

6 Technologies de réduction et de gestion des pertes et dommages

La technologie est essentielle pour une gouvernance efficace des risques, et notamment des aléas complexes et potentiellement systémiques induits par le changement climatique. Il est indispensable de comprendre les risques et les impacts actuels et futurs du changement climatique avant d'élaborer et de mettre en œuvre des stratégies de réduction et de gestion des pertes et dommages potentiels qui leur sont associés. L'observation et la modélisation du système climatique et les capacités de prévision peuvent contribuer à la caractérisation des risques. Les technologies seront à la base de l'évaluation des risques et de l'élaboration des stratégies de réduction et de gestion de ces risques. Les risques sont en constante évolution, aussi un processus itératif de suivi, d'évaluation et d'apprentissage peut-il contribuer à la compréhension et à la gestion des risques au fil du temps.

En bref

La technologie joue un rôle crucial à tous les stades de la compréhension et de la gestion des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique

Les technologies jouent un rôle fondamental dans la réduction et la gestion des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique. Lorsque les décisions sont prises en situation d'incertitude, un processus de gouvernance des risques doit faciliter une surveillance, une évaluation et un apprentissage constants. Ces processus itératifs peuvent être guidés par i) une caractérisation et ii) une évaluation claires des risques, complétées par iii) l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies de réduction et de gestion des risques. La technologie revêt une importance cruciale pour chacune des trois composantes de la gouvernance des risques. Le présent chapitre met en avant certaines de ces technologies, sans viser à l'exhaustivité.

Technologies de caractérisation des risques

Comprendre la variabilité et le changement climatiques est une entreprise scientifique complexe. Les progrès technologiques dans des domaines tels que les moyens d'observation spatiale, les puissances de calcul élevées, les logiciels de cartographie et les systèmes de télécommunications ont fourni des outils essentiels pour mieux comprendre le système climatique et en caractériser les risques. La participation inclusive des parties prenantes peut – tout comme les savoirs indigènes et locaux – contribuer à compléter les connaissances scientifiques sur les déterminants des risques que les données observées pourraient ne pas permettre de déceler. À l'échelle mondiale, une telle collaboration peut faciliter le partage de données, d'informations et de capacités de modélisation dont les différents pays pourraient ne pas disposer à titre individuel.

Les services d'information météorologique et climatologique (SIMC) sont essentiels pour identifier et évaluer les options de réduction et de gestion des risques de pertes et dommages, ainsi que pour en suivre les performances. Un dialogue précoce et soutenu avec les différents utilisateurs de ces services peut aider à faire en sorte que les données et les informations soient utiles à la prise de décision. Une meilleure assimilation des données, telles que les prévisions déterministes des trajectoires des cyclones, peut jouer un rôle crucial dans l'amélioration des prises de décision. Les SIMC souffrent cependant d'un retard significatif dans nombre des pays les moins avancés (PMA) et des petits États insulaires en développement (PEID). Par ailleurs, si les services météorologiques sont bien établis, ceux destinés à guider les actions à plus longue échéance sont moins répandus, malgré des progrès notables ces dernières années. Des améliorations constantes du dialogue entre fournisseurs et utilisateurs et de la manière dont l'information est véhiculée sont nécessaires pour garantir que ces services climatologiques répondent à une demande et qu'ils soient non seulement utilisables mais aussi utiles.

Pour comprendre l'exposition et la vulnérabilité aux aléas liés au climat, il faut disposer de données socioéconomiques granulaires et savoir comment les risques influent sur les moyens de subsistance et l'état de santé des populations, et plus généralement sur leur cadre de vie. Une grande partie de ces données pourrait ne pas être aisément quantifiable. Dans le cadre de l'évaluation de l'exposition aux aléas climatiques, des technologies sont nécessaires pour faciliter la fourniture de données très précises sur les caractéristiques des environnements naturels et bâtis. La technologie et les produits de données géospatiales peuvent donner des indications sur les chevauchements entre aléa, exposition et vulnérabilité. Ces produits accroissent au fil du temps la granularité et la pertinence des évaluations des

risques pour certains lieux et certains groupes socioéconomiques. En association avec l'utilisation des réseaux sociaux, les enquêtes et les analyses prédictives (modélisation, apprentissage automatique et exploration de données, par exemple) peuvent également fournir des informations utiles sur la diversité et l'intensité des perceptions, des préoccupations et des impacts potentiels suscités par les risques.

Technologies d'évaluation des risques

Les informations issues de la caractérisation des risques peuvent servir de base à l'évaluation des risques et permettre aux décideurs de prendre des mesures de réduction et de gestion des risques émergents. Par exemple, les Centres mondiaux de production de prévisions climatiques annuelles à décennales de l'OMM s'appuient sur l'expertise scientifique et les modélisations informatiques des centres climatologiques les plus avancés au monde pour produire des informations utiles aux décideurs.

Les technologies de surveillance et de modélisation du système climatique seront également essentielles pour déterminer comment les aléas pourraient évoluer dans le temps et dans l'espace. Elles peuvent ainsi nourrir les systèmes d'alerte précoce et contribuer à la compréhension des multiples effets du changement climatique, y compris les potentiels effets en cascades. Ceci se révélera particulièrement important face aux aléas émergents dans l'éventualité où un ou plusieurs points de basculement climatique devaient être déclenchés. L'estimation de la tolérance au risque à différentes échéances s'avère délicate, car cette tâche va bien au-delà de l'évaluation des différentes catastrophes liées au climat qui sont habituelles dans les conditions climatiques actuelles.

Technologies d'élaboration, de mise en œuvre et d'évaluation des stratégies de réduction et de gestion des risques

Les décisions quant à savoir à quels risques s'attaquer, par quels moyens, dans quelle mesure et à quel moment seront d'ordre politique ou personnel. Cependant, la mise en œuvre de ces choix peut parfois être fonction des technologies et des capacités technologiques (infrastructures ou compétences) disponibles. À titre d'exemple, les émissions de gaz à effet de serre doivent être fortement et rapidement réduites si l'on veut limiter les aléas qu'elles engendrent. Les trajectoires à faibles émissions doivent accroître le recours aux technologies sobres en carbone et donner lieu à une refonte des systèmes pour limiter l'augmentation de la demande en énergie et en matières premières. Il sera ainsi possible d'éviter une dépendance hasardeuse à l'égard de technologies visant l'absorption du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère plus tard dans ce siècle. Ces technologies pourraient représenter une menace pour d'autres objectifs (comme la sécurité alimentaire ou l'inversion de la perte de biodiversité). Au nombre des technologies destinées à limiter l'exposition et à réduire la vulnérabilité aux aléas liés au climat figurent notamment les alertes précoces concernant les aléas climatiques. Ces systèmes doivent prendre en considération tout un éventail d'horizons temporels et d'aléas potentiels. Il s'agit entre autres des changements à évolution lente, des phénomènes extrêmes et des points de basculement climatique qui pourraient être déclenchés, même aux niveaux de réchauffement considérés comme probables au cours de ce siècle.

Les technologies sont par ailleurs à la base d'innovations susceptibles de réduire les pertes et dommages en cas de catastrophe. Elles peuvent par exemple accélérer les versements financiers pour aider les individus, les populations locales et les pays à se relever en ayant recours à une assurance paramétrique. Par ailleurs, les technologies de chaînes de blocs permettent de réduire le coût des transferts de fonds.

Les technologies disponibles seront bien souvent tributaires de la coopération locale, régionale et internationale pour remédier aux problèmes de diffusion et à la limitation des capacités. Une coopération plus étroite au niveau international, régional et mondial s'avère particulièrement importante dans le cas des investissements majeurs dans des domaines tels que les ordinateurs à hautes performances, les

satellites et les capacités de modélisation et de prévision à la pointe du progrès. Le soutien international est également important pour remédier à la limitation des capacités (financières, techniques et organisationnelles) et favoriser le progrès technologique et l'innovation dans beaucoup de pays en développement. Les partenariats et les initiatives internationales peuvent aider à répondre aux besoins en matière de collecte et de partage de données d'observation, de surveillance et de modélisation climatiques, ainsi que de prévisions météorologiques. Les populations locales doivent être associées au processus de prise de décision, de manière à comprendre le contexte local et les capacités à assurer une meilleure diffusion des technologies.

6.1. Introduction

La définition et la mise en œuvre efficace des stratégies de réduction et de gestion des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique reposent sur différents types d'éléments. Il s'agit notamment des savoirs locaux et indigènes, des données et des informations issues des sciences naturelles et sociales, et d'un processus de participation des diverses parties prenantes. Le chapitre 4 a mis en lumière la nécessité que les processus de gouvernance des risques reconnaissent l'importance, et intègrent, des mécanismes facilitant une surveillance, une évaluation et un apprentissage continus lors des prises de décision en situation d'incertitude (Klinke et Renn, 2012^[1]), comme c'est le cas en matière de changement climatique. Ce processus peut s'appuyer sur les enseignements tirés de la gestion de risques antérieurs ou similaires, ou bien sur les nouvelles manières d'appréhender les risques et les technologies qui leur sont liées au fur et à mesure qu'elles deviennent disponibles. Ces processus itératifs de gestion des risques peuvent reposer sur trois composantes étroitement liées :

- la caractérisation des risques
- l'évaluation des risques
- l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des stratégies de réduction et de gestion des risques.

Ces composantes sont étroitement liées au processus de Plans nationaux d'adaptation mis en place par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Ce processus met en lumière les étapes importantes consistant en premier lieu à acquérir les informations, puis à examiner les éléments préparatoires en vue de la planification, avant d'établir les stratégies de mise en œuvre à longue échéance (CCNUCC, 2012^[2]). Chacune des composantes est complétée par un certain nombre d'éléments transversaux, dont une communication transparente et inclusive tenant compte du contexte sociétal.

La gestion de la gouvernance des risques devrait être guidée par un processus transparent et inclusif facilitant l'adoption de différents angles de vue pour comprendre les risques (Schweizer et Renn, 2019^[3] ; IRGC, 2017^[4]). La prise de décision doit tenir compte du contexte social, institutionnel, politique et économique plus large. La capacité organisationnelle des principaux acteurs – autorités, entreprises et particuliers – a une incidence sur les degrés de tolérance aux risques et de confiance dans le processus. Aussi la prise de décision doit-elle reconnaître la capacité des principaux acteurs du cadre de gouvernance des risques à remplir leurs rôles (IRGC, 2017^[4]).

Le présent chapitre examine le rôle de la technologie du point de vue des trois composantes du processus de gouvernance des risques. Il reconnaît que la technologie n'est que l'un des facteurs déterminants qui guident ce processus. Ce chapitre met également en évidence comment les technologies peuvent venir à l'appui des aspects transversaux de la gouvernance, tels que le dialogue et la communication avec les parties prenantes. Dans ce contexte, le terme « technologie » peut aussi bien désigner un élément matériel

(tel qu'un satellite) que, dans un sens plus large, une technique, des connaissances pratiques ou des compétences concrètes nécessaires à la réalisation d'une activité donnée (Boldt et al., 2012^[5]).

Le reste de ce chapitre s'articule autour des trois composantes du processus de gouvernance des risques succinctement décrits ci-dessus. La section 6.2.1 étudie comment la technologie peut contribuer à la caractérisation des risques. La section 6.2.2 est axée sur le rôle de la technologie dans l'évaluation des risques et dans les processus décisionnels ultérieurs, qui déterminent à quels risques il convient de s'attaquer, par quels moyens, à quel moment, et dans quelle mesure. La section 6.2.3 examine ensuite le rôle de la technologie dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des stratégies de réduction et de gestion des risques. La section 6.2.4 passe en revue les critères importants pour la création d'un environnement propice à la diffusion des technologies. Le Tableau 6.1 offre une présentation synthétique des principaux points et met en lumière les considérations dont il doit être tenu compte lors de l'étude du rôle de la technologie dans les petits États insulaires en développement (PEID) et les pays les moins avancés (PMA).

Tableau 6.1. Le rôle de la technologie à l'appui des processus de gouvernance des risques de pertes et dommages

Composante	Méthode	Soubassement technologique (y compris les infrastructures scientifiques)	Considérations relatives aux PEID et aux PMA
Caractérisation – Évaluation des risques et des parties prenantes	Évaluation des aléas	<ul style="list-style-type: none"> Services d'information météorologique et climatologique : capacités d'observation et de modélisation prédictive de la Terre (cyclones, ondes de tempête et inondations, par exemple). Les séries de données d'observation à long terme facilitent la détection de la variabilité et du changement, et donc l'attribution. Mesures satellitaires et surveillance <i>in situ</i> des principaux éléments du système climatique (inlandsis de l'Antarctique, par exemple). Modélisation du climat (modèle de circulation générale) sur des ordinateurs hautement performants ; assimilation des données et apprentissage automatique ; recherche climatique, prévisions. Réseaux mondiaux d'observation météorologique, les relevés paléoclimatiques contextualisent le changement et la variabilité actuels et permettent de comprendre certains éléments de basculement potentiels au sein du système climatique. 	<ul style="list-style-type: none"> Les données d'observation et les capacités technologiques et de modélisation dont disposent les pays en développement peuvent être incomplètes, ce à quoi la collaboration régionale ou mondiale peut en partie remédier. Les études des phénomènes extrêmes dans les pays à faible revenu sont rares, du fait de la faiblesse des relevés d'observations, des différences dans les mécanismes de notification des impacts des phénomènes extrêmes et d'une moins bonne simulation du climat tropical par les modèles climatiques. Les savoirs indigènes peuvent compléter les connaissances scientifiques pour ce qui est des déterminants des risques qui pourraient ne pas être identifiés par les méthodes classiques de traitement des données. Le niveau des capacités technologiques et de l'accès aux moyens de financement déterminera (entre autres facteurs) le degré d'application de ces technologies.
	Évaluation de l'exposition et de la vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> Séries de données à grande échelle relatives aux caractéristiques spatiales de l'exposition et de la vulnérabilité aux différents types d'aléas climatiques en fonction de la situation socioéconomique. La technologie peut y contribuer grâce aux mégadonnées, à des études rapides à l'aide de satellites ou d'UAV*, ainsi qu'à la communication avec les populations exposées. Études et évaluations, par exemple à travers l'externalisation ouverte et le recours à l'analyse de données, et évaluation des perceptions des risques et des autres préoccupations à travers les médias sociaux. 	<ul style="list-style-type: none"> La qualité des données, l'accès à des infrastructures fonctionnelles et les technologies de communication peuvent être moindres ou moins disponibles dans certaines régions. Les savoirs indigènes peuvent fournir des informations qui pourraient ne pas être obtenues par les méthodes classiques de traitement des données. Les préoccupations des populations indigènes des régions reculées et des autres minorités peuvent être sous-représentées.
Évaluation – Caractérisation des connaissances	Profils de risque basés sur des données factuelles, conclusions et options de réduction des risques	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation de la manière dont les aléas liés au climat pourraient évoluer dans le temps et l'espace à l'aide, par exemple, des technologies de surveillance et de modélisation du système climatique. Elle peut être à la base des alertes précoces et d'une compréhension des impacts multiples et potentiellement en cascade des aléas émergents liés au climat (points de bascule, par exemple). 	<ul style="list-style-type: none"> Les relevés d'observations incomplets auront une incidence sur la surveillance et la modélisation. Les modèles climatiques sont moins performants dans les régions tropicales du fait des interactions complexes entre la convection et la variabilité.
Évaluation – Évaluation des risques	Sur la base de la valeur, en jugeant de la tolérabilité, de l'acceptabilité et de la nécessité des mesures de	<ul style="list-style-type: none"> Les capacités de mesure et de prévision en temps réel, dont les capteurs d'observation de la Terre situés au sol, servent de base aux projections des aléas climatiques au vu des évaluations de l'exposition et de la vulnérabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> La rareté des données sur les phénomènes et les impacts extrêmes, le manque de données chronologiques sur les variables climatiques, les niveaux d'exposition et les variations de la vulnérabilité. Limitation des capacités de prévision.

Composante	Méthode	Soubassement technologique (y compris les infrastructures scientifiques)	Considérations relatives aux PEID et aux PMA
	réduction des risques	<ul style="list-style-type: none"> Les outils d'évaluation des risques, tels que la cartographie numérique des risques, peuvent s'appuyer sur des approches participatives pour offrir plus de détails sur l'exposition et la vulnérabilité. 	
Élaboration, mise en œuvre et évaluation des stratégies – Élaboration	Définition, évaluation et sélection des options	<ul style="list-style-type: none"> Les infrastructures physiques, la connectivité réseau et les capacités techniques institutionnelles offrent des exemples de facteurs qui influent sur la diffusion et la dissémination des technologies. 	<ul style="list-style-type: none"> Les capacités technologiques des PMA et des PEID et leur accès aux moyens de financement ne sont pas suffisants, ce qui peut (entre autres facteurs) influencer sur le degré d'application de certaines technologies.
	Outils d'aide à la décision	<ul style="list-style-type: none"> Les algorithmes de pointe et les représentations visuelles avancées ont amélioré les outils de prise de décision : analyse coûts-avantages, analyse coût-efficacité et analyse multicritères. En association avec des simulations, reposant par exemple sur des outils de simulation sociale, les modèles informatiques peuvent éclairer les processus décisionnels impliquant des interactions sociales complexes. 	<ul style="list-style-type: none"> La coopération pour le développement peut aider les PMA et les PEID à identifier les méthodes d'évaluation des risques appropriées pour réduire et gérer les pertes et dommages potentiels.
Élaboration, mise en œuvre et évaluation des stratégies – Mise en œuvre	Réduction des aléas climatiques	<ul style="list-style-type: none"> Efforts de réduction des émissions mondiales (atténuation) : plus grand recours aux technologies essentielles, telles que les énergies renouvelables, le stockage d'énergie, les réseaux intelligents, et la refonte des systèmes pour réduire la demande d'énergie et de matières premières. 	<ul style="list-style-type: none"> Certains PMA et PEID ne disposent pas d'une électricité stable, ce qui peut limiter leur capacité à appliquer les technologies d'atténuation.
	Réduction au minimum de l'exposition et de la vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> Technologies financières de récupération post-catastrophe, telles que la technologie de chaînes de blocs pour les transferts de fonds, l'indice de risque météorologique et la notation des risques par l'intelligence artificielle pour la souscription de contrats d'assurance. Capacités de surveillance et de prévision météorologiques pour déclencher des versements financiers afin d'aider à la récupération post-catastrophe. 	<ul style="list-style-type: none"> L'application de certaines technologies (notamment celles à caractère expérimental) peut être conditionnée par l'accès à des ressources financières des PEID et des PMA, qui seront dans certains cas tributaires d'un financement international.
	Réduction au minimum de l'exposition et de la vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> Systèmes d'alerte précoce : capacités d'observation de la Terre, prévisions météorologiques avancées, surveillance des principaux aléas potentiels au sein du système climatique (par exemple, salinité des océans, inlandsis de l'Antarctique, fonte du pergélisol). Capacités à communiquer et à répondre aux signaux d'alerte précoce, à travers les communications mobiles ou l'Internet, par exemple. 	<ul style="list-style-type: none"> L'aptitude à produire des alertes précoces sera fonction des capacités technologiques (de modélisation et de surveillance). Les déficiences technologiques et infrastructurelles dans certaines régions peuvent réduire l'efficacité des systèmes d'alerte précoce.
Élaboration, mise en œuvre et évaluation des stratégies – Suivi et examen	Surveillance, contrôle et enseignements tirés de la pratique	<ul style="list-style-type: none"> Les techniques d'apprentissage automatique peuvent créer des inventaires des phénomènes et des impacts extrêmes pour mieux comprendre les risques. 	<ul style="list-style-type: none"> Les inventaires nationaux peuvent mettre en lumière les facteurs qui influent sur l'exposition et la vulnérabilité dans les différentes régions.

Composante	Méthode	Soubassement technologique (y compris les infrastructures scientifiques)	Considérations relatives aux PEID et aux PMA
Éléments transversaux	Communication	<ul style="list-style-type: none"> • Les technologies de l'information et de la communication sont à la base des médias sociaux, des groupes de discussion, ainsi que de l'analyse prédictive, qui visent à mieux comprendre les risques. • Les technologies de l'information et de la communication permettent d'avoir accès aux alertes précoces et aux autres informations pertinentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisation aux craintes relatives aux pertes et aux dommages auxquels doivent faire face les PMA et les PEID et renforcement du dialogue à leur sujet.
Éléments transversaux	Participation des parties prenantes	<ul style="list-style-type: none"> • En association avec l'utilisation des médias sociaux, les applications d'enquête, les groupes de discussion et les analyses prédictives (modélisation, apprentissage automatique et exploration de données, par exemple) peuvent également offrir de précieuses informations recueillies auprès des différentes parties prenantes sur la diversité et l'intensité des perceptions, des préoccupations et des impacts socioéconomiques potentiels liés aux risques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les technologies de communications satellitaires accroissent la résilience des communications avec les organismes internationaux et les parties prenantes locales et régionales, aux fins d'échange d'informations sur des sujets allant des aléas climatiques jusqu'aux mesures de réduction des catastrophes.

Note : * Les UAV sont des véhicules aériens sans pilote.

Source : d'après (Schweizer et Renn, 2019^[3] ; IRGC, 2017^[4] ; Arendt-Cassetta, 2021^[6]).

6.2. Technologies pour comprendre, réduire et gérer les risques de pertes et dommages induits par le changement climatique

Cette section examine les trois composantes de la méthode de gouvernance des risques brièvement décrites à la section 6.1. Pour chacune de ces composantes, elle met en lumière comment la technologie peut contribuer aux méthodes de gouvernance des risques. L'application de la technologie sera d'autant plus efficace si elle s'accompagne d'une communication transparente, d'un dialogue durable avec les parties prenantes et d'un renforcement des capacités.

6.2.1. Technologies pour caractériser les risques de pertes et dommages

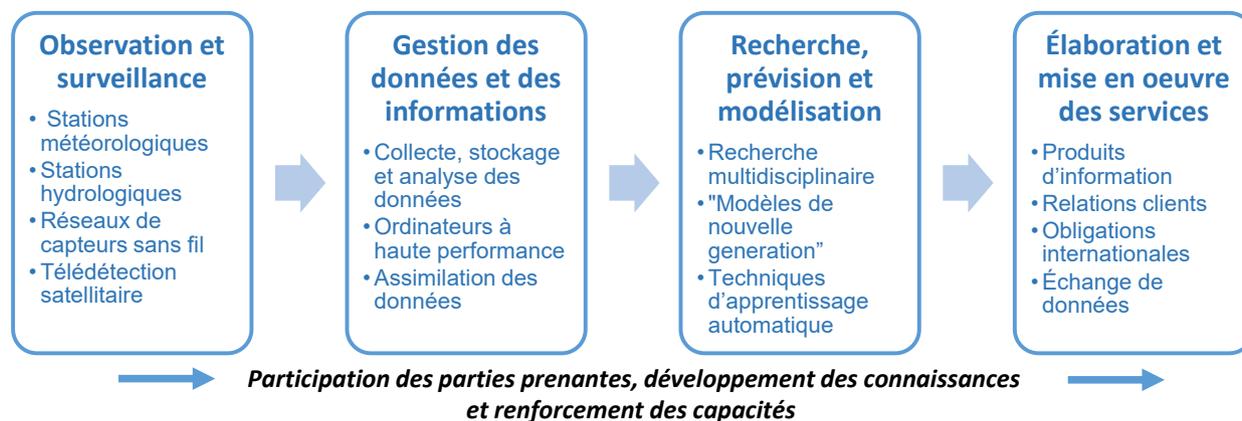
La compréhension du climat, et à plus forte raison celle de la variabilité et du changement climatiques, est une tâche complexe d'un point de vue scientifique (voir l'examen au chapitre 2). Une meilleure compréhension de l'atmosphère et de ses relations d'interdépendance avec les autres composantes du système climatique peut efficacement aider à se préparer à affronter les risques, à les gérer et à les réduire. Les progrès technologiques dans des domaines tels que les moyens d'observation spatiale, les puissances de calcul élevées, les logiciels de cartographie et les systèmes de télécommunications ont permis de disposer d'outils essentiels pour mieux comprendre le système climatique, et de parfaire la collecte de données d'observation et la modélisation climatique. Ces progrès technologiques ont été d'une importance cruciale pour comprendre la nature du changement climatique et des aléas liés au climat. Ils continueront d'être à la base de nouvelles améliorations de la compréhension des risques, ainsi que des mesures pour y faire face. Les technologies d'observation de la Terre, au moyen notamment de satellites et de la télédétection, produisent de plus en plus gros volumes de données qui connaissent un développement exponentiel (Reichstein et al., 2019^[7]).

Le dialogue avec les parties prenantes peut aider les décideurs à en apprendre davantage sur leurs perspectives de risques et sur la manière dont les aléas climatiques exercent une influence négative sur leurs moyens d'existence. Cela contribuera à une analyse approfondie qui servira de base à la caractérisation des risques pour un certain lieu ou pour une population donnée. Une telle analyse révèle comment ces aléas se manifestent dans le contexte socioéconomique, de manière à éclairer les processus décisionnels sur l'opportunité et les moyens de réduire et de gérer les risques qui s'ensuivent. Comme indiqué au chapitre 1, le risque climatique est fonction de l'aléa, de l'exposition des personnes et des biens à l'aléa, et de leur vulnérabilité à cet aléa particulier. Cette section examine comment la technologie peut contribuer à l'évaluation, en s'attachant elle-même à étudier les aléas, l'exposition et la vulnérabilité.

Évaluation des aléas

L'évaluation des aléas consiste à identifier les aléas et estimer le risque qu'ils se produisent. Les données relatives aux aléas sont l'élément nécessaire pour procéder à l'estimation de l'ampleur et de la fréquence des phénomènes météorologiques. La chaîne de valeur des services d'information météorologique et climatologique (SIMC) (Graphique 6.1.) doit produire des connaissances de grande qualité de manière à offrir des informations précises sur les évolutions tendanciennes et les projections. La présente section met l'accent sur certains grands éléments de ce processus sans viser à l'exhaustivité.

Graphique 6.1. Chaîne de valeur des services d'information météorologique et climatologique



Source : D'après (OMM, 2015^[8] ; CIF, 2020^[9]).

Les SIMC jouent un rôle crucial dans la prise de décision (Allis et al., 2019^[10]) en apportant les informations nécessaires sur les états passés, présents et à venir de l'atmosphère à différentes échelles de temps. Ils procurent les informations nécessaires à l'évaluation des impacts potentiels des aléas pour un secteur géographique donné. Parmi les éléments de l'infrastructure sous-jacente figurent les instruments de collecte de données ; les systèmes de collecte, de conservation et de gestion des données ; ainsi que les processus d'élaboration et de mise à disposition des services météorologiques et climatologiques. La recherche suggère que les services météorologiques sont bien établis, mais que les services climatologiques destinés à guider les actions à plus longue échéance le sont moins, malgré des progrès notables ces dernières années. Cela a contribué aux appels à une amélioration constante du dialogue entre les fournisseurs et les utilisateurs de ces services et à faire en sorte que les informations soient utilisables et utiles pour les utilisateurs finals.

Les SIMC peuvent permettre une meilleure compréhension des aléas météorologiques et climatiques, et donner ce faisant aux pouvoirs publics, aux entreprises et aux individus la possibilité de mieux anticiper et mettre en œuvre les mesures de réduction et de gestion des risques. Par exemple, les données sur les marées, les vents et les pressions atmosphériques qui entrent en interaction avec les caractéristiques du littoral peuvent permettre de mieux comprendre les aléas liés aux ouragans et aux inondations (Alley, Emanuel et Zhang, 2019^[11]). Des millions de personnes vivent déjà de par le monde dans des zones inondables. Une meilleure prévision des conditions météorologiques peut aider à suivre l'ampleur et l'intensité des phénomènes dangereux pour limiter les préjudices, ainsi que les pertes et dommages potentiels subis par les populations dans ces zones exposées (Zhang et Weng, 2015^[12]).

Les composantes de la chaîne de valeur des SIMC incluent divers ensembles de parties prenantes et de plateformes de service. Elles englobent les activités des stations d'observation météorologique et hydrologique ; la gestion et la recherche de données et d'informations ; les produits de prévision et de modélisation ; ainsi que l'élaboration et la dissémination des services (OMM, 2015^[8]). Chacune des composantes est créatrice de valeur et établit un lien entre la production des services et les processus décisionnels des parties prenantes. La fiabilité et l'exactitude des observations météorologiques ne pourront être utiles que si les systèmes peuvent les traduire en informations susceptibles de guider les processus décisionnels (OMM, 2020^[13]). Il sera donc nécessaire de continuer à investir dans la chaîne de valeur des SIMC pour assurer la fiabilité et la mise à disposition des produits d'information météorologique et climatologique. Ces produits doivent demeurer pertinents, accessibles et crédibles pour un large public de décideurs, de clients et de populations locales (OMM et CMSC, 2019^[14]).

Observation et surveillance

Au niveau le plus fondamental, un réseau de stations météorologiques fournit des mesures directes des principales variables météorologiques avec un degré de granularité suffisamment fin. C'est essentiel pour établir des séries chronologiques fiables sur la variabilité et le changement climatiques, y compris la fréquence des phénomènes extrêmes, et pour calibrer les modèles, ainsi que les données fournies par les instruments de télédétection. Le réseau existant est toutefois d'une faible densité, surtout dans les pays en développement. Par exemple, la température de l'air est une variable essentielle pour évaluer le changement climatique. Cependant, les observations de la température de l'air sont issues d'un nombre limité de stations météorologiques principalement situées dans les pays développés (OMM, 2015^[8]). De surcroît, les observations présentent souvent – notamment dans les pays en développement – des lacunes temporelles et spatiales, aussi les séries chronologiques comportent-elles des variables manquantes. Les satellites peuvent par contre mesurer de manière plus suivie la température à la surface du sol. Ils peuvent ainsi établir une série de données où la température de l'air est déterminée à partir de la température à la surface du sol (Hooker, Duveiller et Cescatti, 2018^[15]).

Outre les instruments météorologiques classiques, diverses technologies peuvent permettre de mieux comprendre les aléas liés au climat (CNUCED, 2021^[16]). À titre d'exemple, les mesures des précipitations sont des données d'entrée fondamentales pour les modèles hydrologiques et écologiques. Les relevés pluviométriques permettent de mesurer les précipitations à la surface de la Terre. Ils peuvent cependant être incomplets en raison des limites que présentent les stations de surface (voir chapitre 2 et Encadré 6.3). Pour en accroître la précision, les relevés pluviométriques peuvent par exemple être associés aux observations satellitaires, qui se caractérisent par une plus grande homogénéité spatiale (Sun et al., 2018^[17]). Les données issues des capteurs maritimes et aériens, ainsi que des satellites spatiaux, fournissent des quantités d'informations qui peuvent jeter une certaine lumière sur des changements tels que ceux enregistrés par les glaces de l'Arctique. Beaucoup de ces instruments peuvent fournir des données quasiment en temps réel pour surveiller l'atmosphère, les océans et la surface du sol, et notamment les effets de la variabilité et du changement climatiques.

Les observations satellitaires de la Terre constituent un important outil mondial de prévision météorologique et d'observation du changement climatique. Les observations climatiques reposent sur un ensemble complémentaire de satellites et de mesures à la surface pour assurer la couverture nécessaire. La capacité des satellites à surveiller l'environnement depuis l'espace peut aider les pays en développement qui ne disposeraient pas de leurs propres capacités. Par exemple, le système mondial d'observation (SMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) englobe des observations au sol aussi bien que depuis l'espace qui sont essentielles pour mieux comprendre le système Terre et faciliter la production de SIMC. Les données satellitaires fournies par le SMO de l'OMM représentent 90 % des données utilisées pour établir les prévisions météorologiques numériques mondiales, sur lesquelles s'appuient la plupart des méthodes de modélisation du système Terre (UIT, 2020^[18]).

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des nœuds de capteurs capables de collecter des données en temps réel sur le milieu environnant, telles que la température, la pression de l'eau et les zones impactées par des fumées (BAD/OCDE, 2020^[19]). Avec l'Internet des objets (IdO)¹, par exemple, les RCSF peuvent être déployés dans les environnements urbains pour détecter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de pollution atmosphérique et en mesurer les niveaux, qui peuvent ensuite être utilisées aux fins de surveillance de l'environnement (Khan, Gupta et Gupta, 2020^[20]). Dans le secteur agricole, ils peuvent assurer la surveillance de la qualité de l'eau ou de l'humidité des sols (UIT, 2016^[21]). Au Rwanda, par exemple, les plantations de thé subissent un stress du fait de la sécheresse, des inondations, de l'érosion des sols, des ennemis des cultures et des maladies. Les RCSF offrent aux planteurs de thé une solution de surveillance des conditions pédologiques (humidité, acidité, etc.) et du milieu environnant présentant une plus grande efficacité-coût que les onéreuses technologies spatiales. Ces RCSF sont alimentés par

des panneaux solaires et les données sont transmises par des moyens de communication non filaires (UIT, 2016^[21]).

Gestion des données et de l'information

Les différentes données collectées sur le système Terre proviennent de diverses sources pouvant présenter des caractéristiques variables sous l'angle des échelles temporelles et spatiales, des types de données et des processus physiques couverts. La pléthore de données disponibles donne largement la possibilité de faire avancer la recherche scientifique. Aussi la gestion des données est-elle essentielle pour les travaux de recherche, de prévision et de modélisation climatiques. Chacun des différents centres participant à la gestion des données doit en assurer l'intendance dans le cadre du Système mondial d'observation du climat (SMOC) (OMM, 2015^[22]). Il s'agit en l'occurrence des centres de données internationaux, des centres nationaux, des centres de suivi en temps réel, des centres d'analyse en différé et des centres de réanalyse. L'amélioration de la surveillance du climat nécessite un renforcement des capacités (outils, méthodes et infrastructures) de gestion des données. Des capacités renforcées faciliteraient le stockage et l'échange des données, permettant d'assurer une circulation régulière des données en direction de l'ensemble des utilisateurs, la surveillance des flux de données, ainsi que la conservation à long terme des données en vue d'une utilisation future (OMM, 2015^[22]). L' examine l'importance que revêtent les services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) dans ce contexte.

Encadré 6.1. Renforcement des services météorologiques et hydrologiques nationaux

Les services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) constituent la principale source de données et d'informations météorologiques, hydrologiques et climatologiques dans de nombreux pays. Leur mandat consiste souvent à établir, mettre en œuvre et entretenir les systèmes nationaux d'observation, de surveillance, de modélisation et de prévision. Il implique en outre le traitement des données, ainsi que la gestion, l'échange et la dissémination des produits connexes (OCDE, 2021^[23]).

L'information hydrométéorologique apporte une aide importante aux différentes parties prenantes exposées aux risques climatiques (dans des domaines tels que l'agriculture, l'énergie, les transports, la santé et l'eau). Les SMHN peuvent, par exemple, être à la base d'alertes précoces et d'un aménagement du territoire. La demande croissante de SMHN rend d'autant plus nécessaire la réalisation d'investissements supplémentaires. Ces investissements sont par exemple indispensables pour mettre en place un vaste réseau d'observation de grande qualité, une collecte et une gestion efficaces des données, des installations informatiques à la pointe du progrès, des systèmes perfectionnés d'analyse des données, une recherche renforcée et une dissémination efficace (OMM, 2015^[8]).

Les SMHN sont des entités bénéficiant d'un financement public. Compte tenu de la concurrence pour bénéficier des budgets de l'État, les SMHN de nombreux pays en développement sont souvent assez mal pourvus en ressources. Cela a des effets négatifs sur les capacités technologiques et humaines (tant du point de vue du nombre des effectifs que de leurs compétences techniques en matière d'entretien des équipements et de traitement des données et de l'information) (OCDE, 2021^[23]). Bien que les processus liés aux SMHN puissent être renforcés de diverses manières en fonction du contexte régional ou national, les principales recommandations sont les suivantes (Hewitt et al., 2020^[24] ; Bruno Soares, Daly et Dessai, 2018^[25] ; OMM, 2015^[8]) :

- **Renforcer** la collaboration avec les partenaires sectoriels et avec les principales parties prenantes afin de coproduire des services sur mesure en matière d'impacts, de risques et de stratégies. La collaboration internationale peut favoriser le partage de connaissances avec des pays qui pourraient avoir à faire face à des défis climatiques similaires.
- **Constituer** un portefeuille de financements fournis par divers investisseurs pour pouvoir disposer des ressources nécessaires et promouvoir le progrès scientifique et technique. Une coordination et une étroite collaboration avec les donateurs et les banques de développement seront dans ce contexte indispensables pour éviter une mise en œuvre fragmentée.
- **Aider** les PMA en leur assurant un meilleur accès aux modèles climatiques, aux données d'observation et aux puissances de calcul de pointe, de sorte que leurs SMHN puissent fournir de meilleures prévisions présentant un degré de granularité suffisant pour servir de base à des approches décisionnelles éclairées.
- **Mettre en place** de meilleures stratégies de communication pour montrer les avantages des SMHN. Il serait ainsi possible de justifier des dépenses publiques visant à procéder à des investissements publics sûrs et soutenus, à travers, par exemple, d'études d'évaluation mettant en évidence les retours sur investissement potentiels.

Les techniques avancées d'assimilation des données et les ressources informatiques de pointe permettent d'assimiler de gros volumes d'observations à haute résolution des flux environnementaux provenant de sources au sol identifiées au moyen de la télédétection. Il est ensuite possible d'analyser et de prévoir ces flux à l'aide de modèles climatiques (Zhang et Weng, 2015^[12]). Les modèles fonctionnant de manière cohérente et continue au fil du temps sur la base de diverses observations ont radicalement transformé la prévision des phénomènes dangereux. Les prévisions météorologiques des aléas tels que les ouragans,

les blizzards et les crues éclair sont désormais plus précises et disponibles en temps utile (Alley, Emanuel et Zhang, 2019^[11]). Un ouragan, par exemple, constitue un phénomène à grande échelle. Il est toutefois hautement dépendant de processus non linéaires de plus petite ampleur qui sont plus difficiles à observer et à prévoir. L'assimilation d'observations par télédétection haute résolution des caractéristiques de la structure de l'ouragan permet une modélisation plus réaliste du vortex afin d'obtenir de meilleures prévisions déterministes (Zhang et Weng, 2015^[12]). Un autre exemple en est l'assimilation de la réflectivité radar à haute résolution des propriétés des nuages issues des données de télédétection. Associées à celles fournies par les satellites, ces données permettent une meilleure modélisation des prévisions grâce à la prise en compte des évolutions précoces des phénomènes de tempête (Jones et al., 2015^[26]).

Dans la mesure où ils favorisent la mise à disposition et l'application des services climatologiques, les outils de gestion des données peuvent aider les pays disposant de capacités technologiques et numériques moins développées. Au nombre de ces outils figurent des systèmes infonuagiques ouverts destinés à assurer la collecte, le stockage, le traitement et la prévision des données. Sur les 28 grands groupes de modélisation contribuant au projet international d'intercomparaison des modèles climatiques (CMIP6), seulement 3 sont issus de pays en développement : République populaire de Chine (ci-après dénommée « Chine »), Inde et Thaïlande (CIF, 2020^[9]). Aucune extension de licence à une date ultérieure ne sera nécessaire pour accéder aux bases de données libres, aussi est-il plus facile d'avoir systématiquement accès aux données et aux informations pour les intégrer et en tenir compte dans les modèles. Cela s'avère particulièrement utile pour les chercheurs et les institutions publiques des PMA et des PEID dont les capacités institutionnelles et techniques de collecte et de modélisation des données peuvent être limitées. Malgré l'enthousiasme suscité dans les pays en développement par les données librement accessibles, la propriété, la copatrimoine et le lieu de stockage des données risquent de soulever des problèmes de pertinence (Brönnimann et al., 2018^[27]).

Plusieurs de ces bases de données et de ces plateformes sont accessibles aux chercheurs et aux décideurs. L'initiative « Observation de la Terre au service du développement durable » de l'Agence spatiale européenne offre ainsi un libre accès à une vaste base de données d'observation de la Terre. Elle ouvre aussi aux utilisateurs l'accès à un ensemble d'outils et de ressources logicielles pour visualiser, analyser et traiter les données d'observation (ESA, sans date^[28]). Le service Copernicus concernant le changement climatique (*Copernicus Climate Change Service – C3S*) est une ressource régionale et mondiale qui offre un libre accès aux données et aux outils climatiques, tels que la bibliothèque de référence et les didacticiels de l'interface de programmation d'application (*Application Programming Interface – API*) pour diverses applications (Copernicus, sans date^[29]). Oasis Loss Modelling Framework Ltd assure une modélisation des catastrophes librement accessible associant des partenariats multinationaux public-privé d'assureurs, de réassureurs, d'entreprises et de spécialistes de la modélisation météorologique pour faire en sorte que la modélisation des assurances soit plus accessible et plus transparente pour le public. Cette plateforme est destinée aux pays en développement et vise à éclairer la modélisation et à améliorer l'interopérabilité (Oasis, 2021^[30]).

Recherche, prévisions et modélisation climatiques

Pour comprendre les principales caractéristiques du climat de la Terre d'un point de vue quantitatif, les théories et les observations physiques doivent être converties en modèles représentant les principales caractéristiques et interactions. La complexité même du système implique que certaines dynamiques fondamentales doivent faire l'objet d'estimations approximatives et que les biais doivent être corrigés. En outre, les échelles spatiales et temporelles du modèle retenu doivent être conformes aux capacités de l'ordinateur, qui peuvent être limitées. Certains processus essentiels à plus petite échelle que ceux résolus par le modèle (par exemple la formation des nuages) doivent donc être décrits au moyen de paramètres estimés plutôt que par des calculs explicites. Ces caractéristiques peuvent avoir des répercussions sur d'importants aspects du comportement du modèle, aboutissant à des projections très différentes pour certains phénomènes climatiques dans certaines régions (Shepherd, 2014^[31] ; Bony et al., 2015^[32]).

La compréhension des incertitudes liées à la disponibilité des données d'observation (chapitre 2) peut aider à améliorer les performances des modèles climatiques. Les progrès des méthodes d'apprentissage automatique permettent d'identifier les incertitudes des modèles et de tirer des enseignements essentiels sur les caractéristiques spatiotemporelles à partir de séries de données complexes, de très grande ampleur et en constante évolution portant sur les variables relatives à la Terre. Les incertitudes liées aux variations saisonnières ou interannuelles, qui peuvent être très variables d'une région à l'autre et au fil du temps (voir chapitre 2), sont un écueil pour les modèles climatiques. Les techniques d'apprentissage automatique, telles que le réseau neuronal artificiel, peuvent supprimer le bruit des données et prédire les variations saisonnières. Ces techniques peuvent par exemple permettre d'établir les profils de respiration au printemps induits par la croissance des racines, le développement des feuilles et la forte humidité des sols. Ces caractéristiques n'étaient auparavant pas bien représentées dans les modèles du cycle du carbone (Papale et Valentini, 2003_[33]).

L'apprentissage profond, une méthode d'apprentissage automatique, peut permettre de dégager des caractéristiques et des enseignements de séries de données complexes et de grande ampleur afin de catégoriser, d'identifier et de prédire les régimes météorologiques à partir de détails spatiaux et temporels (Reichstein et al., 2019_[7]). Il peut par exemple servir à détecter les ouragans en déterminant leurs spécificités spatiales à partir de leurs caractéristiques (niveau de pression, allure spatiale, flux en spirale, etc.) en vue de définir et de catégoriser le type de phénomène extrême (Liu et al., 2016_[34]). Il importe que les phénomènes extrêmes soient caractérisés avec précision dans les simulations climatiques et les archives de données d'observation, de manière à comprendre les évolutions tendanciennes pour détecter les phénomènes extrêmes qu'elle qu'en soit l'échelle géographique (Reichstein et al., 2019_[7]). L'apprentissage profond a également été appliqué à la modélisation de la variabilité à court terme du niveau des mers à l'échelle régionale en s'appuyant sur les estimations des températures océaniques. Cet outil peut offrir un moyen prometteur d'anticiper les changements du niveau des mers pour les besoins des processus décisionnels à courte échéance (Nieves, Radin et Camps-Valls, 2021_[35]).

Les capacités en science des données et les connaissances théoriques doivent être renforcées, car elles sont indispensables pour le traitement et l'interprétation des données d'observation. Les applications de l'apprentissage automatique ouvrent des perspectives, mais elles pourraient être limitées du fait d'un certain nombre de difficultés. Celles-ci ont trait à l'interprétabilité ; à l'évolution et la modification des variables physiques au fil du temps ; ainsi qu'à l'incertitude et la complexité des données d'observation. Les méthodes d'apprentissage profond peuvent par exemple être précises lorsqu'elles sont appliquées à la modélisation. La qualité des prévisions est toutefois tributaire de celle des données d'observation fournies à l'algorithme (CNUCED, 2021_[16] ; Reichstein et al., 2019_[7]). La série de données d'apprentissage utilisée pour instruire un algorithme en vue de prédire un résultat peut être tirée d'observations qui ne sont pas véritablement représentatives du modèle, surtout si cette série est d'ampleur réduite (Karpatne et al., 2017_[36]). Si la série de données d'apprentissage est biaisée, les modèles d'apprentissage automatique risquent de finir par reproduire ces biais. En outre, compte tenu de l'évolution constante des dynamiques climatiques et des processus physiques, les prévisions à long terme risquent d'être peu plausibles (Karpatne et al., 2017_[36]). Les nouvelles méthodes d'analyse des séries de données scientifiques associant les connaissances théoriques, la modélisation physique et des algorithmes capables d'apprentissage à partir d'étiquettes biaisées seront essentielles pour exploiter utilement les séries de données d'observation du système Terre (Bergen et al., 2019_[37]).

La mise au point de modèles climatiques est une tâche gourmande en ressources, car elle nécessite la participation d'une multiplicité d'acteurs pour élaborer et rendre disponibles des données et des informations cruciales. Le Système mondial de traitement des données et de prévision de l'OMM comporte plusieurs composantes qui en font partie intégrante. L'OMM a par exemple désigné des Centres mondiaux de production de prévisions à longue échéance répartis autour du monde (OMM, sans date_[38]). Ces centres soutiennent les Centres climatiques régionaux (CCR) de l'OMM, ainsi que les SMHN. Par exemple, le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme fournit des prévisions

ainsi que des analyses et des séries de données climatiques à l'échelle mondiale susceptibles de répondre aux besoins des différents utilisateurs. Ces données peuvent être complétées par les Centres mondiaux de production de prévisions climatiques annuelles à décennales. Ces centres s'appuient sur l'expertise de climatologues réputés ainsi que sur les récents modèles informatiques élaborés par des centres climatiques mondiaux de premier plan pour produire des points sur les informations utiles aux décideurs du monde entier (OMM, 2020^[39]). Les CCR organisent des forums sur les perspectives climatiques régionales afin de parvenir à un consensus – parmi les experts en climatologie nationaux, régionaux et internationaux – sur les produits pertinents en matière de perspectives climatiques, tels que les perspectives climatiques régionales. Ces forums favorisent la coordination des activités de prévision saisonnière et l'élaboration de produits adaptés afin de promouvoir la fourniture de services par les SMHN au niveau national. Ils assurent la cohérence de l'accès aux informations climatiques et de leur interprétation (OMM, sans date^[40]).

Élaboration et fourniture de services

Des SIMC efficaces peuvent aider les décideurs à réduire et gérer les risques de pertes et dommages. Encore faut-il que la société tire parti de manière optimale des SIMC disponibles pour prendre des décisions plus éclairées (Hewitt et al., 2020^[24]). Les SIMC sont surtout utiles lorsqu'ils sont adaptés aux besoins des décideurs et de la société et qu'ils fournissent des informations pertinentes, accessibles et crédibles (OMM et CMSC, 2019^[14]). Il est toutefois ardu d'identifier les utilisateurs et de déterminer comment dialoguer avec eux, ce qui rend difficile une participation active et rigoureuse des utilisateurs (Hewitt et al., 2020^[24]). Pour réduire la vulnérabilité et l'exposition des vies humaines et des moyens d'existence aux aléas climatiques et météorologiques, il est nécessaire de bien comprendre le contexte socioéconomique. Les équipes interdisciplinaires de chercheurs, d'experts en communication et de spécialistes en sciences sociales apportant des compétences dans différents domaines pourraient de ce fait être encouragées, afin d'offrir des SIMC appropriés à certaines institutions et certains secteurs particuliers. Cela peut conférer une valeur ajoutée à l'élaboration et à la fourniture des services grâce à une prise en considération de la diversité des structures sociales, des comportements et des contextes, tout en tenant compte des capacités techniques des utilisateurs (Shove, 2010^[41]).

Les investissements dans les compétences humaines peuvent favoriser la compréhension des processus climatiques. Ces investissements peuvent se manifester par des efforts d'éducation, de formation et de mentorat dans des domaines multidisciplinaires tels que la science, l'analyse des données et l'intelligence artificielle. La climatologie et les informations sur le climat tendent à produire des résultats complexes à interpréter. Les non scientifiques peuvent n'avoir ni les capacités techniques indispensables pour interpréter les résultats ni les facultés de prévision nécessaires à la prise de décisions (Bruno Soares, Daly et Dessai, 2018^[25]). Pour être capables de gérer les risques liés au climat, les pays et les secteurs concernés devront être davantage sensibilisés au problème du changement climatique, avoir accès aux informations climatologiques et être à même d'interpréter les SIMC. L'exploitation de ces capacités pourrait ensuite aider à prendre des décisions plus judicieuses du point de vue du climat, à améliorer la modélisation, et à définir de meilleures options de gestion des risques (OMM, 2015^[8]).

Limitation des capacités de caractérisation des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique

Les SIMC peuvent être un outil efficace au service de la gouvernance des risques climatiques, et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, ils peuvent aider à protéger des vies, par exemple en apportant un soutien aux systèmes d'alerte précoce (SAP). Ils peuvent également permettre de prendre des mesures anticipatives et préventives pour réduire et gérer les pertes et dommages (Hallegatte, 2012^[42]). Les PMA et les PEID présentent toutefois un retard significatif en matière de SIMC, alors qu'ils sont également les plus vulnérables aux impacts de la variabilité et du changement climatiques (OMM, 2020^[13]). Les technologies spatiales et les instruments *in situ* peuvent être excessivement coûteux pour nombre de PMA

et de PEID. De plus, beaucoup d'entre eux ne disposent ni des infrastructures de soutien, ni de la gouvernance et des capacités numériques nécessaires pour mettre en place et exploiter les équipements d'observation et de surveillance. À titre d'exemple, les pays d'Afrique subsaharienne ne bénéficient pas d'un accès stable à des réseaux de distribution d'électricité et de télécommunications de base. Dans ce type de situations, des solutions plus simples peuvent s'avérer d'une plus grande efficacité-coût (UIT, 2016^[21]). La section 6.2.4 examine plus en détail les questions de dissémination des technologies.

Les partenariats mondiaux et la collaboration internationale sont essentiels pour procéder à des échanges de données d'observation de haute qualité et pour aider les pays dont les capacités nationales sont limitées à y avoir accès. La combinaison des données fournies par le réseau d'observation national avec la réanalyse des données satellitaires et climatiques, ainsi qu'avec les cartes d'élévation, peut accroître la disponibilité des données. Ce processus a par exemple aidé à produire des séries temporelles complètes sur le plan spatial couvrant 30 années de précipitations et 50 années de températures, avec un maillage de 4 km de côté en Afrique. Ces séries temporelles ont sensiblement amélioré la caractérisation des informations sur les risques climatiques à une échelle locale (Dinku et al., 2017^[43]).

L'intelligence artificielle peut faciliter les efforts pour combiner des données issues de sources différentes (Gil et al., 2018^[44]). L'*International Research Institute for Climate and Society* a lancé l'initiative *Enhancing National Climate Services* (« améliorer les services climatiques nationaux ») en vue d'aider les pays africains à combler les lacunes des données d'observation et à accroître la qualité de celles-ci. Les données des séries temporelles pourraient s'en trouver améliorées par voie de conséquence. L'Encadré 6.2 dresse une liste des initiatives similaires qui favorisent la production de données et aident à renforcer la connaissance des risques climatiques au moyen de divers outils d'évaluation des risques.

La disponibilité des données au niveau local n'en demeure pas moins problématique. La compréhension des impacts à l'échelle locale est particulièrement cruciale, étant donné que la population de la zone considérée pourrait devoir faire face à une augmentation de la fréquence de différents types d'aléas climatiques survenant l'un après l'autre (de fortes inondations suivies de sécheresses, par exemple) (Mohanty, 2020^[45]). Le manque de données sur les risques au niveau local empêche de procéder à des évaluations des risques localisés, ce qui fait obstacle à l'élaboration de plans et de stratégies reposant sur des informations fiables pour réduire l'ampleur des pertes et dommages. Les séries de données sur les variables climatiques provenant d'organisations telles que la Banque mondiale, le Centre européen, l'Administration américaine des affaires océaniques et atmosphériques (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) et NatCatService sont le plus souvent disponibles en métaformat ou en format spatial. Ce format est complexe et exige des compétences techniques en analyse des données ou l'utilisation de logiciels géospatiaux pour servir de base aux évaluations des risques. Mohanty (2020^[45]) décrit une méthodologie utilisée en Inde pour créer des données sur les aléas selon un maillage au niveau local ou un *atlas des risques climatiques*. Cette méthodologie peut permettre une identification fine des risques pour améliorer l'état de préparation et favoriser des politiques climatiques efficaces. Une analyse décennale basée sur une cartographie des aléas au niveau local peut mettre en lumière les effets cumulés enregistrés dans certaines régions locales, ainsi que les éventuelles modifications des zones microclimatiques.

Encadré 6.2. Outils d'évaluation des risques

Plusieurs plateformes visent à s'attaquer aux problèmes liés au renforcement des capacités d'évaluation quantitative des risques au niveau régional et national. Ces plateformes peuvent donner aux décideurs les moyens d'agir grâce à une meilleure compréhension des risques climatiques et des approches permettant de les gérer (GFDRR, 2016^[46]). Ces plateformes sont par exemple les suivantes :

- **L'Integrated Database for African Policymakers (IDAP)** regroupe des séries de données pertinentes relatives au climat, aux récoltes, à l'hydrologie et aux moyens d'existence au sein d'une plateforme fonduagique. Ces informations permettent de traduire les scénarios d'aléa en projections des impacts sur les moyens d'existence de la population sous une forme aisément compréhensible pour les non spécialistes (Cornforth, Petty et Walker, 2021^[47]). L'IDAP permet aux décideurs locaux de créer et d'explorer leurs propres scénarios lors de l'élaboration des plans d'adaptation.
- **L'Initiative 510 de la Croix-Rouge néerlandaise** offre des outils numériques d'évaluation des risques et des prévisions fondées sur les impacts permettant de pronostiquer les catastrophes imminentes susceptibles d'affecter les populations vulnérables afin de mettre en place des plans d'action anticipatifs (Red Cross 510, 2021^[48]).
- **L'Initiative d'évaluation et de financement des risques de catastrophe dans le Pacifique (Pacific Catastrophe Risk Assessment and Financing Initiative – PCRAFI)** fournit des outils d'évaluation des risques de catastrophe pour aider à comprendre, à modéliser et à évaluer les risques pour 15 États insulaires du Pacifique en s'appuyant sur les informations disponibles pour les besoins des évaluations régionales. Cette plateforme collecte, traite et élabore des données géoréférencées sur les aléas ainsi que des informations socioéconomiques pour la modélisation des risques. Ces données sont stockées et accessibles à travers le système d'information sur les risques dans le Pacifique (PCRAFI, sans date^[49]).
- **L'Initiative d'évaluation probabiliste des risques en Amérique centrale** fournit aux institutions publiques, aux universitaires et aux praticiens d'Amérique centrale des outils de renforcement des capacités d'évaluation, de compréhension et de communication relatives aux risques de catastrophe. Cette plateforme fournit des applications logicielles spécialisées, des services de conseil et des formations en vue de soutenir les stratégies de gestion et de financement des risques (CAPRA, sans date^[50]).
- **L'Évaluation des risques urbains** de la Banque mondiale offre aux gestionnaires des villes une méthode flexible pour identifier des mesures efficaces par rapport aux coûts en vue d'évaluer les risques auxquels pourrait devoir faire face leur ville. Le projet est centré sur les évaluations des impacts potentiels de ces aléas, sur les évaluations institutionnelles et sur les évaluations socioéconomiques (Dickson et al., 2012^[51]).

Le manque d'observations hydrométéorologiques peut avoir des conséquences d'ampleur régionale et mondiale. Les efforts mondiaux, tels que le Cadre mondial de services climatiques de l'OMM, visent à surmonter et réduire le manque de données dans les PMA et les PEID. Ils peuvent toutefois avoir également des effets positifs pour le reste du monde. Dans le cadre de cette initiative, le Département indien de météorologie a partagé sa technologie de prévision et son service de conseil météorologique avec de nombreux pays vulnérables dépourvus de services hydrométéorologiques (Biswas, 2016^[52]). L'Alliance pour le développement hydrométéorologique est par ailleurs parvenue à regrouper des organismes de développement international, des organisations humanitaires et des institutions financières en vue d'améliorer les services d'information météorologique, climatologique et environnementale. L'Alliance et ses nombreuses institutions partenaires, telles que les Fonds d'investissement climatique, le

Fonds pour l'adaptation, la Banque asiatique de développement et le Fonds vert pour le climat, mettent en œuvre des approches conjointes pour coordonner et concevoir les investissements destinés à aider les pays vulnérables. Leurs outils de collaboration et de diagnostic contribuent à soutenir l'environnement opérationnel des SMHN en renforçant les capacités et en établissant des prévisions météorologiques, des SAP et une information climatologique de grande qualité (Alliance, 2021^[53]). L'Alliance soutient également la facilité financière pour des observations systématiques (*Systematic Observations Financial Facility – SOFF*) de l'OMM afin d'aider les pays à produire les données d'observation indispensables pour des prévisions météorologiques et des services climatologiques de meilleure qualité (voir Encadré 6.3).

Encadré 6.3. La Facilité financière pour des observations systématiques de l'Organisation météorologique mondiale

L'insuffisance du partage mondial des données au sol réduit la précision des prévisions météorologiques et de l'analyse climatologique, du niveau local jusqu'au niveau mondial. Les petits États insulaires en développement (PEID) et les pays les moins avancés (PMA) ne disposent pas des capacités nécessaires pour assurer le fonctionnement et l'entretien des infrastructures d'observation. Une augmentation de la qualité des prévisions météorologiques des PMA et des PEID entraînera une amélioration des prévisions à moyen et à long terme à l'échelle mondiale, et elle permettra en outre de prendre des mesures climatiques plus adaptées dans ces pays.

Le Réseau d'observation de base mondiale (ROBM) mis en place par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) exige que les membres de cette dernière procèdent à la collecte et à un partage international de données d'observation au sol avec une résolution spatiale et une fréquence temporelle minimales. La pleine mise en œuvre du ROBM dans les PEID et les PMA nécessiterait un réseau opérationnel d'environ 2 300 stations terrestres. Pour y parvenir, il faudra installer ou remettre en état 2 000 stations d'observation. Un renforcement des capacités et des investissements substantiels et continus seront en outre nécessaires pour aider à assurer le fonctionnement et la pérennité des services météorologiques et climatologiques.

L'OMM a créé la facilité financière pour des observations systématiques (*Systematic Observations Financial Facility – SOFF*) pour aider à remédier au manque de capacités en matière de prévisions météorologiques et de services climatologiques de grande qualité. Elle fournira un financement et une assistance technique à long terme pour aider les pays vulnérables à respecter les paramètres établis d'un commun accord à l'échelle internationale et imposés par le ROBM. Au cours de ses cinq premières années de mise en œuvre, la SOFF vise à aider 68 PEID et PMA à se conformer aux exigences du ROBM et à avoir accès à une meilleure information météorologique et climatologique. À terme, il s'ensuivra une multiplication par 10 du nombre d'observations produites par les stations aérologiques et par 20 du volume des données issues des stations météorologiques partagées à l'échelle mondiale. L'amélioration des observations dans l'ensemble du monde aura un effet positif sur les prévisions locales et sur les analyses climatologiques, quel que soit le lieu considéré.

Source : (OMM, 2020^[13] ; OMM, 2020^[54]).

Évaluation de l'exposition et de la vulnérabilité

Outre les technologies de collecte et de suivi des données d'observation, les technologies de collecte de données sur l'exposition et la vulnérabilité contribuent également à offrir une vision globale des risques climatiques. Bien souvent, les données sur les aléas sont plus disponibles et accessibles que celles relatives à l'exposition et à la vulnérabilité. Cela donne à penser que les évaluations de la vulnérabilité et de l'exposition doivent être complétées par une meilleure identification du contexte socioéconomique

(OCDE, 2021^[23]). Plusieurs éléments devraient guider les évaluations de la vulnérabilité et de l'exposition. Il s'agit notamment des connaissances ; des approches qualitatives ascendantes, telles que le *réseau d'inférences causales* dans l'approche synoptique (chapitre 4) ; ainsi que la participation des parties prenantes. Ces éléments peuvent ensuite alimenter les processus quantitatifs pour soutenir les évaluations de l'exposition et de la vulnérabilité.

Pour comprendre la vulnérabilité sociétale, il faut disposer de données socioéconomiques granulaires et procéder à des évaluations des impacts des risques sur les moyens d'existence et l'état de santé des populations, et plus généralement sur leur cadre de vie. Beaucoup de ces éléments ne sont souvent pas directement quantifiables. Les impacts négatifs auront des effets disproportionnés sur les secteurs les plus vulnérables de la société, ce qui aggravera les inégalités sociales. Par exemple, les populations des zones côtières dont les revenus sont limités pourraient n'avoir que peu de possibilités de changer de lieu de résidence ou de reconstruire leurs logements après une catastrophe (Bell et al., 2021^[55]). L'utilisation de technologies et de produits de données géospatiales permet de superposer les données relatives aux aléas, à l'exposition et à la vulnérabilité. Ces éléments d'information peuvent accroître au fil du temps la granularité et la pertinence des évaluations des risques pour certains lieux et certains groupes socioéconomiques. À titre d'exemple, une étude a combiné des données sur l'intensité du stress thermique dans les îlots de chaleur avec des données de recensement géoréférencées. Elle est parvenue à la conclusion que, dans les principales villes américaines, les personnes de couleur vivent en moyenne dans des quartiers caractérisés par une intensité de stress thermique plus élevée, tout comme les populations en dessous du seuil de pauvreté (Hsu et al., 2021^[56] ; Chakraborty et al., 2020^[57]). Les données issues des systèmes de télédétection et d'information géospatiale peuvent être combinées avec celles fournies par les réseaux de téléphonie mobile pour créer une carte prédictive de la pauvreté, cette méthode étant plus rapide que celles reposant sur les données de recensement.

La technologie des téléphones intelligents peut être mise à profit pour produire des données granulaires sur la vulnérabilité d'une manière participative et efficace par rapport aux coûts ; ces données sont difficiles à obtenir par des méthodes classiques (telles que l'observation de la Terre) (Salvati et al., 2021^[58]). Le taux de possession de téléphones intelligents a augmenté dans tous les pays, accroissant ainsi les possibilités que la population participe à la collecte des données pertinentes. Par exemple, les données sur les caractéristiques physiques des bâtiments (matériaux de construction ou localisation, par exemple) sont nécessaires pour surveiller leur vulnérabilité aux aléas liés au climat. Ces données servent de base à l'élaboration et à la mise en œuvre de plans climatiques et de plans de protection civile à l'échelon local (Salvati et al., 2021^[58]). La ville italienne de La Spezia, par exemple, est exposée à un certain nombre d'aléas géohydrologiques tels que des inondations, des crues éclair ou des glissements de terrain. En s'appuyant sur des données produites de manière participative par les téléphones intelligents, les chercheurs ont réuni des informations sur les caractéristiques physiques des bâtiments qui pourraient aider à évaluer la vulnérabilité aux phénomènes hydrogéologiques (Salvati et al., 2021^[58]).

Les applications mobiles peuvent également permettre aux individus de télécharger des photos et de signaler les dommages aux infrastructures pour donner des indications sur les risques d'inondation dans un lieu déterminé. Ces indications peuvent ensuite servir pour la gestion des inondations et pour les évaluations hydrologiques reposant sur des données géolocalisées (Frigerio et al., 2018^[59]). Ces données produites de manière participative peuvent permettre d'identifier avec plus de précision les zones exposées aux aléas. Elles peuvent être utilisées pour conférer une valeur ajoutée aux produits de prévisions reposant sur des données relatives à la vulnérabilité et à l'exposition. Par exemple, une étude mondiale s'est appuyée sur l'application d'un algorithme aux publications effectuées sur les médias sociaux pour établir une base de données historiques et en temps réel sur les phénomènes d'inondation. Celle-ci peut être utilisée pour valider la modélisation des risques d'inondation ; assigner des tâches aux satellites (permettant de collecter des données de télédétection de l'exposition aux différents phénomènes) ; renforcer le système d'alerte précoce et la connaissance de la situation pour réduire les

conséquences des inondations extrêmes ; et améliorer les applications tributaires des données historiques (telles que les programmes de financement fondés sur les prévisions) (de Bruijn et al., 2019^[60]).

Les données à haute résolution et large couverture sur les caractéristiques des environnements naturels et bâtis peuvent contribuer sous divers aspects à la gestion des risques climatiques. Les méthodes avancées de télédétection, telles que la détection et la télémétrie par ondes lumineuses (*Light Detection and Ranging* – LIDAR) et le radar à synthèse d'ouverture (RSO), peuvent percer la couverture nuageuse pour déterminer les matériaux de construction, la hauteur des bâtiments et les caractéristiques topographiques (BAD/OCDE, 2020^[19]). Les détecteurs LIDAR et RSO ont été utilisés pour produire des cartes à haute résolution des aléas, car ils peuvent collecter des données à très fine résolution. Ces cartes peuvent ensuite servir à l'élaboration des stratégies de préparation et d'atténuation (Yu, Yang et Li, 2018^[61]). Par exemple, aux Philippines, les détecteurs LIDAR ont été utilisés pour identifier les dommages structurels imputables aux inondations dans les zones de faible altitude enregistrant une urbanisation rapide (Bragais et al., 2016^[62]). Ils ont également aidé à détecter le blocage des réseaux de transport après la tempête Katrina aux États-Unis en vue d'aider les équipes de secours (Kwan et Ransberger, 2010^[63]). Les données RSO peuvent être utilisées pour les stratégies de préparation aux catastrophes telles que l'élaboration de plans de réduction des risques d'inondation et de gestion des inondations (Rahman et Thakur, 2018^[64]).

Les détecteurs aériens peuvent enregistrer des images aériennes à plus fine résolution et fournir des informations sur la situation en temps réel pour faire face aux phénomènes dangereux. Il peut par exemple s'agir de détecter les zones exposées aux feux de forêt et de mesurer l'ampleur de l'aléa et sa proximité des zones habitées. Les aéronefs équipés de capteurs à infrarouge peuvent détecter les points chauds à faible altitude, enregistrer les données et les transférer directement aux pompiers présents sur le terrain (Marder, 2019^[65]). Les données collectées peuvent servir à améliorer et renforcer les protocoles et les plans stratégiques, grâce en particulier à l'élaboration de cartes en temps réel pour la gestion future des risques d'incendie. Elles peuvent également offrir un moyen perfectionné pour déceler les fines fissures et les légers dommages subis par les structures lors des évaluations réalisées à la suite des catastrophes (Sarker et al., 2020^[66]).

L'efficacité-coût des véhicules aériens sans pilote (UAV ou drones) peut être supérieure à celle des images aériennes prises depuis des aéronefs. Les UAV peuvent collecter des données au sol à haute résolution et les rendre plus accessibles pour les différentes parties prenantes (Minges, 2019^[67] ; BAD/OCDE, 2020^[19]). Les UAV peuvent transporter divers types de capteurs, dont des capteurs photographiques, vidéo, infrarouges, des capteurs de rayonnement et des capteurs météorologiques. En Tanzanie, par exemple, les UAV survolent régulièrement les quartiers urbains pour créer à l'intention des autorités locales des cartes détaillées de l'exposition aux risques d'inondation (Ackerman et Koziol, 2019^[68]). Les agriculteurs se sont servis d'UAV dotés de caméras numériques pour suivre l'état de leurs cultures, et pour détecter les dommages causés par les épisodes de sécheresse, les tempêtes de grêle et les inondations (Michels, von Hobe et Musshoff, 2020^[69]). Aux États-Unis, pendant l'ouragan Florence en 2018, les chercheurs ont utilisé des UAV submersibles pour mesurer la température de l'océan, dont la chaleur alimentait l'ouragan. Il a ainsi été possible de combler les lacunes que présentaient les images satellitaires et d'améliorer la modélisation des ouragans (Minges, 2019^[67]).

Pour décider comment faire face aux aléas climatiques, il faudra disposer d'une bonne compréhension spatiale et temporelle de l'exposition et de la vulnérabilité. Des données et des analyses géospatiales et des outils de visualisation tels que ceux décrits ci-dessus seront nécessaires à cet effet. Des capacités en temps réel devront permettre de suivre l'exposition des populations à un aléa donné et de faciliter les communications entre les autorités compétentes et les populations affectées. Les technologies examinées ci-dessus présenteront un intérêt tout particulier, qu'il s'agisse des communications mobiles, des médias sociaux ou de l'utilisation des images satellitaires et des UAV pour réaliser des évaluations rapides. Ces dernières exigeront des capacités avancées de traitement de données. Associées aux capacités de l'intelligence artificielle, les données géospatiales à haute résolution sur les profils d'exposition et de

vulnérabilité aideront également à guider le choix des mesures à adopter, ainsi que leur mise en œuvre. Les questions de confidentialité et de fiabilité des données devront être soigneusement prises en considération lors du recours aux applications de communication mobile, notamment à des fins de collecte de données au sein des populations touchées (Arendt-Cassetta, 2021^[6]).

Participation inclusive des parties prenantes à la mise en lumière des risques

La participation des parties prenantes est une composante transversale du processus de gouvernance des risques. Il reconnaît que les valeurs, les préoccupations et les visions du risque des divers groupes de parties prenantes seront différentes, d'un pays à l'autre comme au sein de chacun d'eux. Il pourrait en être ainsi du fait de leur situation socioéconomique ; de leur expérience passée des risques ; ou de différences de perception concernant la cause et la nature des aléas et de leurs conséquences. Ces différences peuvent également découler du discours politique et plus généralement public sur la question du risque ; des réseaux sociaux d'une personne ; de la capacité d'un groupe ou d'un individu à exercer une influence (par exemple à travers les médias sociaux) ; ou des attitudes et des points de vue plus larges face à la nature (Brody et al., 2007^[70]).

Les perceptions du public ou celles des individus peuvent être tout aussi importantes, voire davantage, que les évaluations scientifiques des risques pour inspirer les mesures prises pour faire face à ces derniers. Leur situation sociale peut exclure les populations vulnérables des débats sur l'évaluation des risques. Les responsables de l'action publique pourraient donc devoir nouer délibérément un dialogue avec eux de sorte que leurs points de vue puissent nourrir les processus décisionnels. Les savoirs locaux et indigènes peuvent par exemple utilement compléter les données d'observation sur les risques largement répandus auxquels ces populations ont dû faire face pendant des générations (voir Encadré 6.4). Les représentants du secteur privé peuvent offrir un autre angle de vue sur les risques qui peut alimenter la recherche, le progrès technologique et la communication sur les risques, entre autres.

Associés à l'utilisation des médias sociaux, les applications d'enquête, les groupes de discussion et les analyses prédictives (modélisation, apprentissage automatique et exploration de données, par exemple) peuvent également offrir de précieuses informations sur la diversité et l'intensité des perceptions, des préoccupations et des impacts socioéconomiques potentiels liés aux risques. Les systèmes d'information géographique et l'analyse spatiale peuvent également jeter une certaine lumière sur la manière dont la vulnérabilité et l'exposition influent sur la perception des risques (Brody et al., 2007^[70]). Ces technologies peuvent être conjuguées avec les processus de participation des parties prenantes pour éclairer les points de vue sur les risques. Ces approches peuvent être très utiles pour évaluer les différentes options envisageables puisque les perceptions ont vraisemblablement une incidence sur la propension à soutenir les interventions des pouvoirs publics. Elles peuvent également influencer sur l'exposition et la vulnérabilité, par exemple sur la probabilité que les parties prenantes construisent une maison dans une zone à haut risque.

Encadré 6.4. Savoirs locaux et indigènes

Les savoirs locaux recouvrent les connaissances et les compétences accumulées par les individus et par les populations d'un lieu donné. Les savoirs indigènes recouvrent les connaissances, les compétences et les philosophies développées par les sociétés ayant un long passé d'interactions avec leur environnement naturel (GIEC, 2019^[71]). De nombreuses populations locales ont des traditions bien ancrées en matière de réponse aux changements de l'environnement qui sont transmises de génération en génération à travers la tradition orale (Granderson, 2017^[72]).

Au Vanuatu, dans l'océan Pacifique, les savoirs indigènes dans le domaine de l'observation et de la prévision de la variabilité du climat ont été mis en pratique et transmis oralement de génération en génération. Associés aux connaissances scientifiques, les savoirs indigènes sur les profils bioclimatiques ont permis d'améliorer la surveillance du climat et la modélisation des aléas. Par exemple, ils fournissent des indications sur les liens que la formation des nuages, la direction du vent, les marées et les autres conditions environnementales entretiennent avec les changements de comportement des végétaux et des animaux (Granderson, 2017^[72]).

Aux États-Unis, les pompiers californiens ont noué un dialogue avec les tribus amérindiennes, qui mettent en pratique depuis des milliers d'années certaines techniques pour protéger leurs terres et éviter que des feux incontrôlés se propagent à travers les montagnes (Sommer, 2020^[73]). Dans les îles Hawaï, un projet visant à cartographier les aléas s'est appuyé sur une stratégie de modélisation participative avec les membres des communautés rurales, en tenant compte du savoir des *kupuna* (des anciens). La connaissance indigène des réseaux de communication a ainsi contribué à l'élaboration de plans d'adaptation spatiale (Baudoïn et al., 2016^[74]).

6.2.2. Technologies pour évaluer les risques de pertes et dommages

L'acceptabilité des différents risques est souvent fonction de la compréhension de ces risques par les parties prenantes. Comme indiqué aux chapitres 2 et 3, le degré de connaissance de ces risques est variable. Il peut dépendre du type d'aléa considéré, de la compréhension des expositions et des vulnérabilités qui lui sont liées, ainsi que de l'échelle temporelle et des enjeux. La présente section met l'accent sur certaines technologies qui contribuent à la gouvernance des risques, et notamment sur les progrès de la surveillance et de la modélisation climatiques, sur l'analyse prédictive et sur les outils d'évaluation. On peut considérer que le processus d'évaluation de la tolérabilité et de l'acceptation des risques comporte deux composantes distinctes, la première reposant sur des données factuelles (caractérisation des connaissances) alors que la seconde s'appuie sur la notion de valeur (évaluation des risques) pour procéder aux arbitrages nécessaires.

Caractérisation des connaissances

Les risques climatiques sont complexes et peuvent présenter différentes dimensions qui influencent les stratégies adoptées pour en assurer la réduction et la gestion. Les connaissances acquises lors de la phase de caractérisation des risques peuvent aider à classer le degré de compréhension des risques par rapport à un éventail de prises de décisions (voir section 4.2). Les extrémités de cet éventail correspondent à respectivement à une certitude absolue et à une totale ignorance. Entre les deux, il existe divers degrés d'incertitude allant d'un avenir clairement défini jusqu'à un avenir totalement inconnu, en passant par un petit nombre d'avenirs possibles relativement bien compris et par un grand nombre d'avenirs plausibles. La caractérisation des aléas et les moyens d'y faire face peuvent par conséquent être très variables.

La surveillance et la modélisation du climat, ainsi que les prévisions météorologiques, peuvent indiquer aux décideurs comment les aléas pourraient évoluer au fil du temps. Ces indications peuvent à leur tour étayer les stratégies de réduction et de gestion des pertes et dommages subis par les systèmes menacés. Le risque est caractérisé à l'aide d'un profil multidimensionnel avant que son acceptabilité ne soit évaluée (voir ci-dessous). La caractérisation des risques peut évoluer au fil du temps au fur et à mesure que la compréhension des aléas s'améliore. Aussi importe-t-il au plus haut point que les méthodes de prise de décision en situation d'incertitude donnent de bons résultats dans les différents avenir climatiques, comme indiqué au chapitre 4.

Les prévisions des aléas météorologiques et climatiques ont longtemps eu pour ambition de constituer un continuum couvrant les différentes échelles temporelles pertinentes (Shukla et al., 2010^[75]). Hoskins (2012^[76]) avance qu'elles peuvent en principe avoir un pouvoir prédictif à toutes les échelles temporelles. Il fait en effet valoir que tel peut être le cas malgré le caractère chaotique de l'atmosphère et le transfert de l'incertitude de l'échelle la plus réduite à l'échelle planétaire. Les prévisions des aléas à court terme (sur une semaine, par exemple) s'appuient sur des systèmes de surveillance bien développés. Ceux-ci ont été largement examinés ci-dessus et il n'est en l'occurrence pas nécessaire de leur consacrer de plus amples développements.

Les modèles sur des échelles temporelles légèrement plus éloignées (sur un mois, par exemple) ne permettent pas une bonne prévision des aléas du fait qu'ils ne représentent pas correctement les tropiques (tant du point de vue de la convection que des profils de variabilité du climat). Ces modèles n'en sont pas moins essentiels pour beaucoup de pays en développement et de PEID. À une échelle saisonnière, la puissante oscillation australe El Niño (ENSO) confère un pouvoir de prédiction aux modèles sur des échelles temporelles pouvant atteindre un an. Il peut en être ainsi en raison de la lente évolution du phénomène El Niño à l'échelle d'un mois, ainsi que de la bonne compréhension de son influence sur la météorologie des différentes régions du monde – bien qu'elle ne soit pas déterministe (Hoskins, 2012^[76]). L'inertie des températures de surface des mers et la persistance de certains modes de variabilité sur plusieurs années pourraient permettre d'établir des prévisions sur une période pouvant atteindre jusqu'à une décennie. Il est également possible que le pouvoir de prédiction s'étende sur une durée supérieure à la décennie. Parmi les principaux facteurs figurent les conditions extérieures telles que les variations des flux d'énergie solaire atteignant la Terre ; les aérosols volcaniques et les projections des émissions anthropiques de GES et d'aérosols ; ainsi que la persistance des modes oscillatoires dans les océans Atlantique et Pacifique (Hoskins, 2012^[76]).

Le grand défi du Programme mondial de recherche sur le climat vise à améliorer les prévisions climatiques multiannuelles à décennales et à accroître leur utilité pour les activités de planification à court terme des décideurs (dans les domaines de l'urbanisme et de l'agriculture, par exemple). Les chercheurs doivent prendre en considération plusieurs déterminants sous-jacents issus aussi bien des projections climatiques que des prévisions climatiques. Les projections climatiques établissent un climat mondial moyen sur la base du forçage anthropique en prenant pour point de départ les époques passées, alors que les prévisions climatiques sont produites en partant du système climatique actuel. Leur association permet d'élaborer des prédictions climatiques multiannuelles à décennales et des informations spécifiques pour chaque région (voir Graphique 6.2) (GIEC, 2013^[77]). Les Centres mondiaux de production de prévisions climatiques annuelles à décennales de l'OMM s'appuient désormais sur l'expertise scientifique et les modélisations informatiques des centres climatologiques les plus avancés au monde pour produire des informations utiles aux décideurs. Comme indiqué au chapitre 2, les différentes sources d'incertitude ne contribueront vraisemblablement pas de la même manière aux divers aléas liés au climat.

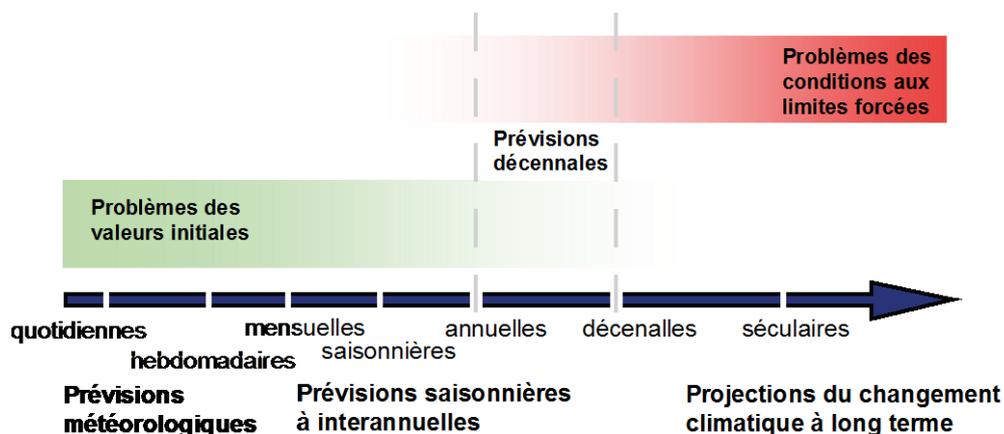
Une partie de la caractérisation des connaissances consiste à comprendre l'ambiguïté qui découle des divergences de vues sur un risque donné. Dans le cas du changement climatique, l'ambiguïté (et la controverse) résultant des différences de points de vue sur le plan économique et éthique est bien connue. La plus récente déclaration du GIEC est extrêmement importante dans ce contexte. D'après le GIEC, « (i) est incontestable que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les terres. Des

changements rapides et généralisés se sont produits dans l'atmosphère, les océans, la biosphère et la cryosphère » (GIEC, 2021^[78]). L'ambiguïté découle également de l'incertitude des projections des phénomènes extrêmes par les modèles climatiques, dont il a été amplement question au chapitre 2. Les approches permettant d'agir face à ces incertitudes sont examinées au chapitre 4 ; celles couronnées de succès doivent être dynamiques, adaptatives et itératives.

La surveillance des efforts de réduction des aléas liés au climat, tels que les émissions de GES, contribue à un bien public mondial. La surveillance réduit l'ampleur des aléas liés au climat auxquels chacun doit faire face, qu'il s'agisse d'un pays, d'une entreprise, d'une population locale ou d'un individu. Par ailleurs, elle quantifie plus efficacement les émissions de GES. Cela permettra aux chercheurs de mieux comprendre comment les émissions contribuent aux changements observés dans les principaux écosystèmes, mais aussi de déterminer où pourraient se situer les futurs points de basculement (Lenton et al., 2019^[79]). Les incitations sont donc différentes pour chaque type de mesure.

Les technologies susceptibles de favoriser une mesure, une notification et une vérification efficaces des efforts de réduction des émissions de GES auront tendance à encourager une plus grande coopération. Un exemple en est l'observation de la Terre pour détecter et surveiller les émissions de GES et les puits de carbone terrestres et océaniques correspondants à l'échelle mondiale. Le satellite d'observation des gaz à effet de serre lancé par le Japon détecte ainsi les rayons infrarouges réfléchis et émis par la surface de la Terre et par l'atmosphère. Il assure une couverture mondiale en trois jours, et complète ainsi les réseaux effectuant des mesures terrestres et aériennes (Stokke et Young, 2017^[80] ; Faiyetole, 2018^[81]). Le Groupe des observations de la Terre (*Group on Earth Observations*) est un partenariat intergouvernemental qui s'attache à accroître la disponibilité, l'accès, et l'utilisation des systèmes mondiaux d'observation pour soutenir la mise en œuvre de l'Accord de Paris, notamment sous l'angle des notifications nationales (GEO, 2018^[82]).

Graphique 6.2. Prévision du climat : interactions entre variabilité naturelle et changement climatique



Note : Les prévisions décennales doivent aussi bien prendre en considération les conditions initiales du système climatique que l'évolution du forçage à long terme.

Source : (GIEC, 2013^[77]).

L'évaluation des risques aux fins de réduction et de gestion des pertes et dommages doit prendre en considération aussi bien les changements à évolution lente que les phénomènes extrêmes. Une connaissance plus approfondie des phénomènes extrêmes du passé et des facteurs ayant influé sur eux

pourrait permettre de comprendre les phénomènes extrêmes à venir et de se préparer à y faire face, et aider à quantifier les pertes et dommages (Clarke, Otto et Jones, 2021^[83]). Par ailleurs, l'évaluation des risques doit également prendre en considération la possibilité que des points de basculement irréversibles ayant d'importants impacts non linéaires en cascade soient brusquement atteints. Après qu'un point de basculement irréversible d'ampleur mondiale a été dépassé, le système ne peut pas revenir à son état initial, quelles que soient les stratégies de réduction et d'inversion mises en œuvre (Lenton et al., 2019^[79]). De nombreux systèmes sont proches de leurs points de basculement ou vont les atteindre. Au nombre des exemples figurent la fonte de l'inlandsis de l'Antarctique occidental, l'arrêt de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (voir chapitre 3), la disparition des glaciers alpins ou le dépérissement des récifs coralliens. Pour comprendre à quel point les différents systèmes sont près d'atteindre le seuil crucial, il faudra mieux appréhender les processus qui régissent les risques auxquels chacun de ces systèmes doit faire face (Swingedouw et al., 2020^[84]).

Technologies facilitant la compréhension, la mesure et la surveillance des éléments de basculement

La gestion des risques doit tenir compte du possible dépassement des seuils qui déclencheront des points de basculement climatique (GIEC, 2021^[78]). Les impacts (mondiaux ou régionaux) de ces points de basculement peuvent réduire sensiblement l'efficacité des mesures de réduction destinées à faire face à l'exposition et à la vulnérabilité aux aléas liés au climat prévus en l'absence de ces points de basculement. Outre les techniques de modélisation et d'assimilation des données (section 6.2.1), les technologies permettant de mieux surveiller et modéliser le système climatique joueront un rôle essentiel. Elles doivent établir comment les aléas liés au climat peuvent évoluer dans le temps et dans l'espace et quand le système s'approchera d'un état climatique moins habitable. Pour comprendre et surveiller ces éléments de basculement, et peut-être même lancer des alertes précoces à leur sujet, il est essentiel de disposer de données scientifiques de grande qualité selon une fréquence appropriée. Celles-ci incluent des données d'observation sur les brusques changements climatiques survenus dans le passé géologique en vue d'améliorer la capacité des modèles à rendre compte des couplages et des rétroactions au sein du système Terre (Lenton et al., 2019^[79]). Le décryptage des caractéristiques statistiques de variables couvrant des centaines d'années de variations peut contribuer à fournir davantage d'indications sur la probabilité d'atteindre le niveau de seuil dans divers systèmes (Swingedouw et al., 2020^[84]). Il est toutefois compliqué de détecter les signaux d'alerte précoce et la capacité de prédiction de certaines de ces transitions critiques peut être limitée (Ditlevsen et Johnsen, 2010^[85] ; Lenton, 2011^[86] ; Swingedouw et al., 2020^[84] ; Bury, Bauch et Anand, 2020^[87] ; Rosier et al., 2021^[88]). La prédiction des points de basculement demeure en effet difficile, du fait principalement qu'elle exige d'évaluer l'interaction entre la variabilité naturelle et le forçage anthropique (Swingedouw et al., 2020^[84]).

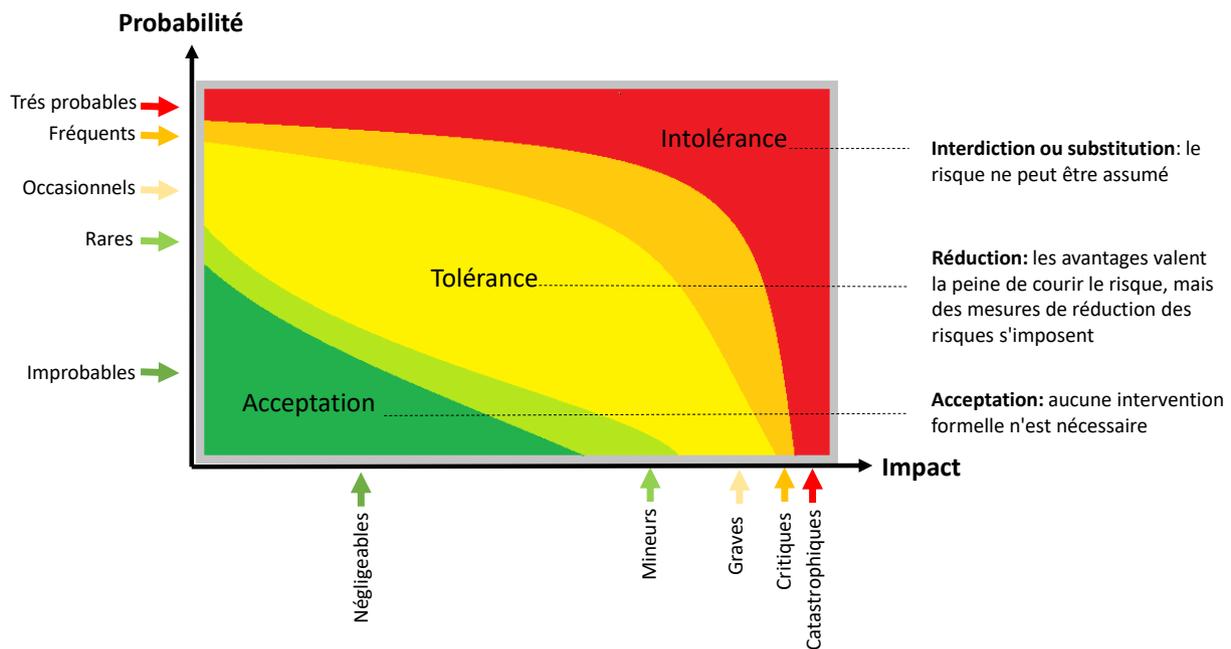
La combinaison des observations par télédétection issues de diverses sources et des séries chronologiques plus longues d'observations de la Terre portant sur des variables clés a contribué à la connaissance de différents éléments de basculement au sein de la biosphère, des océans et de la cryosphère (Swingedouw et al., 2020^[84]). Les observations par télédétection sont essentielles pour distinguer les variations induites par un forçage anthropique et la variabilité naturelle, afin d'améliorer la modélisation des systèmes. À titre d'exemple, les outils de télédétection des réseaux de surveillance des océans, tels que le réseau Argo, utilisent des flotteurs profileurs autonomes pour mesurer la salinité des océans, ainsi que la température et la force de la gravité dans les couches supérieures de l'océan afin de déterminer le degré actuel de stabilité des océans. Plus de 3 000 flotteurs profileurs dérivants opèrent dans les 2 000 mètres supérieurs de l'océan (NOAA, sans date^[89]). Pour expliquer comment la composition des espèces et des communautés marines s'adapte aux changements de grande ampleur de la biodiversité ou des écosystèmes, il faudra recourir à des méthodes permettant d'obtenir des prévisions quantifiables des profils spatiaux et temporels au moyen de théories écologiques afin d'étudier les impacts à long terme (Beaugrand et al., 2019^[90]).

Les techniques permettant de mieux comprendre dans quelle mesure les différents systèmes sont proches de leurs points de basculement en sont encore à leurs balbutiements. Il est difficile de prévoir quel état du système déclencherait le franchissement des points de basculement. Souvent, les paramètres déterminants ne connaissent que des modifications à la marge avant que l'état du système ne subisse une transformation soudaine ou persistante. Les indicateurs d'alerte précoce (IAP) constituent une méthode aidant à détecter une perte de résilience rapide du système (Gsell et al., 2016^[91]). Les IAP sont des indicateurs statistiques capables de quantifier la perte de résilience temporelle ou spatiale des systèmes en vue de détecter un « changement de régime ». Ils peuvent ainsi signaler que les seuils cruciaux sont près d'être atteints. Une autre méthode s'appuie sur la visionique pour détecter automatiquement les bords, qui permettent de révéler les changements d'état soudains du climat et les phénomènes climatiques extrêmes dans les séries de données climatiques (Bathiany, Hidding et Scheffer, 2020^[92]). Cette approche permet de quantifier le degré de soudaineté, d'obtenir des indications sur les causes des changements et d'évaluer certaines incertitudes liées aux phénomènes climatiques. De meilleures technologies de surveillance sont nécessaires pour améliorer l'observation de haut niveau des perturbations des profils spatiaux liées aux transitions fragiles au sein des systèmes. Un programme scientifique international axé sur la surveillance, la modélisation et l'élaboration d'IAP potentiels pour une série d'éléments de basculement offrirait d'importants avantages publics mondiaux. Des progrès dans ce sens semblent être en cours. Début 2021, par exemple, le Bureau du Climat de l'ESA a organisé un forum sur la télédétection des points de basculement dans le système climatique ; ce forum a été accueilli par l'Institut international des sciences de l'espace (*International Space Science Institute*) (ESA, sans date^[93]). En outre, le projet AIMES du programme Future Earth tient des séries de discussions réunissant des représentants de diverses communautés de spécialistes des sciences naturelles et sociales pour faire progresser les connaissances sur les éléments de basculement, l'irréversibilité, et les changements soudains au sein du système Terre (AIMES, sans date^[94]).

Évaluation des risques

L'évaluation des risques vise à déterminer si le risque considéré est acceptable pour les décideurs et les parties prenantes. Cela dépend souvent de la manière dont les parties prenantes comprennent les risques, et notamment de leurs valeurs et de leurs points de vue. Les risques peuvent être analysés à différents niveaux de granularité ou en tenant conjointement compte de la probabilité que le risque se produise et de son impact potentiel s'il venait à se matérialiser. La communauté internationale a décidé que les risques induits par le changement climatique ne sont pas acceptables et que des mesures d'atténuation et d'adaptation doivent être mises en œuvre pour ramener les risques à un niveau tolérable. L'objectif de température de l'Accord de Paris pourrait être considéré dans ce contexte. Il indique le degré de changement climatique au-delà duquel les risques sont si élevés qu'il convient de les éviter. Le Graphique 6.3 illustre les différents jugements quant à l'acceptabilité du risque : acceptable, tolérable et intolérable. Ce graphique montre les combinaisons de probabilité du risque et d'ampleur des conséquences qui pourraient amener un décideur à classer un risque donné comme *acceptable* (aucune intervention formelle n'est nécessaire) ; *tolérable* (les avantages associés méritent de courir le risque mais devraient s'accompagner de mesures appropriées de réduction des risques) ; ou *intolérable* (le changement doit être purement et simplement interdit ou faire l'objet d'une substitution si le risque ne peut être évité) (IRGC, 2017^[4]).

Graphique 6.3. Évaluation des risques



Source : D'après (IRGC, 2017^[4]).

À l'échelle mondiale, la nature du changement climatique fait que le comportement des pays gros émetteurs déterminera si les objectifs de l'Accord de Paris seront ou non atteints. Le degré de changement climatique lié à l'objectif de température de l'Accord de Paris a implicitement été considéré comme tolérable, sous réserve que des mesures de réduction des risques soient mises en œuvre (atténuation, décarbonation, renforcement de la capacité d'adaptation). Cependant, les pays vulnérables pourraient ne pas être (pour des raisons financières, technologiques ou de capacités) à même de mettre en œuvre les mesures requises. Des efforts seront par conséquent nécessaires pour réduire l'exposition aux aléas des personnes et des biens, mais aussi pour en diminuer la vulnérabilité en ayant recours aux approches examinées au chapitre 4.

Un processus d'évaluation similaire devra être appliqué aux risques individuels caractérisés par une ampleur spatiale plus réduite et une échelle temporelle plus courte. Certains risques auront, presque par définition, des conséquences extrêmement graves mais pourraient ne pas être évitables (voir encadré 1.1). Il pourrait notamment s'agir de phénomènes extrêmes tels que l'arrivée à terre d'un ouragan ou d'un cyclone d'importance majeure dans une zone très peuplée. Dans de tels cas, un système d'alerte précoce et un plan d'évacuation efficaces pourraient être privilégiés pour réduire au minimum l'exposition de la population à l'aléa. Cela peut certes réduire, voire supprimer, le nombre de victimes mortelles, mais pas de totalement éviter les pertes et dommages économiques et psychologiques. À mesure que le niveau des mers continue de monter, les PEID pourraient bien devoir faire face à des décisions difficiles quant à savoir si les risques de pertes et dommages induits par le changement climatique demeurent ou non tolérables (voir chapitre 4).

L'évaluation des risques implique la prise en compte d'un plus large éventail de valeurs, dont les valeurs sociétales, les intérêts économiques et les considérations politiques, qui peuvent influencer sur l'appréciation du risque. Les approches participatives de la création d'outils d'évaluation des risques locaux, par exemple, jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des risques. Elles établissent un utile échange d'informations qui permet aux décideurs de prendre conscience de la manière dont la société juge les risques et met en lumière le regard porté par les populations sur une augmentation des risques climatiques

qui pèsent sur les moyens d'existence et les systèmes (van Aalst, Cannon et Burton, 2008^[95]). La méthodologie pourrait s'appuyer sur divers outils, dont une cartographie des risques, des réunions de groupes de réflexion, des enquêtes et des échanges de vues, ainsi que des entretiens.

À titre d'exemple, des cartes numériques des risques locaux peuvent être aisément partagées, mises à jour et intégrées dans d'autres applications numériques. Cette approche facilite une coproduction de la connaissance et de l'évaluation des risques qui peut éclairer les mesures d'adaptation et de réduction des risques de catastrophe. Créé par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués, le portail Risk Geo-Wiki assure par exemple un échange mutuel d'informations sur le risque issues des savoirs locaux et des connaissances des experts (Geo-Wiki, sans date^[96]). Il intègre un processus de cartographie participative dans le cadre duquel les membres de la population locale fournissent, par exemple, des cartes préexistantes ou dessinées à la main indiquant où se trouvent les infrastructures critiques, les abris d'urgence et les ressources communautaires. Ces informations sont ensuite numérisées et peuvent être complétées par les parties prenantes locales. Par ailleurs, les cartes numérisées peuvent être superposées sur les images satellites pour obtenir une meilleure visualisation et aider à la planification, à la conception et à la mise en œuvre des initiatives. Ce portail a été utilisé dans certaines localités du Népal, du Pérou et du Mexique (Mechler et al., 2018^[97]).

Les progrès des technologies géospatiales ont donné la possibilité de traduire les apports des connaissances qualitatives locales en modèles mathématiques permettant une évaluation quantitative des résultats potentiels, par exemple dans le cas des projets de restauration et de protection des localités affectées (Hemmerling et al., 2019^[98]). Ce processus permet de recenser les connaissances localisées sous la forme de séries de données utilisables qui peuvent être ensuite combinées avec des séries de données existantes et servir à diverses fins dans le cadre du processus de planification. Cette quantification peut par exemple permettre d'identifier et de réduire le risque que certains groupes sociaux ou culturels subissent des impacts disproportionnés, et d'élaborer par ailleurs des stratégies de planification fondée sur des données factuelles géographiquement ciblées. Elle permet aux responsables de l'action publique de prendre des décisions en connaissance de cause, qu'elles soient d'ordre budgétaire ou qu'elles visent à l'adoption de nouveaux plans d'adaptation et de résilience (Cornforth, Petty et Walker, 2021^[47]).

6.2.3. Technologies pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des stratégies de réduction et de gestion des risques de pertes et dommages

Cette composante du processus décide des approches les plus appropriées pour la gestion des risques climatiques en s'appuyant sur l'évaluation des risques, examinée à la section 6.2.2. La légitimité et l'efficacité de tout processus de gouvernance des risques dépendront de nombreux facteurs non techniques, dont le degré de confiance des parties prenantes à l'égard du processus. Les chapitres 4 et 5 ont examiné comment la réduction et la gestion des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique peuvent être assurées. La présente section porte essentiellement sur la manière dont les stratégies, les options et les approches de réduction et de gestion des risques sont tributaires de certaines technologies ou de certaines capacités technologiques (infrastructures ou compétences, par exemple). Elle décrit comment la compréhension des risques peut aider à opter pour une approche décisionnelle appropriée.

Définir les options en matière de gestion

L'élaboration de stratégies de réduction et de gestion des risques de pertes et dommages peut tirer profit d'un passage en revue des informations produites par les différentes composantes du processus de gouvernance des risques, telles que la caractérisation des risques ou leur évaluation. Dans le contexte du changement climatique, les décisions seront souvent prises en situation d'incertitude. Dans de telles circonstances, il importera de mettre en œuvre des processus itératifs pour la gestion des risques. Ces

processus devraient s'appuyer sur une surveillance, une évaluation et un apprentissage continu, et être complétés par des approches décisionnelles adaptatives (voir l'examen à la section 4.2). Le choix des options de gestion devrait prendre en considération la situation socioéconomique plus large.

Outils d'aide à la décision

Comme indiqué à la section 6.1, le terme « technologie » peut aussi bien désigner un élément matériel que, dans un sens plus large, une technique permettant de mener à bien une activité. Ici, les outils d'aide à la décision aident à évaluer les risques afin de déterminer quelles sont les priorités pour les approches décisionnelles. Pour traduire les informations tirées des évaluations des risques en objectifs ou en stratégies opérationnels, il est nécessaire de bien comprendre le contexte plus large, y compris les divers systèmes affectés. Cela aidera à limiter le transfert des risques d'une zone vers une autre. Les décideurs peuvent éprouver des difficultés à naviguer dans les données et les informations disponibles pour évaluer les risques et formuler les mesures à prendre. La coopération pour le développement peut utilement contribuer à aider les populations vulnérables à identifier les approches appropriées. Un exemple en est offert par le projet AGRICA, succinctement présenté à l'Encadré 6.5.

Encadré 6.5. Analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation

Le projet d'analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation en Afrique subsaharienne (AGRICA) est mis en œuvre par l'Institut de Potsdam pour la recherche sur les impacts climatiques (*Potsdam Institute for Climate Impact Research*) en coopération avec l'Agence allemande pour le développement pour le compte du ministère fédéral allemand de la Coopération et du Développement économiques. L'Afrique subsaharienne a un accès limité à des informations fiables sur les risques et les impacts climatiques pour éclairer la prise de décision et les stratégies d'adaptation. Le projet AGRICA est axé sur le secteur agricole et aide les pays d'Afrique subsaharienne à identifier des stratégies d'adaptation au moyen de scénarios d'adaptation chiffrés.

Le projet AGRICA modélise toute la chaîne des impacts agricoles, ainsi que les stratégies d'adaptation susceptibles de soutenir les efforts du secteur pour faire face au changement climatique. L'étude des risques climatiques individuels prend la forme d'une évaluation des impacts. Celle-ci donne lieu à un examen des interactions entre le changement climatique, l'évolution des disponibilités en eau, et les impacts climatiques sur le secteur agricole qui s'ensuivent. L'évaluation des impacts permet ensuite de déterminer à l'aide d'analyses biophysiques, d'analyses coûts-avantages et d'analyses socioéconomiques quelles sont les stratégies d'adaptation appropriées.

Le projet vise à apporter un soutien aux autorités et aux acteurs du développement dans les pays faisant l'objet d'une étude de cas. Les résultats des analyses des risques climatiques peuvent à leur tour alimenter les processus d'élaboration de plans nationaux et infranationaux, tels que les Contributions déterminées au niveau national et les Plans d'adaptation nationaux. Ces résultats peuvent en outre orienter la coopération pour le développement, non seulement grâce à l'identification des priorités nationales, mais aussi en limitant l'exposition aux risques climatiques.

Source : (PIK, sans date^[99]) examiné in (OCDE, 2021^[23]).

Les outils d'aide à la décision, tels que l'analyse coûts-avantages, l'analyse coûts-efficacité et l'analyse multicritères, peuvent être utilisés pour faire un tri entre les différentes options (voir Encadré 6.6). Ces outils aident à déterminer quelles sont, compte tenu des hypothèses retenues, les approches équitables et efficaces par rapport aux coûts permettant de réduire et gérer les pertes et dommages. Les progrès des techniques et des algorithmes ont amélioré la capacité des logiciels à intégrer et analyser les données

provenant de diverses sources, et créé de nouvelles fonctions spatiales et temporelles. Celles-ci accroissent les capacités de visualisation et de comparaison des différentes options. Ces capacités permettent d'évaluer les performances des différentes options en tenant compte des diverses incertitudes et d'une multiplicité de scénarios d'aléas futurs. Il est ainsi possible de mesurer l'efficacité des options de réduction des risques et de procéder à une analyse transparente et cohérente pour aider à la prise de décisions (Newman et al., 2017_[100]). Un autre exemple d'outil décisionnel permettant d'aider à évaluer les problèmes complexes impliquant une multiplicité d'acteurs prend la forme de simulations, par exemple au moyen des outils de simulation sociale appelés « jeux sérieux ». Ceux-ci combinent les modèles computationnels et la participation d'acteurs réels pour éclairer les différentes options lorsque la prise de décision exige la gestion d'interactions sociales complexes (Mechler et al., 2018_[97]).

Encadré 6.6. Outils d'évaluation des options

L'**analyse coûts-avantages (ACA)** est centrée sur l'efficacité économique d'une stratégie ou d'une option donnée. Elle compare les coûts liés à l'option considérée aux avantages qu'elle présente, afin d'en calculer la valeur actuelle nette. Au final, l'ACA s'attache à maximiser le bien-être social compte tenu des impacts du changement climatique qui ont été identifiés. L'ACA ne prend toutefois pas en considération certains aspects importants des risques, tels que le degré d'incertitude et d'ambiguïté, les questions de répartition et d'équité, ou les jugements de valeur des parties prenantes à l'égard des projets (voir l'examen des limites de l'ACA à la section 5.3.1). Compte tenu de la temporalité à long terme de certaines des mesures prises par les pouvoirs publics, l'ACA s'applique pour l'essentiel aux options rudimentaires et à court terme liées à des risques simples.

L'**analyse coût-efficacité (ACE)** compare l'attractivité des différentes approches ou options en les évaluant et en les hiérarchisant en fonction de leur capacité à atteindre un objectif préétabli. L'ACE évalue les coûts en termes monétaires, alors que les avantages peuvent être mesurés sous une forme non monétaire. Elle est surtout utile pour évaluer les options à court terme de nature simple, non technique ou « immatérielles », telles que le renforcement des capacités. L'ACE exige des travaux approfondis pour garantir que les politiques sont mises en œuvre simultanément pour prendre en compte les éléments que les autres évaluations pourraient avoir négligé. Elle peut donc être appliquée pour remédier aux problèmes d'ambiguïté.

L'**analyse multicritères (AMC)** attribue aux différentes options une note ou un classement relatifs en fonction des critères d'évaluation. L'AMC pondère les divers éléments selon leur importance relative. Elle peut ainsi être utilisée dans le cadre d'analyses transversales pour l'évaluation de stratégies couvrant un large éventail d'objectifs difficiles à quantifier, tels que l'acceptabilité, l'équité, l'urgence ou les coavantages. Cette approche s'appuie sur la planification de scénarios portant sur des phénomènes considérés individuellement, et elle peut également inclure des critères sur la manière dont les différentes options se comportent en situation d'incertitude. Elle pourrait par ailleurs être particulièrement appropriée pour encourager la participation des parties prenantes à la prise de décision, de manière à tenir aussi bien compte de leurs préférences que de l'avis des experts.

Source : (Econadapt, sans date_[101]).

Réduire les aléas liés au climat grâce à l'atténuation

Les réductions rapides et marquées des émissions de GES, y compris celles résultant du changement d'affectation des terres, sont les mesures les plus efficaces pour limiter la fréquence et l'intensité des aléas liés au climat (GIEC, 2021_[78]). La capacité à atteindre des objectifs d'atténuation stricts tels que ceux impliqués par l'Accord de Paris est pour l'essentiel tributaire de la technologie. Les technologies solaire,

éolienne et hydroélectrique ont en effet assuré des réductions rapides. Ces résultats, et un déploiement et une production plus larges des énergies renouvelables constituent l'une des raisons d'espérer que des réductions rapides et de grande ampleur des émissions pourront être mises en œuvre. Cependant, même dans ce cas de figure, les efforts doivent être accélérés (AIE, 2021^[102]). Qui plus est, des réductions des émissions sont nécessaires partout au sein de l'économie, même dans les secteurs où les réductions sont difficiles à réaliser, tels que ceux de la production alimentaire ou du transport de marchandises. S'il n'en est pas ainsi, les émissions nettes de CO₂ devront devenir négatives pour compenser les éventuelles émissions résiduelles de ces secteurs.

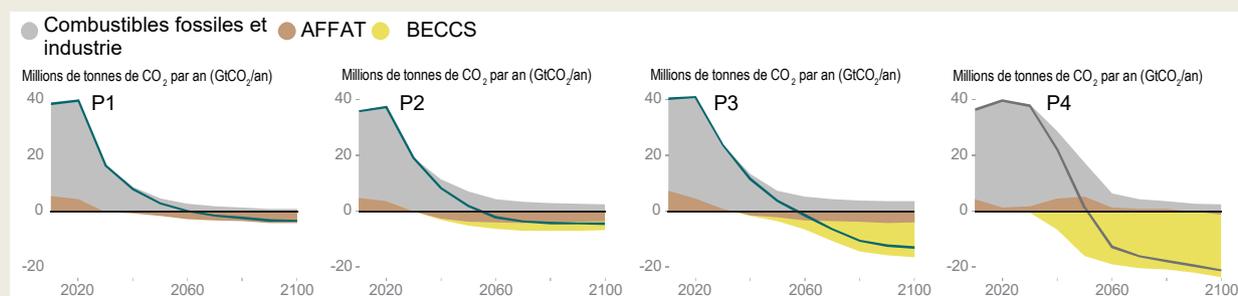
Il peut dès lors être indispensable d'avoir recours aux technologies d'élimination du dioxyde de carbone (EDC). La plus prometteuse de ces technologies réside dans la combustion de biomasse associée au captage et à la séquestration géologique à long terme des émissions de CO₂ qui en résultent grâce aux technologies de captage et de stockage du carbone (CSC). Les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère pourraient être réduites au fil de la répétition des cycles de croissance, de récolte et de combustion de la biomasse. Le déploiement des technologies de CSC à l'échelle qui serait nécessaire dans de tels scénarios serait à lui seul une tâche extrêmement difficile. L'Encadré 6.7 décrit les émissions mondiales nettes de CO₂ pour quatre trajectoires. Il montre que les technologies de CSC peuvent susciter des inquiétudes quant à la réduction des émissions nettes, même dans le cas où il serait possible de les mettre en œuvre à grande échelle.

Encadré 6.7. Implications technologiques des trajectoires des émissions mondiales

Les scénarios où la demande future d'énergie est la plus élevée prévoient les plus faibles niveaux de réduction des émissions de CO₂ à l'horizon 2030, comme l'illustre le scénario « P4 » du Graphique 6.4 et du GIEC (2018_[103]). Pour limiter la hausse des températures à 1.5 °C, ces scénarios nécessiteraient d'assurer au cours du siècle des émissions négatives cumulées représentant environ 1 200 gigatonnes de CO₂ – soit l'équivalent d'environ 30 années d'émissions de CO₂ liées à l'énergie observées avant la crise du COVID (2019) (GIEC, 2018_[101]). Pour atteindre cet objectif, il faudrait avoir recours à des technologies d'élimination du dioxyde de carbone, telles que la bioénergie associée au captage et stockage du carbone (BECCS), ainsi qu'à la protection et – si possible – au renforcement des puits naturels de carbone. La BECCS est considérée comme l'approche la plus plausible, tant du point de vue technologique que sous l'angle de la modélisation. D'après le scénario P4, il faudrait consacrer quelque 7.2 millions de kilomètres carrés de terres aux cultures bioénergétiques d'ici 2050. Cela représente plus de 30 fois la superficie nécessaire dans le scénario où la demande est la plus faible (scénario « P1 » sur la partie gauche du Graphique 6.4) (GIEC, 2018_[103]), et l'équivalent de près de 15 % de l'ensemble des surfaces agricoles mondiales².

L'acceptabilité du déploiement à grande échelle de la BECCS soulève, tout comme sa faisabilité technique, de gros doutes sur la crédibilité d'une EDC de grande ampleur. Cela suscite encore davantage de doutes sur le point de savoir si les scénarios qui prévoient comme le « P4 » une forte demande représentent des trajectoires potentielles crédibles pour se conformer à l'objectif de température de l'Accord de Paris. À supposer que le déploiement de la technologie de CSC à une telle échelle soit réalisable, l'ampleur même de l'utilisation des sols à des fins de production de bioénergie dans le cadre de ces trajectoires soulève des questions majeures concernant la concurrence pour la terre et les répercussions potentielles de l'atténuation du changement climatique sur la sécurité alimentaire et sur la perte de biodiversité. La sécurité alimentaire et la protection de la biodiversité pourront être plus aisément assurées par des trajectoires caractérisées par une faible augmentation future de la demande d'énergie et de celle des autres ressources.

Graphique 6.4. Décomposition des contributions aux émissions mondiales nettes de CO₂ dans quatre trajectoires présentées pour illustrer le modèle



Note : La demande finale d'énergie augmente de gauche (P1) à droite (P4). Ces différentes stratégies d'atténuation peuvent toutes restreindre à 1.5 °C le réchauffement mondial, sans dépasser ce seuil ou en ne le dépassant que de manière limitée. Toutes les trajectoires ont recours à l'élimination du dioxyde de carbone, mais dans des proportions variables selon la contribution relative de la bioénergie associée au captage et stockage du carbone et des mesures d'élimination dans l'agriculture, la foresterie et les autres affectations des terres. P1 est un scénario caractérisé par une faible demande d'énergie (Grubler et al., 2018_[104]) et il est conforme aux études qui mettent particulièrement l'accent sur les mesures visant à agir sur la demande ; P2 est un scénario axé sur la durabilité (sur la base de la trajectoire socioéconomique partagée SSP1) élaboré dans le cadre du modèle AIM (Fujimori et al., 2017_[105]) ; P3 est un scénario intermédiaire (fondé sur la trajectoire socioéconomique partagée SSP2) établi dans le cadre du modèle MESSAGE-GLOBIOM (Fricko et al., 2017_[106]) ; et P4 est un scénario à forte intensité d'énergies fossiles et forte demande d'énergie (reposant sur la trajectoire socioéconomique partagée SSP5) créé dans le cadre du modèle REMIND-MAgPIE (Kriegler et al., 2017_[107]). Une description narrative des différents scénarios SSP pourra être trouvée in O'Neill et al. (2017_[108]).
Source : Rapport spécial du GIEC « Réchauffement planétaire de 1.5 °C » (GIEC, 2018_[103]).

Les réductions marquées des émissions nécessiteront une innovation, un progrès et un déploiement technologiques de plus grande ampleur (par exemple dans le domaine du stockage d'énergie à grande échelle et du CSC). Elles exigeront également des modifications des systèmes intégrant ces technologies. Elles peuvent ainsi créer des liens dynamiques entre l'offre et la demande (grâce par exemple aux réseaux intelligents), mais aussi modifier radicalement la conception des systèmes pour réduire l'intensité en énergie et en matières premières des différentes économies (Buckle et al., 2020^[109]). Le GIEC (2021^[78]) fait observer que les trajectoires caractérisées par de faibles ou très faibles émissions de GES auraient des effets rapides et durables de limitation du changement climatique d'origine anthropique, contrairement aux scénarios prévoyant des émissions de GES élevées ou très élevées. Ces trajectoires auraient également les plus fortes probabilités de parvenir à ce résultat sans entraîner de plus amples dégradations du bien-être humain ou des écosystèmes naturels.

Réduction de l'exposition et de la vulnérabilité aux aléas liés au climat

L'exposition et la vulnérabilité sont des caractéristiques complexes et multidimensionnelles des systèmes socioéconomiques. À titre d'exemple, il est possible que certains types d'expositions ne puissent être modifiées que par des interventions à longue échéance (comme dans le domaine des infrastructures ou des terres agricoles). D'autres types d'exposition pourraient être plus flexibles, même en l'espace de quelques heures ou de quelques jours, comme l'exposition des populations humaines aux phénomènes extrêmes. Les technologies et les systèmes sur lesquels s'appuient les systèmes d'alerte précoce et de réaction rapide peuvent réduire l'exposition des individus aux aléas tels que les tempêtes, les inondations et les vagues de chaleur au moyen de leur relocalisation physique. La présente section étudie comment la technologie soutient un petit nombre de stratégies de réduction de l'exposition et de la vulnérabilité des populations et des moyens d'existence aux risques climatiques : SAP, résilience sectorielle et récupération post-catastrophe. Un examen approfondi de la contribution de la technologie au renforcement de la résilience, en particulier pour ce qui est du transfert de technologies et des évaluations des besoins technologiques, est fourni par l'OCDE (2021^[23]).

Systèmes d'alerte précoce (SAP)

La réduction et la gestion des risques de pertes et dommages induits par le changement climatique exigent des approches assurant la protection et la préparation des populations. Une préparation efficace constitue une approche intégrée et à longue échéance de la gouvernance des risques. Dans le cadre de l'élaboration des stratégies d'adaptation, il sera donc nécessaire de bien comprendre les dimensions spatiale et temporelle de l'exposition et de la vulnérabilité pour décider comment faire face aux aléas météorologiques et climatiques. Les risques météorologiques et climatiques croissants rendent la surveillance impérative. Cela nécessitera des outils de gestion, d'analyse et de visualisation des données géospatiales du genre de ceux décrits à la section 6.2.1. Il faudra notamment des capacités en temps réel pour surveiller l'exposition des populations aux aléas et faciliter les communications entre les autorités mobilisées pour y faire face et les personnes affectées.

Les SAP sont des systèmes intégrés de surveillance des aléas. Les SAP fournissent des alertes et signalent les risques au public, aux autorités et aux entreprises afin de leur permettre d'agir en temps opportun. Les progrès de l'observation météorologique, hydrologique et climatologique, ainsi que le renforcement des capacités de modélisation et de prévision, jouent un rôle important dans la surveillance des aléas, et plus particulièrement des phénomènes extrêmes (fortes pluies, tempêtes, cyclones, vagues de chaleur, etc.). Les satellites d'observation de la Terre assurent une transmission rapide et précise des données d'alerte précoce grâce aux méthodes de dissémination et aux outils cartographiques des systèmes d'information géographique (CNUCED, 2021^[16]). Les avancées technologiques dans le domaine de l'observation et de la surveillance de la Terre (atmosphère, sols et océans, et éléments tels que la température, les précipitations, la pression et le vent) ont permis la détection en temps réel des phénomènes météorologiques dangereux (tempêtes, inondations et sécheresses, par exemple) (Guo,

Zhang et Zhu, 2015^[110]). Par exemple, le projet relatif aux produits d'information basés sur des observations de la Terre pour la réduction des risques de sécheresse au niveau national du Centre de télédétection des surfaces terrestres, sis en Allemagne, fournit des informations sur les risques aux systèmes d'alerte précoce concernant les aléas de sécheresse en Afrique du Sud et en Ukraine (ZFL, 2021^[111]). Les méthodes fondées sur l'observation de la Terre surveillent l'humidité des sols, les précipitations et la végétation pour évaluer les risques de sécheresse (ONU, 2021^[112]).

Les progrès technologiques ont également contribué à mieux optimiser les efforts de coordination des SAP et à en accroître la précision. Cependant, la prévision des aléas à long terme (par opposition aux prévisions météorologiques ou aux projections climatiques) nécessite de plus grandes capacités opérationnelles. La surveillance observationnelle des systèmes clés influant sur les aléas à ces échelles temporelles plus longues (par exemple, les plateformes de glace de l'Antarctique, la fonte du pergélisol et la circulation océanique) est également nécessaire, à distance comme *in situ*. Les SAP peuvent également être faisables pour certains points de basculement climatique (Lenton, 2011^[86]) ; voir Swingedouw (2020^[84]) pour un examen du recours à l'observation de la Terre pour fournir des alertes précoces pour ces points de basculement.

Les différents pays n'ont pas tous les mêmes capacités ni le même besoin de mettre efficacement en œuvre les SAP. Il convient de mentionner un certain nombre d'exemples tirés de différents contextes nationaux :

- En **Éthiopie**, la méthode de modélisation climatique semi-subjective a été remplacée par une approche objective reposant sur la climatologie. Il est ainsi possible d'assurer une meilleure prévision saisonnière afin d'aider le pays à accomplir des progrès en matière d'atténuation et d'anticipation des pertes induites par les phénomènes climatiques extrêmes (OMM, 2020^[113]).
- En **Mongolie**, les conditions climatiques extrêmes ont amené de nombreux ménages d'éleveurs à perdre leurs troupeaux. Un partenariat conjoint entre le gouvernement et la Mission d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire (CFSAM) de la FAO et du PAM a permis de superposer des indicateurs socioéconomiques aux données de surveillance et aux prévisions afin d'aider à cibler les familles vulnérables en vue de mettre en œuvre des mesures anticipatives (OMM, 2020^[113]).
- Au **Népal**, l'alerte précoce lancée auprès de la population n'a pas été bien reçue en raison de la qualité médiocre des liaisons radio et d'un manque de compréhension par la population du degré de gravité de l'inondation. Le fait de travailler en étroite collaboration avec les membres de la population locale pour élaborer conjointement le SAP a contribué à assurer que les messages sont adaptés et bien compris par la population (Shrestha et al., 2021^[114]).
- Au **Japon**, une plateforme centralisée prend en charge le SAP et diffuse des informations sur les consignes de sécurité, les plans d'évacuation et la récupération post-catastrophe. Cette approche diffuse les mêmes informations à toutes les parties prenantes, y compris les médias, la municipalité et les sociétés de service public (GFDRR, 2019^[115]).

Dans le contexte du SAP, il est essentiel de nouer un dialogue avec les parties prenantes locales, et en particulier avec les segments marginalisés ou vulnérables de la population. Il peut être difficile de toucher les personnes marginalisées et vulnérables du fait de leur localisation physique, des normes sociales ou des obstacles technologiques. Par exemple, dans certaines cultures, les femmes ne sont pas encouragées à participer aux formations de renforcement des compétences (Shrestha et al., 2021^[114]). Les plans de mise en œuvre des protocoles du SAP doivent faire appel à des méthodes créatives pour assurer une plus grande inclusion des parties prenantes. Dans certaines localités rurales n'ayant que peu d'infrastructures de communication, voire aucune, les informations proviennent des membres de la population locale. Au Sri Lanka, par exemple, beaucoup de localités sont situées dans des zones écartées. Pour y remédier, les capacités du SAP sont renforcées en assignant un rôle de premier plan aux membres de la population locale, chargés d'informer les groupes vulnérables sur les risques encourus (Baudoin et al., 2016^[74]).

Rôle de la technologie dans le financement de la récupération post-catastrophe

La vulnérabilité résulte de divers facteurs. Ceux-ci incluent les niveaux de développement, les inégalités et la localisation géographique, ainsi que les caractéristiques individuelles (sexe, âge, état de santé, statut social, origine ethnique et classe sociale). Ces facteurs influent sur les niveaux d'accès aux éléments de patrimoine et aux revenus, l'endroit où les personnes vivent, ainsi que leur accès aux services essentiels, dont le logement et les soins de santé. Le chapitre 5 examine les mécanismes financiers, y compris les programmes de protection et d'assurance sociales. Ces programmes aident les individus, les ménages ou les entreprises à réduire les risques de pertes et dommages induits par les aléas climatiques, ainsi qu'à gérer leur exposition et leur vulnérabilité aux risques climatiques. Les innovations technologiques sont à la base de bon nombre de ces services financiers. L'Encadré 6.8 illustre les possibilités que les technologies de chaîne de blocs réduisent sensiblement le coût des envois internationaux de fonds aux membres de sa famille, dont le montant à l'échelle mondiale est bien supérieur à celui de l'aide publique au développement.

Encadré 6.8. Envois de fonds et technologie de chaîne de blocs

Les envois de fonds jouent un rôle important dans le développement, puisque leur volume était en 2018 plus de trois fois supérieur à celui de l'aide publique au développement. Ils procurent aux pays à faible revenu et à revenu intermédiaire une source de financement stable. Les frais de transfert sont cependant élevés, le coût mondial moyen d'un transfert à destination des pays à faible revenu et à revenu intermédiaire atteignant 6.9 % du montant de l'envoi de fonds (Rühmann et al., 2020^[116]). Le coût des envois de fonds entre pays du Sud s'élève en moyenne à 18.7 % en Afrique subsaharienne, taux trois fois supérieur à la moyenne mondiale (Rühmann et al., 2020^[116]).

La chaîne de blocs offre une approche innovante permettant d'envoyer et de recevoir des fonds plus rapidement et à moindres frais, mais aussi d'atteindre les zones mal desservies par les systèmes financiers officiels. La chaîne de blocs s'appuie sur une technologie de registres distribués fournissant un moyen d'inscrire des données sur une multiplicité de registres tenus et contrôlés par un réseau décentralisé (distribué) de serveurs informatiques (Rühmann et al., 2020^[116]). Cette technologie offre une approche permettant d'envoyer et de recevoir des fonds sous forme de monnaie numérique grâce à de nouvelles infrastructures de paiement court-circuitant les intermédiaires pour autoriser un transfert de personne à personne. La chaîne de blocs peut permettre des règlements transfrontières plus rapides et abordables que les systèmes traditionnels de transfert d'argent et aider à garantir que les paiements servent aux fins prévues. La technologie de chaîne de blocs peut être plus accessible pour les utilisateurs grâce à la technologie des téléphones intelligents (Banque mondiale, 2019^[117]). Dans les pays à faible revenu où de nombreux adultes n'ont pas accès aux services bancaires, les téléphones intelligents offrent une solution de rechange pour recevoir des paiements. En Amérique latine et dans les Caraïbes, par exemple, 90 % des adultes qui ne disposent pas de services bancaires possèdent un téléphone portable (Banque mondiale, 2019^[117]).

Rühmann *et al.* (2020^[116]) décrivent toutefois plusieurs inconvénients de cette technologie, dont les problèmes de confidentialité des données, les incertitudes réglementaires et la question de la remise des fonds en espèces au dernier kilomètre. Il n'est guère probable que l'utilisation de la chaîne de blocs apporte une solution au problème du dernier kilomètre, étant donné que la conversion de la monnaie numérique en espèces peut être difficile : même de grands établissements bancaires ne sont pas parvenus à l'assurer.

L'assurance peut fournir aux ménages subissant les effets négatifs du changement climatique un accès à des moyens de financement vitaux pour eux (voir l'examen au chapitre 5). Les nouvelles technologies et les innovations permettent de mieux cibler les produits d'assurance. Ces technologies fournissent de

nouvelles sources de données sur les aléas, l'exposition et la vulnérabilité (observation de la Terre, imagerie participative, etc.) et de nouveaux outils permettant de les analyser (intelligence artificielle ou apprentissage automatique, par exemple). Elles accroissent ce faisant la disponibilité de garanties abordables contre les aléas climatiques. Les nouvelles technologies et les nouveaux outils peuvent par exemple permettre de réduire les coûts de la sélection des risques, processus qui représente en règle générale pas moins de 20 à 25 % du montant brut des primes. Une société d'assurances a par exemple intégré une cotation des risques par l'intelligence artificielle dans son processus d'évaluation des risques de feux incontrôlés. Elle a constaté que certains facteurs secondaires qui réduisent les risques pour les ménages, tels que l'aménagement paysager et les bâtiments résistant au feu, ainsi que la distance par rapport à la végétation à haut risque, entraînaient une diminution du coût de l'assurance pour les personnes vivant dans des zones à haut risque d'incendie (Sams, 2020^[118]). Ces mêmes technologies peuvent également être utilisées pour le règlement des sinistres et contribuent à faire baisser les frais de liquidation des sinistres. La distribution d'assurances en ligne et des innovations telles que les contrats intelligents pourraient procurer de nouveaux gains d'efficacité (Goldby et al., 2019^[119]).

Ces innovations dans le financement de la récupération post-catastrophe pourraient jouer un rôle particulièrement important en contribuant à combler les lacunes de la couverture par la modélisation commerciale des catastrophes. Cela permettra à son tour aux sociétés d'assurance de faire en sorte que la couverture soit disponible dans les pays où les outils d'analyse des données et des risques sont plus limités. En Zambie, par exemple, un partenariat entre la Banque Nationale et une société d'assurances a abouti à la création d'une couverture des biens abordable pour les micro, petites et moyennes entreprises. Elle assure contre les tempêtes, les incendies et les inondations en s'appuyant sur une plateforme numérique pour la sélection des risques et la tarification (Inclusivity Solutions, 2020^[120]). Ces technologies et innovations peuvent également accroître la capacité des sociétés d'assurance à offrir des garanties innovantes, sous la forme, par exemple, d'une assurance paramétrique ou d'une assurance météorologique (Encadré 6.9).

Encadré 6.9. L'apprentissage automatique au service de l'assurance contre les risques météorologiques

Les petits exploitants agricoles sont vulnérables aux chocs climatiques. L'assurance fondée sur un indice météorologique est un produit de transfert du risque financier qui peut permettre de surmonter les problèmes rencontrés par les systèmes traditionnels d'assurance. Les systèmes traditionnels d'assurance des récoltes indemnisent généralement les agriculteurs des pertes vérifiables au terme de la période de végétation. À l'inverse, l'assurance fondée sur un indice météorologique s'appuie sur un indice composé des régimes pluviométriques, des températures, ainsi que d'autres indicateurs. Ceux-ci font office de variable de substitution des risques et traduisent les fluctuations météorologiques extrêmes en un indice de mauvaise récolte (Bettini, Gioli et Felli, 2020^[121]). Les indemnités accordées aux agriculteurs sont ainsi fonction des risques plutôt que des pertes individuelles. Étant donné que ni l'agriculteur ni l'assureur ne peuvent manipuler les mesures de la pluviométrie, l'approche fondée sur des indices météorologiques réduit les problèmes d'asymétrie de l'information. Les pertes ne sont plus liées aux indemnités, ce qui élimine le problème de l'aléa moral puisque les agriculteurs ne gagneront rien en cas de mauvaise récolte. Les visites à domicile pour que les assureurs vérifient les pertes de récolte sont par ailleurs évitées. Les primes sont ainsi maintenues à un niveau plus abordable (Bettini, Gioli et Felli, 2020^[121]).

La technologie a aidé à surmonter plusieurs problèmes non résolus liés à l'indice météorologique. L'indice météorologique exige un réseau dense de stations météorologiques, alors que celles-ci sont plutôt dispersées dans la plupart des régions du monde. Tel est en particulier le cas dans les pays en développement dont les petits exploitants agricoles seront les principaux bénéficiaires de l'assurance

fondée sur des indices météorologiques. Bien que les données satellitaires soient désormais davantage disponibles, mais les observations à l'échelon local peuvent s'avérer plus utiles pour l'assurance fondée sur un indice météorologique. Plusieurs pays ont adopté différentes stratégies pour surmonter cet état de fait :

- En **Tanzanie** et au **Mozambique**, l'apprentissage automatique a été utilisé pour élaborer un indice dynamique établissant une relation entre les relevés météorologiques locaux et les observations météorologiques des utilisateurs, les rapports des agriculteurs sur les pertes de rendement des cultures et les données relatives aux prix sur les marchés mondiaux. Il est ainsi possible de mettre au point des stratégies plus élaborées de gestion des risques et des pertes de récoltes (Biffis et Chavez, 2017^[122]).
- Au **Rwanda**, des stations météorologiques solaires collectent des données météorologiques toutes les 15 minutes. Ces données sont agrégées et comparées avec les données météorologiques historiques au terme de la période de végétation. Les indemnités sont alors calculées et envoyées, tout comme les informations météorologiques, à travers les téléphones portables. Cela réduit les coûts administratifs et ceux de livraison (UIT, 2016^[21]).
- Au **Kenya**, le fonds InsuResilience Solutions et le ministère kényan de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche se sont associés pour mettre en œuvre une stratégie d'assurance climato-intelligente à l'intention des petits exploitants agricoles. Celle-ci conjugue deux innovations technologiques dans le domaine de l'assurance contre les risques climatiques : l'indice d'humidité des sols et un outil de vérification des pertes au moyen de photographies qui réduit au minimum les coûts de vérification des pertes. Ce programme d'assurance était par ailleurs complété par des services de conseil souples et climato-intelligents destinés aux agriculteurs, ainsi que par une aide à la décision (InsuResilience, 2021^[123]).
- Le **Bangladesh**, le **Nigeria** et le **Sri Lanka** ont recours à des techniques de détection virtuelle au moyen de liaisons hertziennes commerciales pour collecter des mesures au sol. Les liaisons hertziennes commerciales sont des liaisons radio terrestres utilisées dans le cadre des réseaux de télécommunications mobiles. Lors des précipitations, l'intensité du signal peut être analysée et traduite en des mesures précises des précipitations. Cela convertit les réseaux mobiles en des réseaux virtuels de pluviomètres. (Raithatha et Tricarico, 2019^[124]).

Suivi et examen

Les approches adaptatives ou itératives de la gouvernance des risques requièrent des mécanismes qui facilitent une surveillance, une évaluation et un apprentissage continus lors des prises de décision en situation d'incertitude. Le suivi et l'examen sont nécessaires dans toutes les composantes de la gouvernance des risques. Le renforcement des capacités et des processus de gouvernance doit être assuré en permanence afin de systématiser la diffusion des connaissances auprès des organisations clés, des principales entités publiques et privées et des décideurs de premier plan. En outre, le transfert de connaissances compatibles avec les capacités des utilisateurs auxquels elles sont destinées aidera ces derniers à mieux comprendre les enjeux, ce qui renforcera à son tour leur confiance dans l'utilisation des informations sur les risques climatiques pour guider leurs actions (Weaver et al., 2017^[125] ; Butler et al., 2015^[126] ; Street et al., 2019^[127]).

Les inventaires des phénomènes et des impacts météorologiques extrêmes peuvent fournir des informations utiles et permettre d'étudier les phénomènes sans précédent. Ils identifient les phénomènes dangereux préjudiciables, ainsi que l'évolution dans le temps des vulnérabilités et des caractéristiques de l'exposition liées à ces phénomènes dangereux. Cela permet d'étudier les enseignements tirés des phénomènes passés susceptibles d'éclairer les processus de formulation des politiques destinées à faire face à des phénomènes similaires dans l'avenir ou de bénéficier à d'autres régions pouvant se retrouver

dans des situations similaires. Cependant, même les bases de données sur les risques les plus complètes et les plus systématiques ne sont pas conçues pour comprendre quels sont les facteurs (y compris l'exposition et la vulnérabilité) qui influent sur la gravité des catastrophes passées, ni pour quantifier les pertes et dommages liés à un phénomène imputable en tout ou partie au changement climatique anthropique (Clarke, Otto et Jones, 2021^[83]). Clarke *et al.* (2021^[83]) décrivent un cadre destiné à l'enregistrement des détails relatifs aux phénomènes à fort impact à une échelle nationale. La constitution d'une telle base de données exige de réunir de grandes quantités de données provenant de diverses sources, et de s'appuyer sur une analyse des données, sur des techniques d'apprentissage automatique, ainsi que sur les meilleures pratiques et les meilleures méthodologies.

6.2.4. Création d'un environnement propice à la diffusion des technologies

La gestion des risques climatiques est tributaire de la fonctionnalité des technologies (autrement dit des équipements et des compétences) et de leur capacité de diffusion. Bien souvent, une technologie pourrait être mise au point, disponible et efficace dans un contexte donné (pays, société, situation socioéconomique), mais produire des résultats différents lors de son application dans d'autres contextes (OCDE, 2021^[23]). L'échec des efforts de diffusion des technologies est en partie dû à une connaissance insuffisante des besoins locaux. Pour le dire simplement, l'accès à une technologie ne garantit pas que les acteurs locaux disposent de la capacité ou des compétences nécessaires à son absorption et à son utilisation. Dans certains cas, l'utilisateur auquel une nouvelle technologie est destinée pourrait ne pas comprendre pleinement comment elle peut être utile à la gestion des risques. Il est essentiel de bien comprendre le contexte sociétal et de disposer des ressources locales indispensables pour favoriser l'adoption et l'absorption de la technologie. Le Tableau 6.2 présente quelques-uns des critères qu'il convient de prendre en considération pour sélectionner les technologies spécifiques sur lesquelles s'appuieront les processus de gouvernance des risques. Il est suivi d'un examen des approches permettant de s'attaquer aux obstacles à la diffusion et à une mise en œuvre et une exploitation efficaces des technologies.

Tableau 6.2. Exemples de critères pour la diffusion des technologies

Critères	Exemples
Économiques et financiers	Accès au financement, coût du capital, opportunité financière, viabilité financière, incitations économiques
Marché	Infrastructures de marché, concurrence à armes égales, sources suffisantes de rendements croissants, demande du marché
Politiques, juridiques et réglementaires	Cadre juridique adapté, politiques commerciales, stabilité politique, accessibilité et partage des données, administration
Réseau	Connexion entre les acteurs et cadre de communication
Capacités institutionnelles et organisationnelles	Renforcement des institutions professionnelles, des capacités institutionnelles et de la confiance dans les organisations
Infrastructures physiques	Investissements dans les infrastructures sous-jacentes pour soutenir les capacités technologiques
Compétences humaines	Formation adéquate, mentorat, développement des compétences humaines, recherche multidisciplinaire
Sociaux, culturels et comportementaux	Préférences des consommateurs et normes sociales, traditions, dispersion de l'habitat, comportement social
Information et sensibilisation	Soutien des capacités de dissémination afin d'accroître la sensibilisation aux informations et les avantages de l'application des technologies, incorporation d'un cadre pour recevoir des commentaires
Techniques	Concurrence, normes et codes techniques, exploitation et maintenance, fiabilité du produit
Autres	Impacts environnementaux, facteurs géophysiques, extensibilité

Source : D'après (Boldt et al., 2012^[5]).

Accessibilité

Les pertes et dommages induits par le changement climatique continueront de s'aggraver. L'accès aux technologies peut aider les pays à réduire et gérer les risques avec plus d'efficacité. Sans un tel accès, les populations vulnérables pourraient avoir à mettre en œuvre des technologies ayant pour une large part un caractère imitatif (Homberg et McQuistan, 2018^[128]), ou devoir choisir d'autres moyens simples, non technologiques et plus abordables (Dechezleprêtre et al., 2020^[129]). À titre d'exemple, les données produites de manière participative pourraient avoir une plus grande efficacité-coût que les satellites et les télécapteurs lorsqu'il s'agit de collecter des données locales pour cartographier les inondations. Elles ne sont toutefois pas aussi fiables pour ce qui est de la collecte d'observations continues. S'il n'est pas remédié à cette fracture technologique, la compréhension de l'exposition et de la vulnérabilité aux risques au niveau local ne pourra être qu'incomplète. Même si dans un premier temps les technologies peuvent s'avérer coûteuses, leur efficacité-coût peut s'améliorer au fil du temps si elles bénéficient d'une dissémination suffisante (OCDE/AIE, 2003^[130]). Le Réseau de Santiago, établi lors de la COP 25 dans le cadre du Mécanisme international de Varsovie, vise à aider les pays en développement à faire face aux pertes et dommages grâce à une assistance technique (CCNUCC, sans date^[131]). Les pays développés devront fournir une aide financière pour faire en sorte que le réseau soit véritablement utile aux pays en développement.

L'accès aux données pourrait dans certains cas être restreint par les réglementations gouvernementales ou par les droits d'auteur commerciaux, ainsi que par la protection de la vie privée, ou encore par les exigences en matière de localisation des données (BAD/OCDE, 2020^[19]). Dès lors, les investissements publics dans les infrastructures de collecte de données telles que les SMHN (voir) ou dans des initiatives encourageant la collaboration entre entités publiques et privées pourraient contribuer à répondre aux besoins en données. Certains pays en développement pourraient avoir besoin d'une aide pour accéder aux capacités de traitement et d'analyse des données nécessaires pour améliorer la gestion des risques.

Fossé des inégalités

Les dépôts de brevet internationaux montrent que l'innovation dans le domaine de l'adaptation se trouve concentrée dans les économies à revenu élevé et en Chine (Dechezleprêtre et al., 2020^[129]). Cela donne à penser que la diffusion des innovations et des technologies est déterminée par la capacité des pays à absorber les technologies ou les innovations (Dechezleprêtre et al., 2020^[129]). Les capacités institutionnelles et financières de certains pays très vulnérables au changement climatique, dont les PMA et les PEID, sont souvent insuffisantes. Aussi ne disposent-ils que de possibilités limitées en matière de recherche et développement, de partage des connaissances et de nouvelles innovations pour faire face aux risques climatiques et à ceux de pertes et dommages (Izumi et al., 2019^[132]). Le renforcement des capacités et des infrastructures technologiques nécessaires pour appliquer et mettre au point des technologies dans les pays en développement pourrait être mis en œuvre à plus grande échelle de manière à assurer l'inclusion des populations vulnérables. La société serait ainsi dotée de l'ossature indispensable pour se préparer à l'apparition d'innovations technologiques permettant de faire face aux risques climatiques.

Fracture numérique

Des mesures telles que le renforcement des réseaux et des infrastructures de télécommunications peuvent contribuer à réduire la fracture numérique. Cela peut à son tour accroître les capacités des pays à appliquer les technologies. Le renforcement des infrastructures physiques favorisera l'application de certaines technologies et facilitera leur diffusion et leur adoption au fil du temps à travers divers canaux. Par exemple, le développement des infrastructures de sorte que les technologies de l'information et de la communication améliorent la couverture par le haut débit dans les pays en développement peut faciliter la collecte de données d'observation et les communications d'urgence, ainsi que le transfert des aides

financières à travers les appareils mobiles en cas de phénomène dangereux. En Amérique latine, le Brésil, le Chili et la Colombie ont mis en place des points d'accès au WI-FI à l'échelle nationale afin d'assurer l'inclusion numérique (OCDE et al., 2020_[133]).

L'instauration de mécanismes stratégiques et financiers destinés à soutenir des modèles économiques permettant une évolution du paysage technologique peut favoriser l'adaptation technologique future. Il pourrait notamment s'agir du lancement de programmes de formation pour les individus et les entreprises sur les outils numériques disponibles et d'une concentration des efforts sur le renforcement de leurs capacités techniques. Un soutien aux incubateurs et aux accélérateurs des technologies climatiques peut aider les entrepreneurs à établir des stratégies commerciales et des liens avec le marché, mais aussi leur fournir des sources de financement et des procédures pour y avoir accès (CCNUCC, 2020_[134]).

Transfert de technologies

Les dispositifs de gouvernance devraient faciliter un accès inclusif aux technologies et aux connaissances en vue de la réduction et de la gestion des pertes et dommages. Les partenariats internationaux, les politiques commerciales et les accords commerciaux spéciaux peuvent favoriser la dissémination transfrontière des technologies (Boldt et al., 2012_[5]). Par exemple, la coopération Sud-Sud³ et triangulaire⁴ peut jouer un rôle essentiel du point de vue de l'accélération de l'action climatique et du transfert des technologies et des connaissances sous-jacentes entre pays en développement. Les technologies issues des pays en développement peuvent être plus appropriées et plus efficaces par rapport aux coûts pour les autres pays en développement dans la mesure où elles tendent à être adaptées à des conditions locales similaires (CCNUCC, 2017_[135]). Une approche pourrait consister à établir un lien entre d'une part les technologies qui favorisent la gestion des risques climatiques et d'autre part les stratégies de développement durable et les Plans d'adaptation nationaux, afin de mettre le transfert de technologies en adéquation avec les objectifs plus larges de développement.

Une autre possibilité consiste à tirer parti de nouveaux marchés ou à exploiter les marchés existants sur lesquels les pays en développement peuvent mettre en œuvre et absorber les technologies naissantes (Homberg et McQuistan, 2018_[128]). Les transferts internationaux de technologies sont essentiels pour combler l'écart technologique entre les pays développés et ceux en développement, y compris en matière de changement climatique. Cette approche impose toutefois de faire preuve de prudence. Ces investissements accrus pourraient aboutir à des modèles commerciaux susceptibles de présenter des inconvénients pour les PEID et les PMA (Hewitt et al., 2020_[24]). Une coopération plus étroite au niveau international, régional et mondial peut permettre de bénéficier d'économies d'échelle pour ce qui est des investissements majeurs dans des domaines tels que les ordinateurs à hautes performances, les satellites et les capacités de modélisation et de prévision à la pointe du progrès dans les PMA. Une telle coopération ouvre des perspectives en matière d'apprentissage.

Coopération internationale

La coopération et la collaboration internationales peuvent aider les PMA et les PEID à renforcer leurs capacités – financières, techniques et organisationnelles – à produire des SIMC et à mettre au point et adapter des approches visant à la réduction et à la gestion des pertes. La coopération pour le développement peut par exemple aider les PMA et les PEID à travers des initiatives de renforcement des capacités axées sur la collecte de données d'observation, ou grâce au partage de données, de méthodes et d'outils. Les partenariats internationaux peuvent en outre aider les gouvernements à prendre en compte les considérations relatives au changement climatique – et celles liées à la réduction et à la gestion des risques de pertes et dommages – dans les politiques et les pratiques plus larges de nature sectorielle ou en rapport avec le développement. Les membres de la communauté internationale peuvent disposer d'une connaissance et d'une compréhension des risques et de la manière dont les technologies ont été utilisées pour y faire face, et ils peuvent partager ces informations avec les pays avec lesquels ils collaborent. Les

capacités nationales à mieux comprendre les risques et à les réduire et les gérer avec efficacité s'en trouveront réduites. Cela confèrera également une valeur ajoutée aux services climatiques, ce qui justifie de nouveaux investissements dans ces services dans différents secteurs.

Financement

La mise au point et la dissémination des technologies peuvent être favorisées par les possibilités de financement offertes par divers mécanismes technologiques. Au nombre de ceux-ci figurent le Centre et Réseau des technologies climatiques, le Comité exécutif de la technologie de la CCNUCC, la Coopération Sud-Sud et triangulaire ou le Réseau de Santiago pour les pertes et dommages (qui fait partie intégrante du Mécanisme international de Varsovie). Ces programmes apportent aux pays vulnérables et aux PMA une expertise et un soutien par divers moyens. Des exemples en sont les évaluations techniques liées aux besoins technologiques ; la mise au point et le transfert de technologies ; les dispositions en matière de financement, de formation, de gestion ; et l'identification des obstacles technologiques (UNOSSC, sans date^[136] ; CCNUCC, sans date^[131] ; CTCN, sans date^[137] ; CCNUCC, sans date^[138]). Il est essentiel de promouvoir la diffusion des technologies et l'innovation technologique dans de nombreux pays en développement afin d'assurer la réduction et la gestion des risques de pertes et dommages.

Références

- Ackerman, E. et M. Koziol (2019), « Tanzania Builds a Drone Industry From Local Know-How and Bamboo », page web, <https://spectrum.ieee.org/robotics/drones/tanzanias-homegrown-drone-industry-takes-off-on-bamboo-wings> (consulté le 30 April 2021). [68]
- AIE (2021), *Financing Clean Energy Transitions in Emerging and Developing Economies*, AIE, Paris. [102]
- AIMES (sans date), « Analysis, Integration, and Modeling of the Earth System », page web, <https://aimesproject.org/> (consulté le 18 Oct 2021). [94]
- Alley, R., K. Emanuel et F. Zhang (2019), « Advances in weather prediction », *Science*, vol. 363/6425, pp. 342-344, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aav7274>. [11]
- Alliance (2021), « Country Hydromet Diagnostics », page web, <https://alliancehydromet.org/country-hydromet-diagnostics/> (consulté le 15 September 2021). [53]
- Allis, E. et al. (2019), « L'avenir des services climatologiques », n° 68, Bulletin de l'OMM, Organisation météorologique mondiale, Genève, <https://public.wmo.int/fr/ressources/bulletin/l%E2%80%99avenir-des-services-climatologiques>. [10]
- Arendt-Cassetta, L. (2021), « From digital promise to front-line practice: New and emerging technologies in humanitarian action », *Policy Brief*, Bureau de la coordination des affaires humanitaires de l'ONU, New York. [6]
- BAD/OCDE (2020), *Leveraging Technology and Innovation for Disaster Risk Management and Financing*, Banque asiatique de développement, Manille, <http://dx.doi.org/10.22617/tcs200393-2>. [19]
- Banque mondiale (2019), « Blockchain: How the Fourth Industrial Revolution can help accelerate progress towards development », 24 janvier, Banque mondiale, Washington, D.C., <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/01/24/blockchain-como-asegurarse-que-cada-dolar-llegue-a-quien-lo-necesita>. [117]
- Bathiany, S., J. Hidding et M. Scheffer (2020), « Edge detection reveals abrupt and extreme climate events », *Journal of Climate*, vol. 33/15, pp. 6399-6421, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-19-0449.1>. [92]
- Baudoin, M. et al. (2016), « From top-down to 'community-centric' approaches to early warning systems: Exploring pathways to improve disaster risk reduction through community participation », *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 7/2, pp. 163-174, <http://dx.doi.org/10.1007/s13753-016-0085-6>. [74]
- Beaugrand, G. et al. (2019), « Prediction of unprecedented biological shifts in the global ocean », *Nature Climate Change*, vol. 9/3, pp. 237-243, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0420-1>. [90]
- Bell, A. et al. (2021), « Migration towards Bangladesh coastlines projected to increase with sea-level rise through 2100 », *Environmental Research Letters*, vol. 16/2, p. 024045, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abdc5b>. [55]

- Bergen, K. et al. (2019), « Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience », *Science*, vol. 363/6433, p. eaau0323, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aau0323>. [37]
- Bettini, G., G. Gioli et R. Felli (2020), « Clouded skies: How digital technologies could reshape 'loss and damage' from climate change », *WIREs Climate Change*, vol. 11/4, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.650>. [121]
- Biffis, E. et E. Chavez (2017), « Satellite data and machine learning for weather risk management and food security », *Risk Analysis*, vol. 37/8, pp. 1508-1521, <http://dx.doi.org/10.1111/risa.12847>. [122]
- Biswas, P. (2016), « India's Met model for world: Bhutan, 7 others to replicate tech-based advice », 16 octobre, The Indian Express, <https://indianexpress.com/article/india/india-news-india/indias-met-model-for-world-bhutan-7-others-to-replicate-tech-based-advice-3729310/>. [52]
- Boldt, J. et al. (2012), *Overcoming Barriers to the Transfer and Diffusion of Climate Technologies*, TNA Guidebook Series, Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, Centre Risø sur l'énergie, le climat et le développement durable du PNUE, <https://unepdtu.org/publications/overcoming-barriers-to-the-transfer-and-diffusion-of-climate-technologies/>. [5]
- Bony, S. et al. (2015), « Clouds, circulation and climate sensitivity », *Nature Geoscience*, vol. 8/4, pp. 261-268, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2398>. [32]
- Bragais, M. et al. (2016), « Vulnerability assessment using Lidar data », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B8, pp. 1397-1401, <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b8-1397-2016>. [62]
- Brody, S. et al. (2007), « Examining the relationship between physical vulnerability and public perceptions of global climate change in the United States », *Environment and Behavior*, vol. 40/1, pp. 72-95, <http://dx.doi.org/10.1177/0013916506298800>. [70]
- Brönnimann, S. et al. (2018), « A roadmap to climate data rescue services », *Geoscience Data Journal*, vol. 5/1, pp. 28-39, <http://dx.doi.org/10.1002/gdj3.56>. [27]
- Bruno Soares, M., M. Daly et S. Dessai (2018), « Assessing the value of seasonal climate forecasts for decision-making », *WIREs Climate Change*, vol. 9/4, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.523>. [25]
- Buckle, S. et al. (2020), « Addressing the COVID-19 and climate crises: Potential economic recovery pathways and their implications for climate change mitigation, NDCs and broader socio-economic goals », *OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers*, n° 2020/04, Éditions OCDE, Paris, <https://dx.doi.org/10.1787/50abd39c-en>. [109]
- Bury, T., C. Bauch et M. Anand (2020), « Detecting and distinguishing tipping points using spectral early warning signals », *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 17/170, p. 20200482, <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2020.0482>. [87]
- Butler, J. et al. (2015), « Integrating top-down and bottom-up adaptation planning to build adaptive capacity: A structured learning approach », *Coastal Management*, vol. 43/4, pp. 346-364, <http://dx.doi.org/10.1080/08920753.2015.1046802>. [126]

- CAPRA (sans date), « CAPRA Probabilistic Risk Assessment Platform », page web, [50]
<https://ecapra.org/> (consulté le 17 August 2021).
- CCNUCC (2020), *Policy Brief: Technologies for Averting, Minimising and Addressing Loss and Damage in Coastal Zones*, Nations Unies, Bonn. [134]
- CCNUCC (2017), *South–South cooperation and triangular cooperation on technologies for adaptation water and agriculture sectors*, CCNUCC, Bonn. [135]
- CCNUCC (2012), *The National Adaptation Plan Process: A Brief Overview*, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Bonn, [2]
https://unfccc.int/files/adaptation/application/pdf/nap_overview.pdf.
- CCNUCC (sans date), « About the Santiago Network », page web, <https://unfccc.int/santiago-network/about> (consulté le 22 September 2021). [131]
- CCNUCC (sans date), « Comité exécutif de la technologie », page web, [138]
<https://unfccc.int/ttclear/tec> (consulté le 22 September 2021).
- Chakraborty, T. et al. (2020), « A spatially explicit surface urban heat island database for the United States: Characterization, uncertainties, and possible applications », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 168, pp. 74-88, [57]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.021>.
- CIF (2020), *Strengthening Weather and Climate Information Services: Highlights from PPCR Supported Projects*, Fonds d'investissement climatiques, Washington, D.C., [9]
https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/ppcr_resilience_series_weather_and_climate_information_services.pdf.
- Clarke, B., F. Otto et R. Jones (2021), « Inventories of extreme weather events and impacts: Implications for loss and damage from and adaptation to climate extremes », *Climate Risk Management*, vol. 32, p. 100285, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2021.100285>. [83]
- CNUCED (2021), *Exploring Space Technologies for Sustainable Development*, Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, Genève, [16]
https://unctad.org/system/files/official-document/dtlstict2021d1_en.pdf.
- Copernicus (sans date), « Copernicus Key Products and Services », page web, [29]
<https://climate.copernicus.eu/> (consulté le 26 July 2021).
- Cornforth, R., C. Petty et G. Walker (2021), « Supporting climate-resilient planning at national and district levels: A pathway to multi-stakeholder decision-making in Uganda », dans *Climate Risk in Africa*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_8. [47]
- CTCN (sans date), « About the Climate Technology Centre and Network (CTCN) », page web, [137]
<https://www.ctc-n.org/about-ctcn> (consulté le 22 September 2021).
- de Bruijn, J. et al. (2019), « A global database of historic and real-time flood events based on social media », *Scientific Data*, vol. 6/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-019-0326-9>. [60]
- Dechezleprêtre, A. et al. (2020), *Invention and Global Diffusion of Technologies for Climate Change Adaptation: A Patent Analysis*, International Bank for Reconstruction and Development/World Bank, Washington, DC. [129]

- Dickson, E. et al. (2012), *Urban Risk Assessments: Understanding Disaster and Climate Risk in Cities*, Banque mondiale, Washington, D.C., <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/publication/urban-risk-assessments>. [51]
- Dinku, T. et al. (2017), « Enhancing National Climate Services (ENACTS) for development in Africa », *Climate and Development*, vol. 10/7, pp. 664-672, <http://dx.doi.org/10.1080/17565529.2017.1405784>. [43]
- Ditlevsen, P. et S. Johnsen (2010), « Tipping points: Early warning and wishful thinking », *Geophysical Research Letters*, vol. 37/19, <http://dx.doi.org/10.1029/2010gl044486>. [85]
- Econadapt (sans date), « Econadapt Toolbox, Methods », page web, <https://econadapt-toolbox.eu/methods> (consulté le 21 September 2021). [101]
- ESA (sans date), « Earth Observation Information Discovery Platform », page web, <https://earth.esa.int/eogateway> (consulté le 4 June 2021). [28]
- ESA (sans date), « Remote Sensing Of Tipping Points In The Climate System », page web, <https://climate.esa.int/en/news-events/remote-sensing-tipping-points-climate-system/> (consulté le 18 Oct 2021). [93]
- Faiyetole, A. (2018), « Potentialities of space-based systems for monitoring climate policies and mitigation of climate process drivers », *Astropolitics*, vol. 16/1, pp. 28-48, <http://dx.doi.org/10.1080/14777622.2018.1436329>. [81]
- Fricko, O. et al. (2017), « The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century », *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 251-267, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>. [106]
- Frigerio, S. et al. (2018), « Hands-on experience of crowdsourcing for flood risks. An android mobile application tested in Frederikssund, Denmark », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15/9, p. 1926, <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15091926>. [59]
- Fujimori, S. et al. (2017), « SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways », *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 268-283, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>. [105]
- GEO (2018), *Geo Work Programme and The Paris Agreement*, CCNUCC, Genève, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2.30%20GEO-WP.pdf>. [82]
- Geo-Wiki (sans date), « Risk Geo-Wiki », page web, <https://geo-wiki.org/branches/risk/> (consulté le 18 Oct 2021). [96]
- GFDRR (2019), *Information and Communication Technology for Disaster Risk Management in Japan*, Banque mondiale, Washington, D.C. [115]
- GFDRR (2016), *Solving the Puzzle: Innovating to Reduce Risk; Written Contributions*, Banque mondiale, Washington, D.C. [46]
- GIEC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte, V. et al. (dir. pub.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. [78]

- GIEC (2019), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [71]
- GIEC (2018), *IPCC Special Report Global Warming of 1.5 °C*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [103]
- GIEC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. [77]
- Gil, Y. et al. (2018), « Intelligent systems for geosciences », *Communications of the ACM*, vol. 62/1, pp. 76-84, <http://dx.doi.org/10.1145/3192335>. [44]
- Goldby, M. et al. (2019), « Triggering innovation: How smart contracts bring policies to life », *Emerging Risks Report 2019*, Lloyd's et Centre for Commercial Law Studies, Londres, <https://assets.lloyds.com/assets/pdf-triggering-innovation-how-smart-contracts-bring-policies-to-life/1/pdf-triggering-innovation-how-smart-contracts-bring-policies-to-life.pdf>. [119]
- Granderson, A. (2017), « The role of traditional knowledge in building adaptive capacity for climate change: Perspectives from Vanuatu », *Weather, Climate, and Society*, vol. 9/3, pp. 545-561, <http://dx.doi.org/10.1175/wcas-d-16-0094.1>. [72]
- Grubler, A. et al. (2018), « A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies », *Nature Energy*, vol. 3/6, pp. 515-527, <http://dx.doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>. [104]
- Gsell, A. et al. (2016), « Evaluating early-warning indicators of critical transitions in natural aquatic ecosystems », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113/50, pp. E8089-E8095, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1608242113>. [91]
- Guo, H., L. Zhang et L. Zhu (2015), « Earth observation big data for climate change research », *Advances in Climate Change Research*, vol. 6/2, pp. 108-117, <http://dx.doi.org/10.1016/j.accre.2015.09.007>. [110]
- Hallegatte, S. (2012), *A Cost Effective Solution to Reduce Disaster Losses in Developing Countries: Hydro-Meteorological Services, Early Warning and Evacuation*, Banque mondiale, Washington, D.C., <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/9359/WPS6058.pdf?s>. [42]
- Hemmerling, S. et al. (2019), « Elevating local knowledge through participatory modeling: active community engagement in restoration planning in coastal Louisiana », *Journal of Geographical Systems*, vol. 22/2, pp. 241-266, <http://dx.doi.org/10.1007/s10109-019-00313-2>. [98]
- Hewitt, C. et al. (2020), « Making society climate resilient: International progress under the Global Framework for Climate Services », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101/2, pp. E237-E252, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-18-0211.1>. [24]
- Homberg, M. et C. McQuistan (2018), « Technology for climate justice: A reporting framework for loss and damage as part of key global agreements », dans *Loss and Damage from Climate Change, Climate Risk Management, Policy and Governance*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72026-5_22. [128]

- Hooker, J., G. Duveiller et A. Cescatti (2018), « A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations », *Scientific Data*, vol. 5/1, <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2018.246>. [15]
- Hoskins, B. (2012), « The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139/672, pp. 573-584, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.1991>. [76]
- Hsu, A. et al. (2021), « Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities », *Nature Communications*, vol. 12/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>. [56]
- Inclusivity Solutions (2020), *Hollard Insurance and FNB Zambia Unveil New Insurance Product to Protect Small Businesses from Economic Shocks*, <https://inclusivitysolutions.com/hollard-insurance-and-fnb-zambia-unveil-new-insurance-product/>. [120]
- InsuResilience (2021), « Crop Insurance Program for Smallholder Farmers in Kenya », page web, <https://www.insuresilience-solutions-fund.org/news-events> (consulté le 15 September 2021). [123]
- IRGC (2017), *Introduction to the IRGC Risk Governance Framework, revised version*, EPFL International Risk Governance Center, Lausanne, <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-irgc-233739>. [4]
- Izumi, T. et al. (2019), « Disaster risk reduction and innovations », *Progress in Disaster Science*, vol. 2, p. 100033, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100033>. [132]
- Jones, T. et al. (2015), « Simultaneous radar and satellite data storm-scale assimilation using an Ensemble Kalman Filter approach for 24 May 2011 », *Monthly Weather Review*, vol. 143/1, pp. 165-194, <http://dx.doi.org/10.1175/mwr-d-14-00180.1>. [26]
- Karpatne, A. et al. (2017), « Theory-guided data science: A new paradigm for scientific discovery from data », *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 29/10, pp. 2318-2331, <http://dx.doi.org/10.1109/tkde.2017.2720168>. [36]
- Khan, A., S. Gupta et S. Gupta (2020), « Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 47, p. 101642, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101642>. [20]
- Klinke, A. et O. Renn (2012), « Adaptive and integrative governance on risk and uncertainty », *Journal of Risk Research*, vol. 15/3, pp. 273-292, <http://dx.doi.org/10.1080/13669877.2011.636838>. [1]
- Kriegler, E. et al. (2017), « Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century », *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 297-315, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015>. [107]
- Kwan, M. et D. Ransberger (2010), « LiDAR assisted emergency response: Detection of transport network obstructions caused by major disasters », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 34/3, pp. 179-188, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.02.001>. [63]
- Lenton, T. (2011), « Early warning of climate tipping points », *Nature Climate Change*, vol. 1/4, pp. 201-209, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1143>. [86]

- Lenton, T. et al. (2019), « Climate tipping points – too risky to bet against », *Nature*, vol. 575/7784, pp. 592-595, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>. [79]
- Liu, Y. et al. (2016), « Application of deep convolutional neural networks for detecting extreme weather in climate datasets », *Computer Vision and Pattern Recognition*, <https://arxiv.org/abs/1605.01156>. [34]
- Marder, J. (2019), « NASA Tracks Wildfires From Above to Aid Firefighters Below », page web, <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-tracks-wildfires-from-above-to-aid-firefighters-below> (consulté le 21 June 2021). [65]
- Mechler, R. et al. (2018), « Supporting Climate Risk Management at Scale. Insights from the Zurich Flood Resilience Alliance Partnership Model Applied in Peru & Nepal », dans *Loss and Damage from Climate Change, Climate Risk Management, Policy and Governance*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72026-5_17. [97]
- Michels, M., C. von Hobe et O. Musshoff (2020), « A trans-theoretical model for the adoption of drones by large-scale German farmers », *Journal of Rural Studies*, vol. 75, pp. 80-88, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.01.005>. [69]
- Minges, M. (2019), *Disruptive Technologies and their Use in Disaster Risk Reduction and Management*, Union internationale des télécommunications, Genève, https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Documents/2019/GET_2019/Disruptive-Technologies.pdf. [67]
- Mohanty, A. (2020), *Preparing India for Extreme Climate Events: Mapping Hotspots and Response Mechanisms*, Council on Energy, Environment and Water, New Delhi, https://www.ceew.in/sites/default/files/CEEW-Preparing-India-for-extreme-climate-events_10Dec20.pdf. [45]
- Newman, J. et al. (2017), « Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions », *Environmental Modelling & Software*, vol. 96, pp. 378-409, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.042>. [100]
- Nieves, V., C. Radin et G. Camps-Valls (2021), « Predicting regional coastal sea level changes with machine learning », *Scientific Reports*, vol. 11/1, pp. 358-361, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-87460-z>. [35]
- NOAA (sans date), « Argo Center », page web, <https://www.aoml.noaa.gov/phod/argo/> (consulté le 21 September 2021). [89]
- O'Neill, B. et al. (2017), « The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century », *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 169-180, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>. [108]
- Oasis (2021), « An Open Source Catastrophe Modelling Platform », page web, <https://oasislmf.org/> (consulté le 7 May 2021). [30]
- OCDE (2021), *Strengthening Climate Resilience: Guidance for Governments and Development Co-operation*, Éditions OCDE, Paris, <https://dx.doi.org/10.1787/4b08b7be-en>. [23]
- OCDE/AIE (2003), *Technology Innovation, Development and Diffusion*, Éditions OCDE, Paris, <https://www.oecd.org/env/cc/2956490.pdf>. [130]

- OCDE et al. (2020), *Latin American Economic Outlook 2020: Digital Transformation for Building Back Better*, Éditions OCDE, Paris, <https://dx.doi.org/10.1787/e6e864fb-en>. [133]
- OMM (2021), « Selon de nouvelles prévisions du climat, il est davantage probable que la température soit supérieure de 1,5 °C aux valeurs préindustrielles pendant les cinq prochaines années », 27 mai, Communiqué de presse, Organisation météorologique mondiale, Genève, <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/selon-de-nouvelles-pr%C3%A9visions-du-climat-il-est-davantage-probable-que>. [139]
- OMM (2020), *2020 State of Climate Service: Risk Information and Early Warning Systems*, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10385. [113]
- OMM (2020), « De nouvelles prévisions climatologiques des températures mondiales pour les cinq prochaines années », 8 juillet, Communiqué de presse, Organisation météorologique mondiale, Genève, <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/de-nouvelles-pr%C3%A9visions-climatologiques-des-temp%C3%A9ratures-mondiales-pour>. [39]
- OMM (2020), « The Systematic Observations Financing Facility: How will it work? », *Information Brief*, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10378. [13]
- OMM (2020), « The value of Surface-Based Meteorological Observational Data: Costs and benefits of the Global Basic Observing Network », *Information Brief*, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10376. [54]
- OMM (2015), *Déterminer la valeur du temps et du climat : L'évaluation économique des services météorologiques et hydrologiques*, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19780#.Yeq3pXrMJPY. [8]
- OMM (2015), *Status of the Global Observing System for Climate*, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7213. [22]
- OMM (sans date), « Global Producing Centres for Long-Range Forecasts », page web, <https://community.wmo.int/global-producing-centres-long-range-forecasts> (consulté le 23 September 2021). [38]
- OMM (sans date), « Regional Climate Outlook Forums », page web, <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-outlook-products>. [40]
- OMM et CMSC (2019), « 2019 State of climate services », *Working Paper*, n° 1242, Organisation météorologique mondiale, Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10089. [14]
- ONU (2021), « UN-Spider.org », page web, <https://www.un-spider.org/projects/evidenz/background-information> (consulté le 31 May 2021). [112]
- Papale, D. et R. Valentini (2003), « A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization », *Global Change Biology*, vol. 9/4, pp. 525-535, <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00609.x>. [33]
- PCRAFI (sans date), « Pacific Risk Information System Community », page web, <http://pcrafi.spc.int/> (consulté le 17 August 2021). [49]

- PIK (sans date), « AGRICA - Climate Risk Analyses for Identifying and Weighing Adaptation Strategies in sub-Saharan Africa », page web, <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-resilience/projects/project-pages/agrica/agrica-sv-giz-climate-project> (consulté le 25 September 2020). [99]
- Rahman, M. et P. Thakur (2018), « Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India », *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 21, pp. S37-S41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.10.002>. [64]
- Raithatha, R. et D. Tricarico (2019), *Mobile Technology for Rural Climate Resilience: The Role of Mobile Operators in Bridging the Data Gap*, GSMA AgriTech Programme, Londres, https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2019/10/GSMA_AgriTech_Climate_Report.pdf. [124]
- Red Cross 510 (2021), « 510.Global », page web, <http://510.global> (consulté le 4 June 2021). [48]
- Reichstein, M. et al. (2019), « Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science », *Nature*, vol. 566/7743, pp. 195-204, <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>. [7]
- Rosier, S. et al. (2021), « The tipping points and early warning indicators for Pine Island Glacier, West Antarctica », *The Cryosphere*, vol. 15/3, pp. 1501-1516, <http://dx.doi.org/10.5194/tc-15-1501-2021>. [88]
- Rühmann, F. et al. (2020), « Can blockchain technology reduce the cost of remittances? », *OECD Development Co-operation Working Papers*, n° 73, Éditions OCDE, Paris, <https://dx.doi.org/10.1787/d4d6ac8f-en>. [116]
- Salvati, P. et al. (2021), « Acquiring vulnerability indicators to geo-hydrological hazards: An example of mobile phone-based data collection », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 55, p. 102087, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102087>. [58]
- Sams, J. (2020), « Not all homes in wildfire zones are uninsurable. Here's how insurers can tell », 22 mai, Insurance Journal, <https://www.insurancejournal.com/news/national/2020/05/22/569684.htm>. [118]
- Sarker, M. et al. (2020), « Disaster resilience through big data: Way to environmental sustainability », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101769>. [66]
- Schweizer, P. et O. Renn (2019), « Governance of systemic risks for disaster prevention and mitigation », *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 28/6, pp. 862-874, <http://dx.doi.org/10.1108/dpm-09-2019-0282>. [3]
- Shepherd, T. (2014), « Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections », *Nature Geoscience*, vol. 7/10, pp. 703-708, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2253>. [31]
- Shove, E. (2010), « Beyond the ABC: Climate Change Policy and Theories of Social Change », *Environment and Planning A: Economy and Space*, vol. 42/6, pp. 1273-1285, <http://dx.doi.org/10.1068/a42282>. [41]

- Shrestha, M. et al. (2021), « The last mile: Flood risk communication for better preparedness in Nepal », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 56, p. 102118, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102118>. [114]
- Shukla, J. et al. (2010), « Toward a new generation of world climate research and computing facilities », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91/10, pp. 1407-1412, <http://dx.doi.org/10.1175/2010bams2900.1>. [75]
- Sommer, L. (2020), « To manage wildfire, California looks to what tribes have known all along », 24 août, NPR, <https://www.npr.org/2020/08/24/899422710/to-manage-wildfire-california-looks-to-what-tribes-have-known-all-along>. [73]
- Stokke, O. et O. Young (2017), « Integrating Earth observation systems and international environmental regimes », dans *Satellite Earth Observations and their Impact on Society and Policy*, Springer Singapore, Singapour, http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-3713-9_16. [80]
- Street, R. et al. (2019), « How could climate services support disaster risk reduction in the 21st century », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 24/mars, pp. 28-33, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.12.001>. [127]
- Sun, Q. et al. (2018), « A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons », *Reviews of Geophysics*, vol. 56/1, pp. 79-107, <http://dx.doi.org/10.1002/2017rg000574>. [17]
- Swingedouw, D. et al. (2020), « Early warning from space for a few key tipping points in physical, biological, and social-ecological systems », *Surveys in Geophysics*, vol. 41/6, pp. 1237-1284, <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-020-09604-6>. [84]
- UIT (2020), *Space Science for Achieving the Sustainable Development Goals*, Union internationale des télécommunications, Genève. [18]
- UIT (2016), *Harnessing the Internet of Things for Global Development*, Union internationale des télécommunications, Genève, <https://www.itu.int/en/action/broadband/Documents/Harnessing-IoT-Global-Development.pdf>. [21]
- UNOSSC (sans date), « About South-South and Triangular Cooperation », page web, <https://www.unsouthsouth.org/about/about-sstc/> (consulté le 22 September 2021). [136]
- van Aalst, M., T. Cannon et I. Burton (2008), « Community level adaptation to climate change: The potential role of participatory community risk assessment », *Global Environmental Change*, vol. 18/1, pp. 165-179, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.06.002>. [95]
- Weaver, C. et al. (2017), « Reframing climate change assessments around risk: Recommendations for the US National Climate Assessment », *Environmental Research Letters*, vol. 12/9, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa846a>. [125]
- Yu, M., C. Yang et Y. Li (2018), « Big data in natural disaster management: A Review », *Geosciences*, vol. 8/5, p. 165, <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences8050165>. [61]
- ZFL (2021), « EVIDENz », page web, <https://www.zfl.uni-bonn.de/research/projects/> (consulté le 7 June 2021). [111]

Zhang, F. et Y. Weng (2015), « Predicting hurricane intensity and associated hazards: A five-year real-time forecast experiment with assimilation of airborne Doppler radar observations », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96/1, pp. 25-33, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-13-00231.1>. [12]

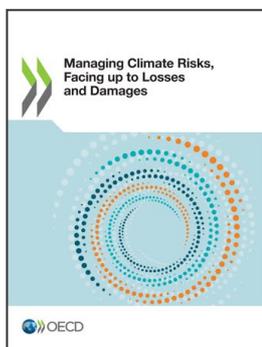
Notes

¹ L'IdO est issu de la convergence de réseaux d'objets physiques comme les logiciels, les capteurs et les autres dispositifs connectés à l'Internet utilisés pour échanger et suivre des informations en temps réel telles que la température, la qualité de l'eau, les émissions, les fumées, ou l'humidité.

² Sur la base des chiffres de la FAO, qui estime à environ 5 milliards d'hectares les terres agricoles mondiales – voir www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/.

³ La coopération Sud–Sud est un « vaste cadre de collaboration entre les pays du Sud dans les domaines politique, économique, social, culturel, environnemental et technique. Impliquant deux ou plusieurs pays en développement, elle peut s'établir sur une base bilatérale, régionale, intrarégionale ou interrégionale. Elle permet aux pays en développement de partager leurs connaissances, leurs compétences, leur expertise et leurs ressources pour atteindre leurs objectifs de développement grâce à des efforts concertés. » (UNOSSC, sans date_[136])

⁴ La coopération triangulaire est une « collaboration dans laquelle les pays donateurs traditionnels et les organisations multilatérales facilitent les initiatives Sud-Sud par la fourniture de mécanismes de financement, de programmes de formation et de gestion et de systèmes technologiques ainsi que d'autres formes de soutien » (UNOSSC, sans date_[136]).



Extrait de :

Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/55ea1cc9-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2022), « Technologies de réduction et de gestion des pertes et dommages », dans *Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/c727668c-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région. Des extraits de publications sont susceptibles de faire l'objet d'avertissements supplémentaires, qui sont inclus dans la version complète de la publication, disponible sous le lien fourni à cet effet.

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes :

<http://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation>.