 2014 à 2016. L'Atlas de la sécheresse en Amérique latine et dans les Caraïbes élaboré par le PHI permet de visualiser les précipitations attendues et a contribué à définir la fréquence des sécheresses météorologiques et le niveau d'exposition à celles-ci [8]. Par ailleurs, le PHI de l'UNESCO a organisé des activités de formation en vue de renforcer les capacités de prévisions sous-saisonnières à saisonnières de la sécheresse qui sévit dans la région durant les mois d'été.

L'Institut de météorologie et d'hydrologie des Caraïbes a mis au point le premier système de surveillance de la sécheresse de la région des Caraïbes, un système sectoriel d'alerte rapide et d'information sur différentes périodes climatiques qui vise à fournir des informations d'alerte rapide sur les conditions climatiques adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs. Grâce aux enseignements tirés et mis en œuvre après la sécheresse survenue de 2009 à 2010, la région était bien mieux préparée pour faire face au même phénomène de 2014 à 2016 [5]. La création et l'amélioration du réseau de suivi des sécheresses et des précipitations des Caraïbes continuent de contribuer de façon positive à la prévision des événements climatiques dans la région et à la préparation à ces événements. Par ailleurs, le bulletin de sécheresse des Caraïbes est publié tous les mois depuis décembre 2018, fournissant ainsi des informations sur les conditions de sécheresse actuelles [9].

Chile – The Mega Drought

Lake Aculeo was once an important lake in the city of Paine outside of Santiago, Chile, serving as a popular area for recreation and as the main water source for many small-scale farmers. However, increased water extraction for agricultural use and growing urban land-use put great pressure on the lake [1]. A record-breaking drought started in 2011 and the water level started to sink dramatically. Today Lake Aculeo is no more.

Entering its ninth year, the current drought in Chile is rightfully named 'the Mega Drought', the longest drought Chile has seen over the last millenniums [2]. Chile has a diverse landscape, with a coastline stretching 6,435 km along the Pacific Ocean in the west, the great Andes Mountains in the east, and the Atacama Desert in the north. Since 2010, the country has experienced an uninterrupted period of dry years with mean rainfall deficits of 20–40 per cent [2]. Of the 18 million people living in the country, about 70 per cent live in drought-prone areas of Central Chile. The socioeconomic and political consequences of the drought have been widespread. Lack of access to potable water in affected areas has resulted in failed crop harvests, forcing many farmers to sell off livestock, give up their livelihoods and relocate. The natural environment is also suffering with adverse impacts on vegetation and increased occurrence of forest fires, negatively affecting the tourism industry that is built around the Chilean natural environment.

The drought has been ascribed to both natural and anthropogenic causes. El Niño Southern Oscillation (ENSO) is the major driver of inter-annual precipitation variability in Central Chile. ENSO comprises a warm phase (El Niño), a cold phase (La Niña) and a neutral phase [3]. La Niña usually results in drier-than-average conditions, but the current drought period has included both La Niña and El Niño years. The drought has also coincided with a cold phase known as the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [2]. PDO is a recurring ocean-atmosphere climate variability pattern taking place over the mid-latitude Pacific basin and a cold phase is associated with less rainfall in Central Chile. However, the precipitation deficit that has occurred in Chile falls well below what would be expected [2]. Therefore, taking internal variability, ENSO and PDO into consideration, there is a strong argument that anthropogenic climate change is partly to blame for the present Mega Drought. This means that both natural variabilities and anthropogenic forcing are contributing to sustained drought conditions in Chile, which significantly complicate the ability to predict drought and other hydrological events.

The Chilean Agroclimatic Observatory was launched in June 2013 in close collaboration with the Chilean Ministry of Agriculture and in coordination with IHP, the Food and Agriculture Organization (FAO), Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) and the International Research Institute for Climate and Society (IRI) [4]. The observatory is a collection of maps and other figures that monitors present drought conditions. It provides near-future seasonal forecasts and allows users to put the current droughts into a historical context [5].

The observatory also hosts the LAC Drought Atlas, a tool that allows users to visualize drought exposure by identifying both the variability of rainfall deficits and how this climatic variability differs spatially within the country, even at short distances. The drought observatory also offers a range of other tools for analysis, such as near-real-time observed precipitation, snowfall and river discharge and a combined drought index. The Chilean Vulnerability Atlas has also been integrated and utilizes 13 indicators considering environmental, productive and socioeconomic factors to identify the communities that are more vulnerable to drought impacts. The atlas also considers the adaptability of a population in terms of the utilization of new technologies and production diversification.

On the ground, water harvesting, rainfall retention and aquifer recharge programmes such as UNESCO's Global Network on Water and Development Information for Arid Lands in Latin America and Caribbean (G-WADI LAC) has been of high importance to secure potable water for many communities [6]. G-WADI LAC aims to strengthen local water management capacity by using a combination of rainwater harvesting techniques such as rooftop catchments with fog harvesting technology, greywater recycling and artificial aquifer recharging, as well as educating the population. Furthermore, to support the identification of potential climate change impacts on water resource availability, CRIDA has been performed for the Limari river basin in Chile as a case study on how climate change information can be used for decision-making at the watershed scale [7].



Village of Machuca.
Village de Machuca.



Atacama desert.
Désert d'Atacama.

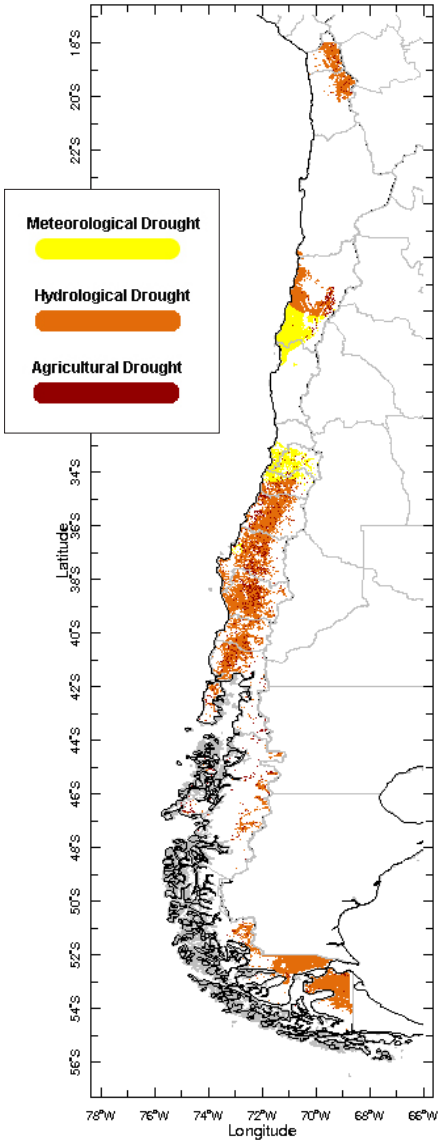


Dry reservoir in Chile.
Réservoir à sec au Chili.



Lake Aculeo changes in water extent between 2014 and 2019.

Évolution de la superficie des eaux du lac Aculeo entre 2014 et 2019.



The Latin American and Caribbean Drought Atlas showing a combined map of agricultural, hydrological and metrological drought 2017.

L'Atlas de la sécheresse en Amérique latine et dans les Caraïbes présentant une carte combinée de la sécheresse agricole, hydrologique et métrologique (2017).

Chili – Une sécheresse sans précédent

Le lac Aculeo était autrefois un point d'eau important de la commune de Paine, à la périphérie de la ville de Santiago, au Chili, ainsi qu'un lieu de détente prisé de la population et la principale source d'approvisionnement en eau pour de nombreux petits exploitants agricoles. Cependant, l'extraction croissante d'eau à des fins agricoles et l'intensification de l'urbanisation ont exercé une forte pression sur le lac [1]. Une sécheresse historique, débutée en 2011, a entraîné la baisse spectaculaire du niveau de l'eau. Depuis, le lac Aculeo a disparu.

Neuf ans après, l'épisode de sécheresse au Chili continue. Baptisée à juste titre « la mégasécheresse », cette période de sécheresse est la plus longue que le pays n'ait jamais connue au cours des derniers millénaires [2]. Le Chili englobe des paysages très variés, avec un littoral de 6 435 km le long de l'océan Pacifique à l'ouest, la cordillère des Andes à l'est et le désert d'Atacama au nord. Depuis 2010, le pays connaît une période ininterrompue d'années sèches avec un déficit pluviométrique moyen de 20 à 40 % [2]. Sur les 18 millions d'habitants que compte le Chili, près de 70 % vivent dans des zones menacées de sécheresse au centre du pays. Les répercussions socioéconomiques et politiques de la sécheresse sont innombrables. Le manque d'accès à l'eau potable dans les zones touchées a engendré de mauvaises récoltes, obligeant de nombreux agriculteurs à vendre leur bétail, à renoncer à leurs moyens de subsistance et à partir s'installer ailleurs. Le milieu naturel subit lui aussi les effets néfastes de la sécheresse, avec des répercussions sur la végétation et une fréquence accrue des feux de forêt qui touchent l'industrie du tourisme, basée sur les ressources naturelles chiliennes.

La sécheresse est attribuée à des causes à la fois naturelles et anthropiques. Le phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO) est le principal facteur de la variabilité interannuelle des précipitations au centre du Chili. Il se compose d'une phase de réchauffement (El Niño), d'une phase de refroidissement (La Niña) et d'une phase neutre [3]. La Niña provoque généralement des conditions plus sèches que la moyenne, mais la période de sécheresse actuelle a englobé les années où ont eu lieu des épisodes à la fois de La Niña et d'El Niño. Cette sécheresse a également coïncidé avec une phase de refroidissement appelée l'oscillation décennale du Pacifique (OPD) [2]. L'oscillation décennale du Pacifique désigne une variabilité climatique des océans et de l'atmosphère dans les latitudes moyennes du bassin du Pacifique et, dans le centre du Chili, la phase de refroidissement est associée à une diminution des précipitations. Toutefois, le déficit pluviométrique enregistré au Chili est largement inférieur à la baisse habituelle des précipitations au cours de ce phénomène [2]. Si l'on prend en compte la variabilité interne, le phénomène ENSO et l'OPD, il y a tout lieu de croire que le changement climatique anthropiques sont en partie responsables de l'importante sécheresse actuelle. Cela signifie donc que les variabilités naturelles et le forçage anthropique contribuent à maintenir une situation de sécheresse au Chili, ce qui entrave considérablement la capacité à prévoir les sécheresses et les phénomènes hydrologiques.

En juin 2013, le PHI a créé l'observatoire agroclimatique chilien, en étroite collaboration avec le ministère chilien de l'Agriculture et en coordination avec l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) et l'Institut international de recherche sur le climat et la société [4]. L'observatoire regroupe des cartes et des statistiques qui permettent de surveiller la situation de sécheresse actuelle. Il établit également des prévisions saisonnières à court terme et permet aux utilisateurs de replacer la sécheresse actuelle dans un contexte historique [5].

L'observatoire intègre aussi l'Atlas de la sécheresse en Amérique latine et dans les Caraïbes, un outil qui permet de visualiser l'exposition à la sécheresse en définissant à la fois la variabilité des déficits pluviométriques, mais aussi les disparités spatiales de cette variabilité climatique sur l'ensemble du territoire, même à petite échelle. L'observatoire de la sécheresse propose une large gamme d'outils d'analyse supplémentaires, tels que l'observation des précipitations, des chutes de neige et de l'écoulement fluvial quasi en temps réel, ainsi qu'un indice combiné de la sécheresse. Il met également à disposition l'Atlas de la vulnérabilité au Chili, lequel s'appuie sur 13 indicateurs prenant en compte des facteurs environnementaux, socioéconomiques et productifs pour identifier les communautés les plus exposées aux effets de la sécheresse. En outre, l'Atlas examine l'adaptabilité de la population pour ce qui est de l'utilisation des nouvelles technologies et de la diversification de la production.

Sur le terrain, les programmes relatifs à la récupération de l'eau, à la collecte de l'eau de pluie et à la recharge des aquifères, tels que le Réseau mondial d'information sur l'eau et le développement dans les zones arides d'Amérique latine et des Caraïbes (G-WADI LAC) mis en œuvre par l'UNESCO, ont joué un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau potable de nombreuses communautés [6]. Le Réseau mondial d'information sur l'eau et le développement dans les zones arides d'Amérique latine et des Caraïbes vise à renforcer les capacités locales de gestion de l'eau grâce à l'association de techniques de collecte des eaux de pluie, telles que les installations de captage du brouillard sur les toits, du recyclage des eaux grises, de la recharge artificielle des aquifères et de la sensibilisation de la population. Par ailleurs, pour faciliter l'identification des impacts possibles du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau, l'approche CRIDA a été appliquée au bassin du fleuve Río Limarí au Chili comme étude de cas sur la manière dont les informations relatives au changement climatique peuvent étayer la prise de décisions à l'échelle du bassin [7].

Peru – Diverse landscapes and monitoring challenges

Few countries in the world offer as much geographical diversity as Peru. Twenty-eight different climatic zones can be found throughout the country, including large desert areas, a coastline stretching along the Pacific Ocean, lush rainforests and the staggering mountain peaks of the Andes. Peru is considered one of the world's megadiverse countries, harbouring a high number of endemic species and hosting 84 of the world's 104 known ecological regions [1].

The coastline of Peru is the driest area in the country. Wind patterns over the South Pacific Ocean and the proximity to the mountains make this region a place where rainfall is sparse. The area is prone to water scarcity caused by seasonal meteorological drought, standing in stark contrast to the Amazon Basin of the country, which is highly prone to flooding. The movement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) – an area where the northeast and southeast trade winds converge – causes a wet season followed by a dry season in Peru. During the summer months, the easterly trade winds transport humid air from the tropical Atlantic towards the Amazon Basin and the Andes, creating a wet season in most of the country. During the winter, these winds move further north, creating a dry season with significantly less precipitation. However, in the summer months, the Andes function as a barrier for the winds coming from the Atlantic side, creating conditions where the eastern side of the Andes receives above 500mm/year of precipitation and the western side receives far less, with some areas as low as 150mm/year on average [2]. These diverse precipitation regimes have made the creation of a national water plan for Peru highly challenging.

Being able to accurately predict drought and events of water scarcity is of great importance to secure people's livelihoods and the function of the economic sectors that depend on water. Of the 33 million inhabitants of Peru, about one-third reside along the desert coastal belt in the west part of the country. About one-fourth of the population are employed in the agricultural sector. Peru is also the second largest producer of copper in the world [3], and as such, a great portion of the population is employed in an industry highly dependent on the availability of fresh water. Accurate predictions are also important to make better informed policies and plans for the mitigation of and adaptation to the impacts of drought. The varied climate and topography of the country makes this a complex task, as there are huge challenges with using statistics and algorithms to produce climate models in areas with high variability in rainfall and climate.

However, in recent decades, new algorithms have emerged, making predictions for these areas much more accurate. The National Meteorology and Hydrology Service of Peru (SENAMHI) has produced the Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO), a gridded data set using information from 1981 to the present day, with a 0.1-degree spatial resolution [2]. The monitor is based on meteorological data taken from both observed and satellite information. The algorithm used to produce this data set combines geostatic and deterministic interpolation methods with a variety of rainfall sources, including visually measured, radar-gauged and infrared precipitation estimates. Different drought indexes and scales were tested based on the country's situation. The data set operates on the national level and builds on six years of research in this area, using available information on the regionalization of droughts, characterization of duration, severity and intensity, hazard assessment and identification of dry periods [4]. The future of the project will focus on the relationship between hydrological and meteorological droughts, the response of vegetation to droughts and the establishment of an early warning system in the next few years.

UNESCO has also supported efforts at the national level to establish a drought observatory in Peru, where a consortium of partners developed the National Drought Observatory (ONS) [5]. The ONS has been fully integrated in the National Water Resources System (SNIRH), becoming a cornerstone of its drought management strategy. The system collects daily levels of rivers, reservoirs, streamflow, hydropower production, precipitation, temperature and vegetation conditions, as well as information on past droughts and near-future seasonal forecasts.



Central Andes.
Les Andes centrales.



Peruvian women in The Sacred Valley.
Femmes péruviennes dans la Vallée sacrée.

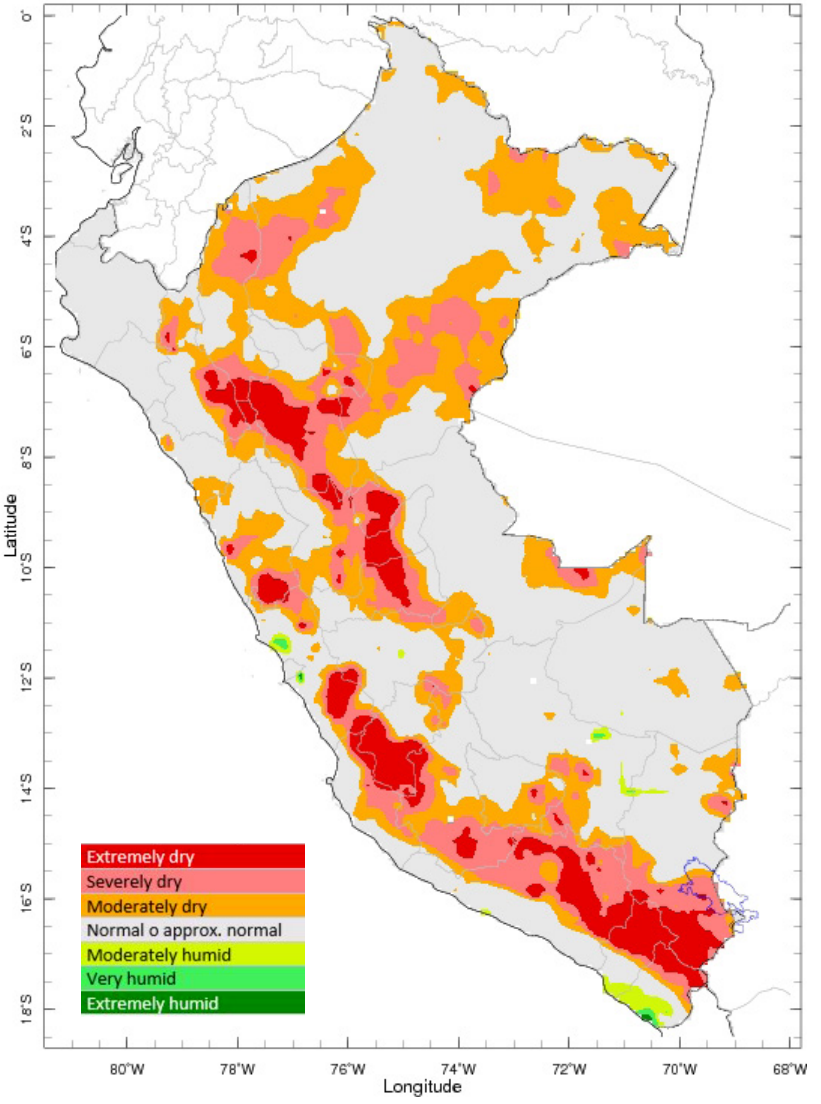


Dry landscape in Cordillera Blanca, Peru.
Paysage sec dans la Cordillère Blanche (Pérou).



Peruvian women in The Sacred Valley.

Femmes péruviennes dans la vallée sacrée.



Standardized Precipitation Index January 2016: A monitoring tool used to identify the intensity of drought or excess rainfall.

Indice de précipitations normalisé, janvier 2016 : outil de surveillance utilisé pour mesurer l'intensité de la sécheresse ou les excès de précipitations.

Pérou – Des paysages variés pour un suivi complexe

Peu de pays dans le monde présentent une diversité géographique aussi riche que celle du Pérou. On recense vingt-huit zones climatiques différentes sur l'ensemble du territoire, y compris de vastes zones désertiques, une bande côtière le long de l'océan Pacifique, des forêts tropicales luxuriantes et des sommets vertigineux dans la cordillère des Andes. Le Pérou compte parmi les pays hyperdivers qui abritent un nombre élevé d'espèces endémiques, ainsi que 84 des 104 régions écologiques recensées à l'échelle mondiale [1].

Le littoral du Pérou est la zone la plus sèche du pays. En raison des régimes des vents de l'océan Pacifique Sud et de la proximité des montagnes, les précipitations y sont peu abondantes. La région est sujette à des pénuries d'eau engendrées par les sécheresses météorologiques saisonnières, ce qui contraste radicalement avec la région du bassin amazonien, fortement exposée aux inondations. Au Pérou, le mouvement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), une zone où se rencontrent les alizés du nord-est et du sud- est, crée une saison des pluies suivie d'une saison sèche. Pendant les mois d'été, les alizés de l'est transportent l'air humide de l'Atlantique tropical vers le bassin amazonien et les Andes, déclenchant ainsi une saison des pluies sur la majorité du territoire. Pendant l'hiver, ces vents se déplacent vers le nord, créant une saison sèche caractérisée par une baisse notable des précipitations. Toutefois, pendant les mois d'été, les Andes bloquent les vents venant de l'Atlantique et créent des divergences entre les deux côtés de la chaîne, avec plus de 500 mm de précipitations par an du côté est et des précipitations bien moindres du côté ouest pouvant descendre jusqu'à 150 mm par an en moyenne dans certaines régions [2]. Ces différents régimes pluviométriques compliquent considérablement la mise en œuvre d'un plan national de gestion de l'eau au Pérou.

Être en mesure de prévoir précisément les épisodes de sécheresse et les pénuries d'eau est capital pour préserver les moyens de subsistance des populations et les fonctions des secteurs économiques qui dépendent des ressources en eau. Sur les 33 millions d'habitants que compte le Pérou, près d'un tiers résident le long de la bande côtière désertique située à l'ouest du pays. Environ un quart de la population travaille dans le secteur agricole. Par ailleurs, le Pérou est le deuxième plus grand producteur de cuivre au monde et [3], de ce fait, une vaste partie de la population est employée dans une industrie qui dépend largement de la disponibilité des ressources en eau douce. Il est tout aussi important d'établir des prévisions fiables pour élaborer, de manière plus éclairée, des politiques et plans d'atténuation des effets de la sécheresse et d'adaptation à ces impacts. La diversité climatique et topographique du pays rend la tâche difficile, car il se révèle très complexe d'utiliser des statistiques et des algorithmes pour produire des modèles climatiques dans des zones de forte variabilité climatique et pluviométrique.

Néanmoins, de nouveaux algorithmes permettant d'établir des prévisions beaucoup plus fiables pour ces zones ont vu le jour au cours des dernières décennies. Les services météorologiques et hydrologiques nationaux du Pérou (SENAMHI) ont généré les données interpolées du Pérou des observations climatologiques et hydrologiques (PISCO), un ensemble de données maillées allant de 1981 à aujourd'hui, avec une résolution spatiale de 0,1 degré [2]. Le suivi s'appuie sur des données météorologiques issues d'observations et d'informations satellites. L'algorithme utilisé pour générer cet ensemble de données associe des méthodes d'interpolation géostatistiques et déterministes basées sur différentes sources de données pluviométriques, y compris les précipitations mesurées visuellement, les précipitations mesurées par sondes et les mesures infrarouges. Différents indices et échelles de la sécheresse ont été testés en fonction de la situation du pays. L'ensemble de données englobe la totalité du territoire et regroupe six années de recherche dans ce domaine en s'appuyant sur les informations disponibles relatives à la régionalisation des sécheresses, à leur durée, à leur gravité et à leur intensité, à l'évaluation des risques et à l'identification des périodes de sécheresse [4]. Au cours des années à venir, le projet s'axera sur la relation entre les sécheresses hydrologiques et météorologiques, la réponse de la végétation aux sécheresses et la mise en place d'un système d'alerte rapide.

L'UNESCO a également soutenu les efforts nationaux visant à créer un observatoire de la sécheresse au Pérou, ce qui a permis à un consortium de partenaires d'établir l'observatoire national de la sécheresse (ONS) [5]. Le système national d'information sur les ressources en eau (SNIRH) a pleinement intégré l'ONS et en a fait l'un des piliers de sa stratégie de gestion de la sécheresse. Le système recueille des informations quotidiennes sur le niveau des rivières et des réservoirs, l'écoulement fluvial, la production hydraulique, les précipitations, les températures et les conditions de végétation, ainsi que des données sur les précédents épisodes de sécheresse et les prévisions saisonnières à court terme.

References / Bibliographie

INTRODUCTION

1. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2015. The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015. https://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf. Accessed 10 October 2019.
2. Verbist, K., Amani, A., Mishra, A and Jiménez Cisneros, B. 2016. Strengthening Drought Risk Management and Policy: UNESCO International Hydrological Programme's Case Studies from Africa and Latin America and the Caribbean. Water Policy 18. DOI 10.2166/wp.2016.223.

CAPE TOWN / LE CAP

1. Muller, M. 2018. Cape Town's Drought: Don't Blame Climate Change. Nature 559(7713), pp. 174–176.
2. Burls, N., Blamey, R., Cash, B., Swenson, E., Fahad, A., Bopape, M. et al. 2019. The Cape Town "Day Zero" drought and Hadley cell expansion. npj Climate and Atmospheric Science (2)27.
3. Enqvist, J.P. and Ziervogel, G. (2019). Water Governance and Justice in Cape Town: An Overview. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 6(4), e1354.
4. City of Cape Town. 2019. Cape Town Water Strategy, Our Shared Future Draft. https://www.preventionweb.net/files/63935_capetowndraftwaterstrategy2019publi.pdf. Accessed 10 October 2019.
5. Otto, F.E.L., Wolski, P., Lehner, F., Tebaldi, C., van Oldenborgh, G.J., Hogesteeger, S. et al. 2018. Anthropogenic Influence on the Drivers of the Western Cape Drought 2015–2017. Environmental Research Letters, 13(12), 124010.
6. Maxmen, A. 2018. As Cape Town water crisis deepens, scientists prepare for 'Day Zero'. Nature 554(7690), pp. 13–14.
7. City of Cape Town. 2012. Cape Town Census. http://resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/Maps%20and%20statistics/2011_Census_Cape_Town_Profile.pdf. Accessed 10 October 2019.
8. Robins, S. 2019. '"Day Zero", Hydraulic Citizenship and the Defence of the Commons in Cape Town: A Case Study of the Politics of Water and its Infrastructures (2017-2018)', Journal of Southern African Studies, 45(1), pp. 5–29.
9. Parks, R., Mclaren M., Toumi R., Rivett U. 2018. Experiences and lessons in managing water from Cape Town, Technical Report. http://hdl.handle.net/10044/1/67992. Accessed 10 October 2019.
10. Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J.H., Stakhiv, E., Kucharski, J. and Gilroy, K. 2018. Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265895. Accessed 10 October 2019.

LAKE CHAD / LAC TCHAD

1. World Bank. 2019. Tools for Good Water Management in Lake Chad. 4 June. https://www.worldbank.org/en/news/feature/2018/06/04/tools-for-good-water-management-in-lake-chad. Accessed 16 October 2019.
2. Mekonnen, D.T. 2016. The Lake Chad Development and Climate Resilience Action Plan (Summary). Washington D.C.
3. Magrin, G. 2016. The Disappearance of Lake Chad: History of a Myth. Journal of Political Ecology 23(1), pp. 204–22.
4. Nagarajan, C., Pohl, B., Rüttinger, L., Sylvestre, F., Vivekananda, J., Wall, M. et al. 2018. Climate-Fragility Profile: Lake Chad Basin. Berlin: adelphi, 32.
5. Vivekananda, J., Wall, M., Sylvestre, F. and Nagarajan, C. 2019. Shoring Up Stability: Addressing Climate Change and Fragility Risks in the Lake Chad Region. Berlin: adelphi research gemeinnützige GmbH. https://shoring-up-stability.org/wp-content/uploads/2019/06/Shoring-up-Stability.pdf. Accessed 10 October 2019.

SUB-SAHARAN AFRICA / AFRIQUE SUBSAHARIENNE

1. Shiferaw, B., Tesfaye, K., Kassie, M., Abate, T., Prasanna, B.M., Menkir, A. 2014. Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. Weather and Climate Extremes 3, pp. 67–79.
2. Brown, C., Meeks, R., Hunu, K., Yu, W. 2011. Hydroclimate risk to economic growth in sub-Saharan Africa. Climatic Change 106, pp. 621–647.
3. UK Research and Innovation. n.d. GCRF - Building REearch [sic] Capacity for sustainable water and food security In drylands of sub-saharan Africa (BRECcIA). https://gtr.ukri.org/projects?ref=NE%2FP021093%2F1. Accessed 16 October 2019.
4. University of Southampton. 2019. Southampton building research capacity to tackle water crisis in sub-Saharan Africa. 22 March. https://www.southampton.ac.uk/news/2019/03/water-day-breccia.page. Accessed 16 October 2019.
5. Building Research Capacity for Sustainable Water and Food Security in Drylands of Sub-Saharan Africa. 2018. Transforming African Agriculture: Eyes In The Sky, Smart Techs On The Ground. 12 September. http://www.gcrf-breccia.com/2018/09/12/transforming-african-agriculture-eyes-in-the-sky-smart-techs-on-the-ground/ Accessed 17 October 2019.
6. UNESCO. 2018. Rainwater Harvesting as adaptation strategy for Africa | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. http://www.unesco.org/new/en/nairobi/about-this-office/single-view/news/rainwater_harvesting_as_adaptation_strategy_for_africa/. Accessed 08 October 2019.
7. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Hydrological Program. 2018. Rainwater Harvesting App. http://rainwaterharvesting.africa/ Accessed 06 October 2019.

ZAMBIA / ZAMBIE

1. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2004. Water Demand Management Field Study. Version 1.1. https://www.car.org.bw/wp-content/uploads/2016/06/Field-Study.pdf. Accessed 18 October 2019.
2. World Bank. 2019. The World Bank in Zambia. 13 October. https://www.worldbank.org/en/country/zambia/overview. Accessed 16 October 2019.
3. CRIDA Step By Step. 2017. YouTube video, added by Marc Tkach. 28 August. https://www.youtube.com/watch?v=wPc6DKTtG08. Accessed 18 October 2019.

4. Millennium Challenge Corporation. n.d. Zambia Compact. https://www.mcc.gov/where-we-work/program/zambia-compact. Accessed 16 October 2019.
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and International Center for Integrated Water Resources Management. 2018. Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265895

MOROCCO / MAROC

1. Dodson, L.L. and Bargach, J. 2015. Harvesting Fresh Water from Fog in Rural Morocco: Research and Impact [sic] Dar Si Hmad's Fogwater Project in Aït Baamrane. Procedia Engineering 107, pp. 186–193.
2. Dar Si Hmad. 2019. A ground-breaking project: Harvesting water from fog. http://darsihmad.org/fog/. Accessed 01 October 2019.
3. United Nations Framework Convention on Climate Change. n.d. Women-led Fog Harvesting for a Resilient, Sustainable Ecosystem | Morocco. https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/women-for-results/women-led-fog-harvesting-for-a-resilient--sustainable-ecosystem. Accessed 01 October 2019.
4. Dar Si Hmad. 2019. The Water School: Environmental Education for Rural Youth. http://darsihmad.org/water-school/. Accessed 01 October 2019.

SAUDI ARABIA / ARABIE SAOUDITE

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2008. Saudi Arabia. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/SAU/index.stm. Accessed 16 October 2019.
2. The Kingdom of Saudi Arabia. 2019. Saudi Arabia's Vision for 2030. https://vision2030.gov.sa/en. Accessed 16 October 2019.
3. Center for International Communication, Ministry of Media, Saudi Arabia. 2018. Saudi Arabia's SWCC in Guinness World Records as Largest Desalination Company Globally. 9 February. https://cic.org.sa/2018/02/saudi-arabias-swcc-in-guinness-world-records-as-largest-desalination-company-globally/.
4. McCabe, M. F., Houborg, R. and Lucieer, A. 2016. High-resolution sensing for precision agriculture: from Earth-observing satellites to unmanned aerial vehicles. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII.
5. Aragon, B., Houborg, R., Tu, K, Fisher, J.B. and McCable, M. 2018. CubeSats Enable High Spatiotemporal Retrievals of Crop-Water Use for Precision Agriculture. Remote Sensing 10(12), 1867. https://www.mdpi.com/2072-4292/10/12/1867.
6. McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W. et al. 2017. The Future of Earth Observation in Hydrology. Hydrology and Earth System Sciences 21, pp. 3879–3914. https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/3879/2017/.

ARAL SEA / MER D'ARAL

1. Indoitu, R., Kozhoridze, G., Batyrbaeva, M., Vitkovskaya, I., Orlovsky, N., Blumberg, D., Orlovsky, L. 2015. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea. Aeolian Research 17, pp. 101–115.
2. Lioubimtseva, E. 2015. A Multi-Scale Assessment of Human Vulnerability to Climate Change in the Aral Sea Basin. Environmental Earth Sciences 73(2), pp. 719–729. DOI 10.1007/s12665-014-3104-1.
3. Micklin, P. 2016. The Future Aral Sea: Hope and Despair. Environmental Earth Sciences 75(9), 844.
4. TEEB 2012. The Economics of Ecosystems and Biodiversity in Business and Enterprise. Edited by Joshua Bishop. Earthscan. London and New York
5. Micklin, P. 2007. The Aral Sea Disaster. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 35, pp. 47–72.
6. Gaybullaev, B., Chen, S.-C., Gaybullaev, D. 2012. Changes in water volume of the Aral Sea after 1960. Applied Water Science 2, pp. 285–291.
7. World Bank. 2005. Saving a Corner of the Aral Sea. 1 September.
8. https://www.worldbank.org/en/results/2005/09/01/saving-a-corner-of-the-aral-sea. Accessed 16 October 2019.
9. Ministry of Justice. 2018. Decree of President of Uzbekistan: About the State Program on Developing the Region Surrounding the Aral Sea in 2017–2021. Tashkent, 18 January. http://lex.uz/docs/3099707.

KEOLADEO NATIONAL PARK / PARC NATIONAL DE KEOLADEO

1. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre. 2002. World Heritage Sites. http://webarchive.loc.gov/all/20021009114606/http%3A//www.wcmc.org.uk/protected_areas/data/wh/keoladeo.html. Accessed 16 October 2019.
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2019. Keoladeo National Park. https://whc.unesco.org/en/list/340/. Accessed 17 October 2019.
3. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2019. State of Conservation 2005. https://whc.unesco.org/en/soc/1268. Accessed 16 October 2019.
4. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 1990. Report of the World Heritage Committee. CLT-90/CONF.004/13. https://whc.unesco.org/archive/1990/cc-90-conf004-13e.pdf Accessed 17 October 2019.
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2005. State of conservation reports of properties inscribed on the World Heritage List. 15 June. WHC-05/29.COM/7B.Rev. https://whc.unesco.org/archive/2005/whc05-29com-07BReve.pdf Accessed 17 October 2019.
6. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2008. Report on the UNESCO-IUCN Mission to Keoladeo National Park, India. 15 June. 32 COM.
7. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2019. State of Conservation 2011. https://whc.unesco.org/en/soc/320. Accessed 16 October 2019.
8. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2019. State of Conservation 2012. https://whc.unesco.org/en/soc/139. Accessed 16 October 2019.
9. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2019. State of Conservation 2014. https://whc.unesco.org/en/soc/2870. Accessed 16 October 2019.
10. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2018. Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage. 4 July. WHC/18/42.COM/18.

MARSHALL ISLANDS / ÎLES MARSHALL

1. Annamalai, H., Keener, V., Widlansky, M.J. and Hafner, J. 2015. El niño strengthens in the pacific: Preparing for the impacts of drought. AsiaPacific Issues 122.
2. Leenders N., Holland, P. and Taylor, P. 2017. Republic of the Marshall Islands: Post Disaster Needs Assessment of the 2015-2016 Drought. Republic of the Marshall Islands.
3. Pacific Water. n.d. Pacific IWRM Programme. http://www.pacificwater.org/pages.cfm/water-governance/integrated-water-resource-management/pacific-iwrm-programme/. Accessed 16 October 2019.
4. Pacific Water. 2015. The Pacific Integrated Water Resources Management Programme http://www.pacificwater.org/userfiles/file/Pacific%20IWRM%20Programme%20Brochure.pdf. Accessed 16 October 2019.
5. United Nations Development Programme. n.d. Marshall Islands: Protecting drinking water from drought and sea level rise. https://www.undp.org/content/undp/en/home/ourwork/ourstories/Marshall-Islands-Protecting-drinking-water.html. Accessed 16 October 2019.

VIETNAM / VIET NAM

1. Piman, T. and Shrestha, M. 2017. Case Study on Sediment in the Mekong River Basin: Current State and Future Trends. Stockholm: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and Stockholm Environment Institute.
2. Nguyen, N.A. 2017. Historic Drought and Salinity Intrusion in the Mekong Delta in 2016: Lessons Learned and Response Solutions. Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering 59, pp. 93–96.
3. Thilakarathne, M. and Sridhar, V. 2017. Characterization of Future Drought Conditions in the Lower Mekong River Basin. Weather and Climate Extremes 17, pp. 47–58.
4. Smajgl, A., Toan, T.Q., Nhan, D.K., Ward, J.R., Trung, N.H., Tri, L.Q., et al. 2015. Responding to Rising Sea Levels in the Mekong Delta. Nature Climate Change 5, 167.
5. Ha, K., Ngoc, N.T.M., Lee, E. and Jayakumar, R. 2015. Current Status and Issues of Groundwater in the Mekong River Basin. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia Technical Secretariat, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Bangkok Office.
6. Kuntiyawichai, K., Plermkamon, V., Jayakumar, R., Van Dau, Q. 2015. Climate Change Vulnerability Mapping for Greater Mekong Sub-Region. Bangkok: Asia and Pacific Regional Bureau for Education of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. https://bangkok.unesco.org/content/climate-change-vulnerability-mapping-greater-mekong-sub-region. Accessed 10 October 2019.

CALIFORNIA / CALIFORNIE

1. Pathak, T.B., Maskey, M.L., Dahlberg, J.A., Kearns, F., Bali, K.M. and Zaccaria, D. 2018. Climate Change Trends and Impacts on California Agriculture: A Detailed Review. Agronomy, 8(3), 25.
2. Shonkoff, S.B., Morello-Frosch, R., Pastor, M. and Sadd, J. 2011. The Climate Gap: Environmental Health and Equity Implications of Climate Change and Mitigation Policies in California—A Review of the Literature. Climatic Change 109(1), pp. 485–503.
3. Griffin, D. and Anchukaitis, K.J. 2014. How unusual is the 2012–2014 California drought? Geophysical Research Letters 41(24), pp. 9017–9023.
4. Williams, A.P. 2015. Contribution of Anthropogenic Warming to California Drought During 2012–2014. Geophysical Research Letters 42(16), pp. 6819–6828.
5. National Integrated Drought Information System. 2015. U.S. Drought Portal. https://www.drought.gov/drought/states/california. Accessed 16 October 2019.
6. Medellín-Azuara, J., MacEwan, D., Howitt, R.E., Sumner, D.A. and Lund, J.R. 2016. Economic Analysis of the 2016 California Drought on Agriculture. Center for Watershed Sciences. Davis, California: University of California.
7. Greene, C. 2018. Broadening Understandings of Drought – The Climate Vulnerability of Farmworkers and Rural Communities in California (USA). Environmental Science & Policy 89, pp. 283–291.
8. He, M., Russo, M. and Anderson, M. 2017. Hydroclimatic Characteristics of the 2012-2015 California Drought from an Operational Perspective. Climate 5(1), 5.
9. California Department of Forestry and Fire Protection. 2015. 2015 Fire Season. 2015 Incident Archive. https://www.fire.ca.gov/incidents/2015/. Accessed 16 October 2019.
10. California Natural Resources Agency, Department of Food and Agriculture and California Environmental Protection Agency. 2015. California Water Action Plan 2016 Update. California Water Action Plan Implementation Report 2014–2018. http://resources.ca.gov/california_water_action_plan/implementation_report/. Accessed 16 October 2019.
11. Schwarz, A., Ray, P. and Arnold, W. 2019. Decision Scaling Evaluation of Climate Change Driven Hydrologic Risk to the State Water Project: A Collaborative Study of the Hydrosystems Research Group, University of Massachusetts, Amherst and the California Department of Water Resources. California: Department of Water Resources. 107.

UNITED KINGDOM / ROYAUME-UNI

1. Managing the Risks, Impacts and Uncertainties of Droughts and Water Scarcity. n.d. About MaRIUS. http://www.mariusdroughtproject.org. Accessed 10 October 2019.
2. Drought Risk and You. 2019. Map Your Drought. 8 June. http://dryproject.co.uk/citizen-science/map-your-drought/. Accessed 10 October 2019.
3. Natural Environment Research Council (n.d.). UK Droughts & Water Scarcity. https://nerc.ukri.org/research/funded/programmes/droughts/#xcollapse1. Accessed 11 October 2019.
4. Centre for Ecology & Hydrology. n.d. About Drought. https://aboutdrought.info/what-is-drought/. Accessed 11 October 2019.
5. Centre for Ecology & Hydrology. 2019. Droughts. https://eip.ceh.ac.uk/droughts. Accessed 10 October 2019.
6. Centre for Ecology & Hydrology. 2019b. UK Water Resources Portal. https://eip.ceh.ac.uk/hydrology/water-resources/. Accessed 10 October 2019.

THE CARIBBEAN / CARAÏBES

1. Cashman, A., Cox, C., Daniel, J. and Smith, T. 2014. Integrated Water Resources Management in the Caribbean: The Challenges Facing Small Island Developing States. Technical Focus Paper. Global Water Partnership.
2. Reidmiller, D.R., Avery, C.W., Easterling, D.R., Kunkel, K.E., Lewis, K.L.M., Maycock, T.K. et al. (eds.) 2018. Chapter 20. In Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II. U.S. Washington, D.C.:

Global Change Research Program. https://nca2018.globalchange.gov/chapter/caribbean. Accessed 16 October 2019.
3. Cashman, A. 2013. Water Security and Services in the Caribbean. Technical Note IDB-TN-514. InterAmerican Development Bank.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology. 2016. Drought Characteristics and Management in the Caribbean. FAO Water Report 42.
5. Trotman, A., Joyette, A.R.T., van Meerbeeck, C.J., Mahon, R., Cox, S-A., Cave, N. et al. 2017. Drought Risk Management in the Caribbean Community: Early Warning Information and Other Risk Reduction Considerations. In Drought and Water Crises 2nd Edition. Wilhite, D. and Pulwarty, R. (eds.). Boca Raton: CRC Press, pp. 431–447.
6. Taylor, M., Clarke, L.A., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T.S., Jones, J.J. et al. 2018. Future Caribbean Climates in a World of Rising Temperatures: The 1.5 vs 2.0 Dilemma. Journal of Climate 31(7), pp. 2907–2926.
7. Farrell, D., Trotman, A. and Cox, C. 2010. Drought Early Warning and Risk Reduction: A Case Study of the Drought of 2009–2010. UNISDR Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction GAR2011. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Farrell_et_al_2010.pdf.
8. Managing Water Resources in Arid and Semi-arid Regions of Latin America and the Caribbean. 2019. The Latin American and Caribbean Drought Atlas. http://www.cazalac.org/mwar_lac/index.php?id=12. Accessed 16 October 2019.
9. Caribbean Regional Climate Centre. n.d. Caribbean Drought Bulletin. https://rcc.cimh.edu.bb/drought-bulletin-caribbean/. Accessed 19 October 2019.

CHILE / CHILI

1. Alaniz, A., Carvajal, M., Nuñez-Hidalgo, I. and Vergara, P. 2019. Chronicle of an Environmental Disaster: Aculeo Lake, the Collapse of the Largest Natural Freshwater Ecosystem in Central Chile. Environmental Conservation, 0-4.
2. Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H. and Veloso-Aguila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate Dynamics Perspective. International Journal of Climatology.
3. Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D.A., Galleguillos, M. et al. 2017. The 2010–2015 Mega Drought in Central Chile: Impacts on Regional Hydroclimate and Vegetation. Hydrology and Earth System Sciences 21(12), pp. 1–37.
4. Managing Water Resources in Arid and Semi-arid Regions of Latin America and the Caribbean. 2019. The Latin American and Caribbean Drought Atlas. http://www.cazalac.org/mwar_lac/index.php?id=12. Accessed 16 October 2019.
5. Managing Water Resources in Arid and Semi-arid Regions of Latin America and the Caribbean. 2019. National Drought Observatories Objectives. http://www.cazalac.org/mwar_lac/index.php?id=49. Accessed 16 October 2019.
6. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Global Network on Water and Development Information for Arid Lands in Latin America and Caribbean. n.d. About GWADI. http://www.cazalac.org/publico/index.php?id=100&L=0. Accessed 16 October 2019.
7. Verbist, K., Rojas, P. and Maureira, H. 2018. A Stress Test for Climate Change Impacts on Water Security: Case Study from the Limarí Watershed in Chile. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 45.

PERU / PÉROU

1. Escobal, J. and Torero, M. 2000. Inter-American Development Bank Latin American Research Network, Research Network Working paper #R-404. Does Geography Explain Differences in Economic Growth in Peru? Washington, D.C.: Inter-American Development Bank.
2. Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F. and Felipe-Obando, O. 2019. Construction of a High-Resolution Gridded Rainfall Dataset for Peru from 1981 to the Present Day. Hydrological Sciences Journal.
3. Peru. n.d. Peru Is the world's second biggest copper producer. https://peru.info/en-us/business/news/5/23/peru-is-the-world-s-second-biggest-copper-producer. Accessed 18 October 2019.
4. International Research Institute for Climate and Society. 2019. SENAMHI HSR PISCO. http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/ Accessed 16 October 2019.
5. National Drought Observatory. n.d. Peruvian Drought Observatory. http://ons.snirh.gob.pe/Peru/maproom/. Accessed 16 October 2019.

Photo credits / Crédits photo

CAPE TOWN / LE CAP

11 Unsplash/Dan Grinwis
11 Flickr/6000.co.za (CC BY-NC-ND)
11 Flickr/6000.co.za (CC BY-NC-ND)
12 iStock/fivepointsix
12 NASA Earth Observatory

LAKE CHAD / LAC TCHAD

15 Getty images/ecoimagesphotos
16 NASA Earth Observatory
16 Flickr/EU_ECHO (CC BY-NC-ND)

SUB-SAHARAN AFRICA / AFRIQUE SUBSAHARIENNE

19 Getty images/hadynyah
19 Getty images/poco_bw
19 Getty images/Jennifer Sophie
20 Justin Sheffield
20 Adelaide Hitchings

ZAMBIA / ZAMBIE

23 MCA-Zambia
23 MCA-Zambia
23 MCA-Zambia
24 Flickr/Hanna Öunap (CC BY-NC)

MOROCCO / MAROC

27 Flickr/Michele Solmi (CC BY-NC-SA)
27 Aqualonis
27 Aqualonis
27 Aqualonis
28 Aqualonis

SAUDI ARABIA / ARABIE SAOUDITE

31 Kasper Johansen
31 Getty images/ali suliman
31 NASA Earth Observatory
32 NASA Earth Observatory

ARAL SEA / MER D'ARAL

35 Flickr/Vincent Robinot (C BY-NC-ND)
35 Flickr/Mark Pitcher (CC BY-NC)
35 Getty images/OkorokovaNatalya
36 NASA Earth Observatory

KEOLADEO NATIONAL PARK / PARC NATIONAL DE KEOLADEO

39 Getty Images/kurkul
40 Flickr/Peter Steward (CC BY-NC)
40 Flickr/Peter Steward (CC BY-NC)
40 Getty Images/kurkul

MARSHALL ISLANDS / ÎLES MARSHALL

43 Getty images/DanLinPhotography
43 Flickr/Peter Mellow (CC BY-NC)
43 Getty images/Marshall_Islands
44 Flickr/UNDP (CC BY-NC-ND)
44 Flickr/UNDP (CC BY-NC-ND)
44 Getty images/andrearenata

VIETNAM / VIET NAM

47 Jimmy Walsh
47 Jimmy Walsh
47 Unsplash/Vince Gx
48 Thai Van Nguyen
48 Getty Images/Jane1e
48 Getty Images/RomanBabakin

CALIFORNIA / CALIFORNIE

51 Kelly M. Grow/California DWR
51 Zack Cunningham/California DWR
51 Florence Low/California DWR
52 U.S. Drought Monitor
52 Kelly M. Grow/California DWR
52 Florence Low/California DWR

UNITED KINGDOM / ROYAUME-UNI

55 Getty images/Carol Herbert Photography
55 Getty images/Carol Herbert Photography
56 Centre for Ecology & Hydrology
56 Centre for Ecology & Hydrology

THE CARIBBEAN / CARAÏBES

59 Getty images/NAPA74
59 Getty images/Chris Jbeily
59 Getty images/mahroch
60 Flickr/Mark Yokoyama (CC BY-NC-ND)
60 Flickr/Mark Yokoyama (CC BY-NC-ND)
60 Unsplash/Briona Baker

CHILE / CHILI

63 Getty images/Marco Ramerini
63 Getty images/tifonimages
63 Christopher Vivanco (CAZALAC)
64 NASA Earth Observatory
64 The Latin American and Caribbean Drought Atlas

PERU / PÉROU

67 Unsplash/Willian Justen de Vasconcellos
67 Getty images/hadynyah
67 Getty images/Byelikova_Oksana
68 Getty images/hadynyah
68 The Latin American and Caribbean Drought Atlas



Droughts in the Anthropocene / Les sécheresses dans l'Anthropocène

UNESCO ISBN:
978-92-3-100353-0

GRID-Arendal ISBN:
978-82-7701-191-2

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

International Hydrological Programme

NATIONAL INTEGRATED DROUGHT INFORMATION SYSTEM

NIDIS

UNIVERSITY OF Southampton

GRID ARENDAL