

Résilience climatique

Assurer l'avenir énergétique de l'Europe face aux risques climatiques.





Sommaire	3
Introduction	3
L'évolution du système énergétique en Europe	5
Risques d'événements météorologiques extrêmes et production d'énergie	7
Évaluer les risques	10
Visualiser l'exposition aux risques	15
Actions visant à améliorer la résilience des infrastructures énergétiques	16
Recommandations	18

Rapports par pays	19
--------------------------	----

Annexes	20
Méthodologie	20

Crédits et avis de non-responsabilité	23
--	----



Une énergie propre, fiable et accessible est indispensable pour réduire les risques climatiques et garantir la prospérité économique de l'Europe.

La transition énergétique n'est pas seulement un impératif climatique. C'est une nécessité stratégique pour la stabilité économique, la sécurité; la compétitivité et la prospérité durable. Alors que les gouvernements et les entreprises du secteur de l'énergie mettent en oeuvre des mesures pour favoriser les énergies propres, la baisse des coûts des énergies renouvelables devrait entraîner une augmentation de leur part dans la production d'électricité globale.

Parallèlement, les risques climatiques physiques, sous forme d'événements météorologiques extrêmes, deviennent de plus en plus fréquents et intenses. Ces événements représentent un risque important pour toutes les formes de production d'énergie, mais les installations de production et de stockage d'énergies renouvelables sont particulièrement vulnérables aux risques climatiques tels que les vents forts, les inondations, la grêle et la sécheresse. Si les récents événements météorologiques extrêmes, comme la tempête Darragh en 2024 ou les inondations de 2021 en Europe, ont mis à nu les risques pour les infrastructures énergétiques, la plupart de ces risques climatiques physiques ne sont pas suffisamment évalués et les mesures prises pour y remédier sont insuffisantes. Les risques climatiques physiques devraient s'aggraver même lorsque les objectifs de neutralité carbone seront atteints. Par conséquent, des mesures visant à assurer la résilience des infrastructures énergétiques seront essentielles pour réussir la transition énergétique.

Ce rapport présente la nécessité d'améliorer l'évaluation des risques climatiques pour assurer la résilience énergétique. L'identification des risques représente une étape préalable à la mise en place de mesures de résilience. Zurich Resilience Solutions (ZRS) a mobilisé son expertise en modélisation et ingénierie des risques, ainsi que l'exploitation de données publiques, afin de cartographier et d'évaluer l'exposition aux risques climatiques des infrastructures de production et de stockage d'énergie dans cinq pays européens (France, Allemagne, Italie, Espagne et Royaume-Uni), conformément à un scénario de réchauffement de 2 °C à l'horizon 2030 et 2050. Compte tenu de l'importance croissante des énergies renouvelables dans le mix énergétique, cette analyse s'intéresse spécifiquement aux installations solaires, aux parcs éoliens terrestres, aux centrales hydroélectriques, ainsi qu'aux dispositifs de stockage par batteries et par pompage-turbinage.

Notre analyse révèle qu'en Europe, les risques climatiques physiques constituent déjà une menace réelle pour toutes les installations énergétiques. Cependant, il ressort clairement de notre analyse que les installations de production et de stockage d'énergies renouvelables sont relativement plus exposées aux risques climatiques physiques que les installations d'énergies fossiles. D'ici 2030, près de la moitié (46 %) de la capacité totale de production d'énergies renouvelables, dont 58% sont solaires, sera considérée à haut risque.

De même, 82 % du stockage d'énergie (pompage-turbinage et batteries) sera aussi exposé à un risque élevé. Sans actions, ces infrastructures européennes feront face à des risques physiques et financiers majeurs.

La nécessité de réussir la transition vers les énergies propres est impérative au regard de l'intensification des risques climatiques et des enjeux liés à la sécurité énergétique. Notre modélisation montre un risque relativement plus élevé pour les installations de production d'énergies renouvelables comparées à celles d'énergies conventionnelles. Le scénario du GIEC que nous avons retenu pour notre analyse s'appuie sur l'hypothèse d'un réchauffement de 2 °C d'ici 2041 à 2060. Ce scénario représente la base des plans de transition adoptés par la plupart des pays, avec l'objectif d'atteindre une conversion vers les énergies propres d'ici 2050. Si la transition vers les énergies renouvelables n'est pas réalisée, cela pourrait accentuer les risques climatiques physiques au cours de la période analysée, affectant les infrastructures énergétiques et ayant des répercussions sur la croissance économique de l'Europe.

La bonne nouvelle est que la mise en oeuvre de mesures d'adaptation et de résilience constitue une approche efficace pour réduire les risques liés au secteur énergétique, favoriser l'investissement dans les énergies propres et renforcer la robustesse du réseau énergétique européen à court et long terme. De plus, le développement de nouvelles infrastructures énergétiques permet d'intégrer dès le début des stratégies de résilience de manière optimale. Par ailleurs, la capacité de production des installations renouvelables devrait croître de près de 62 % d'ici 2030, ce qui représente une opportunité supplémentaire de garantir la robustesse de la transition vers les énergies propres à chaque étape de sa conception.

Il existe déjà des solutions d'adaptation éprouvées pour réduire les risques et éviter les dommages. Comme indiqué ici, les assureurs disposent des capacités nécessaires pour modéliser les risques climatiques et identifier les secteurs dans lesquels des plans d'adaptation peuvent être mis en place. En travaillant avec les entreprises et le secteur

public pour déployer ces connaissances de manière plus systématique, il devient possible d'estimer la valeur des investissements en adaptation, de garantir la bonne performance des installations liées aux énergies renouvelables (accessibilité, sécurité, rendement), et de limiter les coûts financiers associés.

Le renforcement de la résilience des infrastructures énergétiques implique des actions coordonnées à l'échelle nationale, des évaluations à l'échelle locale et l'élaboration de solutions sur mesure. Une étroite collaboration entre les secteurs public et privé sera essentielle pour mettre en oeuvre des politiques de soutien et des mesures incitatives harmonisées.

Pour appuyer ce processus et renforcer la résilience du secteur énergétique, nous recommandons d'agir dans les cinq domaines suivants :

1. Remédier au manque de résilience des installations énergétiques existantes
2. Soumettre les nouvelles installations de production à des tests de résistance en utilisant des scénarios climatiques dynamiques
3. Intégrer la résilience dans la planification et la conception
4. Optimiser l'accès et améliorer la qualité des données
5. Stimuler l'investissement dans les mesures de résilience

Les résultats de l'analyse menée par Zurich Resilience Solutions sont résumés ci-dessous, accompagnés d'évaluations des risques spécifiques à chaque pays dans les chapitres correspondants.



L'évolution du système énergétique en Europe

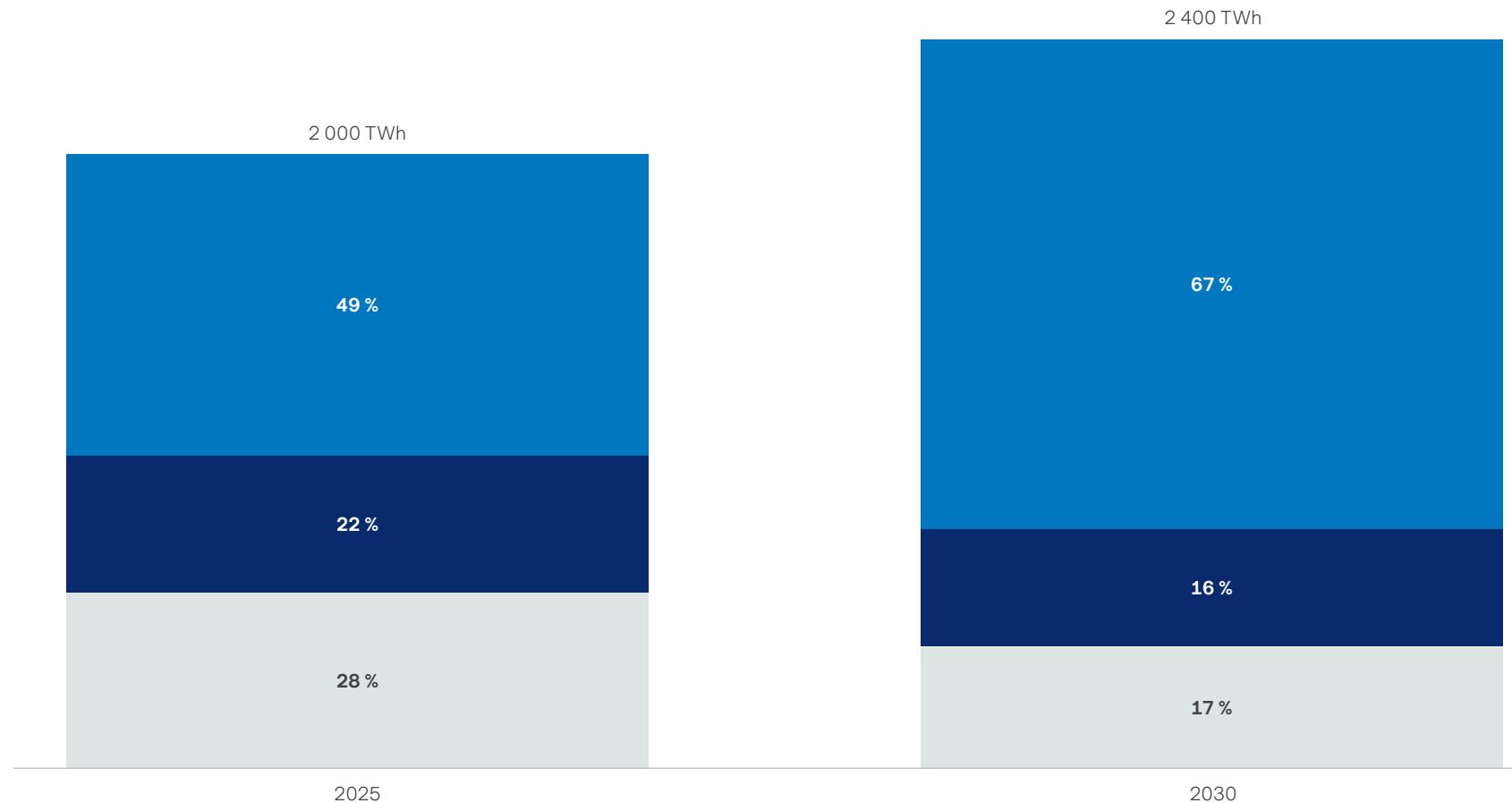
En Europe, la transition vers les énergies propres est rapide, portée par les engagements de neutralité carbone et la nécessité d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique.

La production d'électricité devrait croître d'environ 20 % entre 2025 et 2030 dans les cinq pays étudiés dans ce rapport (France, Allemagne, Italie, Espagne et Royaume-Uni), principalement dû à la progression de la demande au sein de ces économies. Ce taux pourrait bien être sous-estimé, compte tenu de la hausse anticipée de la consommation énergétique liée à l'adoption de l'intelligence artificielle (IA) sur ces marchés.

La hausse de la demande sera couverte par une capacité accrue en énergies renouvelables, tandis que la production d'énergies fossiles diminuera :

- Énergies renouvelables** : la part des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique) dans la production d'électricité devrait passer de 49 % à 67 % d'ici 2030 (passant de près de 1 000 TWh à près de 1 600 TWh, soit une augmentation d'environ 60 %).
- Nucléaire** : la part du nucléaire devrait légèrement diminuer, passant de 22 % à 16 % d'ici 2030.
- Énergies fossiles** : la part du charbon, du gaz et du pétrole devrait diminuer, passant de 28 % à 17 % d'ici 2030.

Projections de la production d'électricité en Europe¹ 2025 à 2030



- Énergies renouvelables
- Nucléaire
- Énergies fossiles

1. France, Allemagne, Italie, Espagne et Royaume-Uni

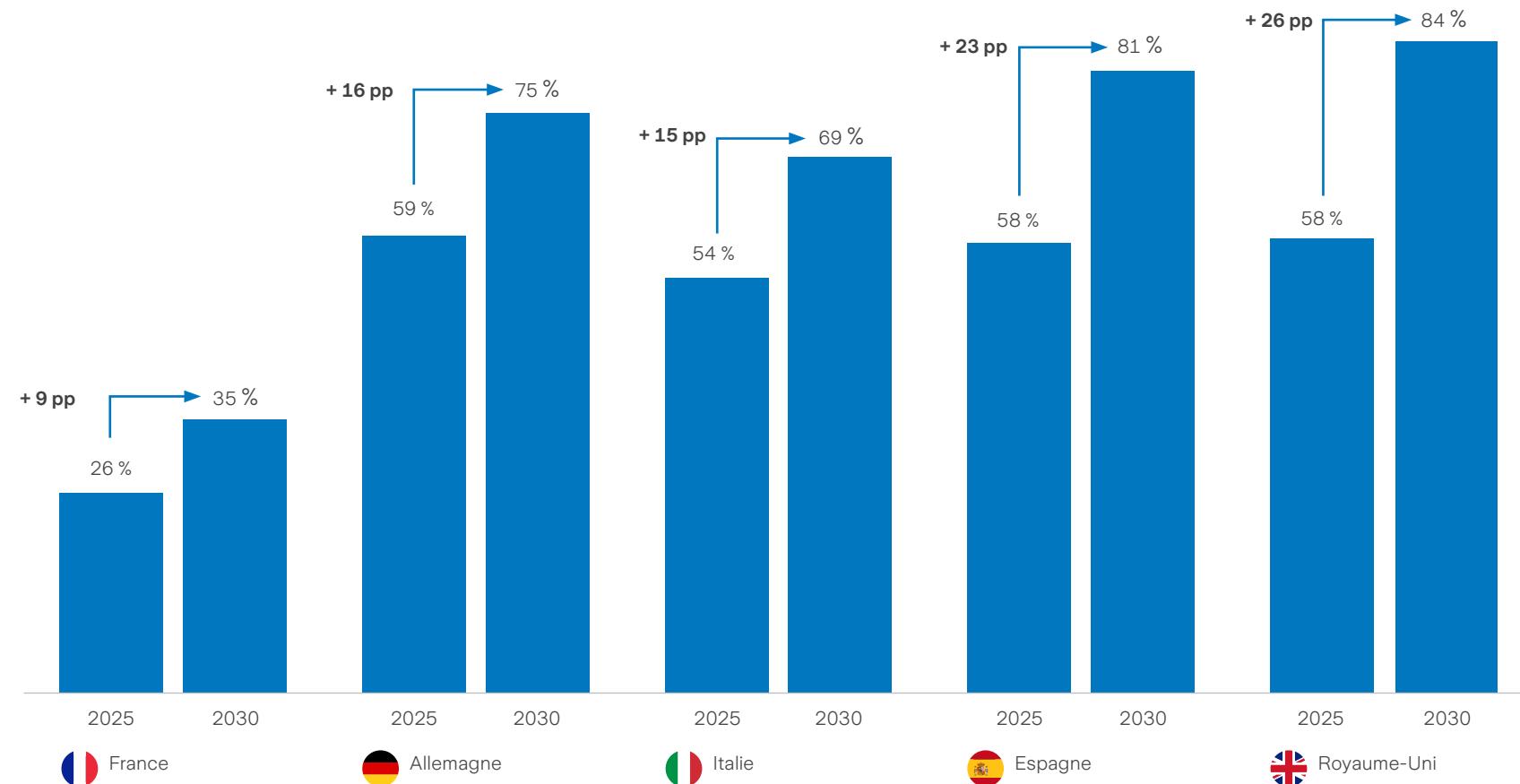
Remarque : Les projections de production d'électricité sont arrondies à la centaine de TWh la plus proche.

Sources : Department for Energy Security & Net Zero, AIE, Ember Energy, Commission européenne, analyse de ZRS et Mandala

L'augmentation de la production d'énergies renouvelables d'ici 2030 est particulièrement importante. Dans chacun des cinq pays analysés, l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est nette. La production d'énergie propre en France inclut le nucléaire, qui est l'une des composantes principales de son mix énergétique décarboné. Cette analyse s'intéresse uniquement aux énergies renouvelables, ce qui exclut le nucléaire, et ne reflète donc pas toute l'ampleur de la transition vers les énergies propres pour la France.

La sécurité d'approvisionnement énergétique en Europe dépendra de plus en plus des installations de production et de stockage d'énergies renouvelables. Il est donc essentiel d'évaluer et de quantifier les risques physiques climatiques inhérents à ces installations, ainsi que les mesures permettant de les atténuer efficacement.

Production d'énergies renouvelables par pays en pourcentage de la production totale d'énergie en pourcentage, 2025 à 2030



Source : Department for Energy Security & Net Zero, AIE, Ember Energy, Commission européenne, analyse de ZRS et Mandala.

Risques d'événements météorologiques extrêmes et production d'énergie

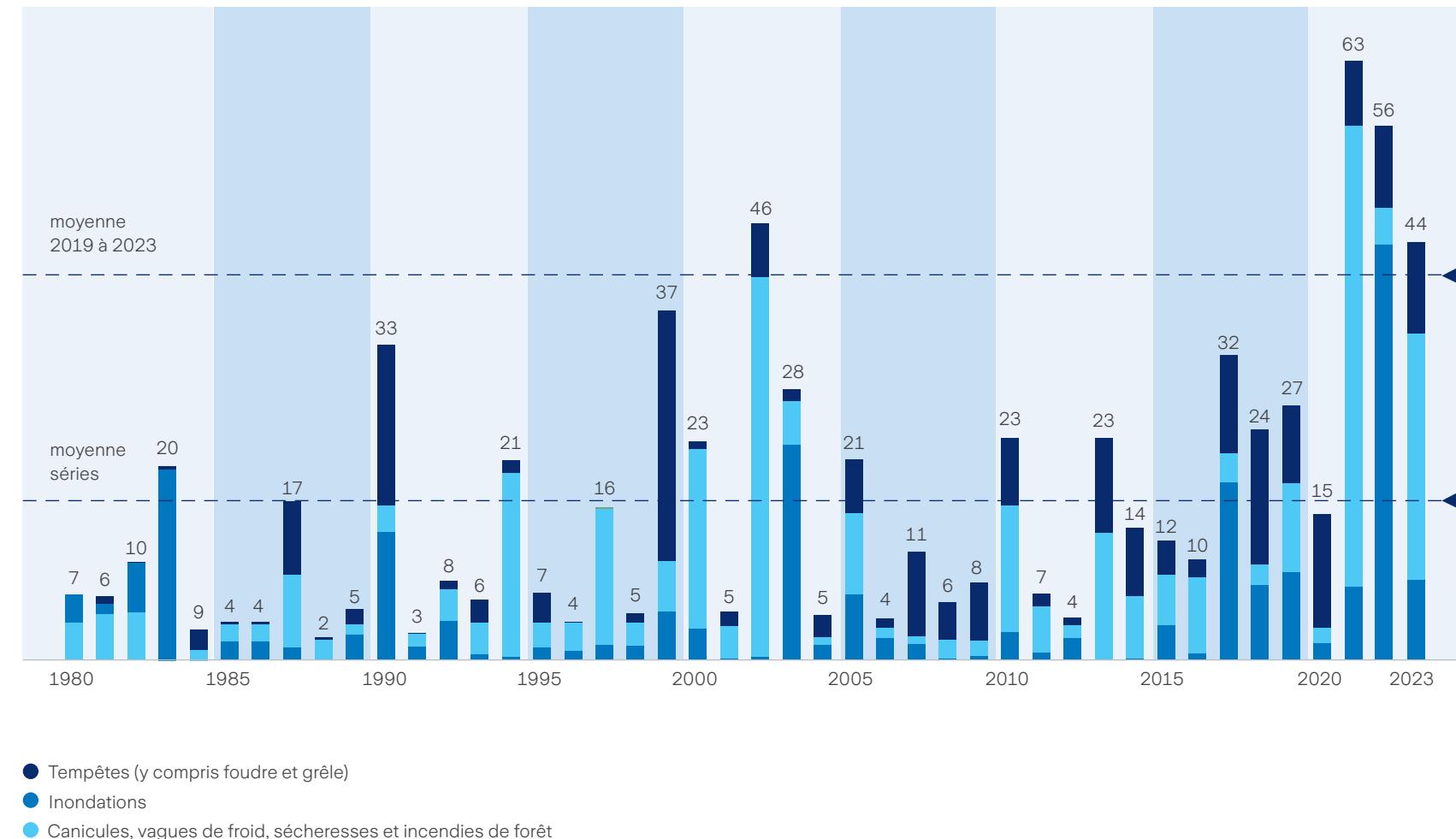
Les événements météorologiques extrêmes liés au dérèglement climatique transforment le paysage des risques en Europe, les phénomènes météorologiques extrêmes et les catastrophes naturelles devenant plus intenses et plus fréquents.

En Europe, les pertes annuelles moyennes liées à des phénomènes météorologiques et climatiques sont passées de 8,5 milliards d'euros dans les années 1980 à 16 milliards d'euros dans les années 2000, puis à environ 45 milliards d'euros dans les années 2020, signe manifeste de l'augmentation du risque financier lié aux événements climatiques.

Ces chiffres ont été calculés par l'Agence Européenne pour l'Environnement, sur la base d'estimations des pertes économiques engendrées par des événements météorologiques extrêmes. L'analyse couvre l'ensemble des États membres de l'UE, offrant une perspective plus large, au-delà des pays étudiés dans ce rapport.

Les modèles climatiques montrent que cette tendance devrait se poursuivre, avec une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements, tels que les tempêtes, les inondations et les sécheresses, exposant de plus en plus d'installations à des risques.

Pertes économiques engendrées par des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes
en milliards d'euros (prix de 2023), 1980 à 2023



Source : Agence européenne pour l'environnement, analyse de ZRS et Mandala.

Exemples de risques climatiques physiques et de leur impact en Europe

1. Grêle



Description de l'événement

- Des tempêtes de grêle ont causé de graves dégâts sur des panneaux solaires dans le nord de l'Italie** en 2023, allant de microfissures à des éclats visibles de couches de verre.

Dommages

- Arrêt total de courte durée de la production locale en attendant le rétablissement et la fin de l'enquête.
- Perte de capacité de courte durée pendant le remplacement des panneaux solaires endommagés.

Enseignement clé

- Les dégâts causés aux panneaux solaires dans la région soulignent la nécessité de prendre en compte l'augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes lors de la planification d'installations énergétiques. Les risques climatiques tels que la grêle doivent être intégrés dans les modèles de risques et les stratégies d'adaptation.

Source : analyse de ZRS et Mandala.

2. Inondation



Description de l'événement

- De graves inondations provoquées par la dépression « Bernd »** en 2021 ont entraîné l'arrêt de nombreuses centrales hydroélectriques dans l'ouest de l'Europe.

Dommages

- Arrêt total de courte durée de la production pendant les inondations.
- Perte de capacité à court et moyen terme, la plupart des centrales ayant été remises en service en huit semaines.

Enseignement clé

- Ces inondations sans précédent dans une région propice à la production hydroélectrique soulignent l'importance de se préparer à des événements climatiques peu probables, mais catastrophiques quand ils surviennent. Des systèmes de contrôle et des turbines éoliennes de pointe capables de gérer des vitesses de vent extrêmes deviennent de plus en plus essentiels.

3. Rafale de vent



Description de l'événement

- Les vents violents de la tempête Ignatz** en 2024 ont causé de graves dommages au parc éolien de Nattheim, dans le sud de l'Allemagne, brisant une pale d'éolienne.

Dommages

- Arrêt total de courte durée de la production en attendant le rétablissement et la fin de l'enquête.
- Perte de capacité de courte durée pendant l'évaluation des dommages et l'enquête.

Enseignement clé

- Les dommages causés au parc éolien reflètent l'importance de la résilience et de la planification face aux événements météorologiques extrêmes. Les rafales de vent et les tempêtes violentes sont de plus en plus intenses et fréquentes.

La gestion des risques climatiques physiques joue un rôle important dans la transition énergétique. La bonne nouvelle, c'est que nous sommes en mesure de relever ce défi.

Les assureurs disposent des capacités de modélisation nécessaires pour cartographier l'évolution des risques physiques sur les installations, sur différents horizons de temps, ainsi que de l'expertise en matière quantification des risques, afin d'identifier les mesures d'adaptation à mettre en place pour les atténuer. Comprendre les risques constitue une étape clé vers l'amélioration de la résilience et de l'assurabilité dans le temps.

Bien que cette expertise soit déjà déployée, il est nécessaire d'accélérer et d'intensifier les efforts pour éviter des coûts inutiles, renforcer la sécurité énergétique et préserver la confiance du grand public dans la transition vers les énergies renouvelables. Actuellement, les risques physiques climatiques restent grandement sous-estimés et les mesures d'adaptation trop rares. Ce rapport propose des solutions concrètes pour combler ces lacunes et favoriser une production d'énergie propre et résiliente en collaboration avec les entreprises du secteur et les États européens.

Analyse d'impact des risques climatiques pour les installations de production et de stockage d'énergies renouvelables en Europe

Catégorie	Type d'installation	Rafale de vent	Inondation	Onde de tempête	Sécheresse	Feu de forêt	Grêle	Tornade	Tremblement de terre	Vague de froid	Neige	Canicule
Production d'énergies renouvelables	Solaire											
	Éolienne terrestre											
	Énergie hydraulique											
	Pompage-turbinage											
	Batteries											
Stockage												

La production et le stockage d'énergies renouvelables sont relativement plus vulnérables aux risques climatiques que la production d'énergies conventionnelles. Chaque type d'installation a un profil de risque unique, les différents risques climatiques l'affectant différemment des autres types d'installation.

Production d'énergies conventionnelles	Nucléaire											
	Gaz naturel											
	Gaz											
	Pétrole											

Faible ● ● ● Très élevé

Remarque : Le risque de sinistre a été quantifié à l'aide de la valeur assurée totale par MW, qui représente le coût de remplacement de l'installation majoré du risque de pertes d'exploitation. Cette valeur est déterminée sur la base des données internes des assurances, lorsqu'elles sont disponibles, ou de données publiques sur la valeur des installations, qui sont ajustées en tenant compte des évaluations de l'impact des risques lorsque les données de référence ne sont pas disponibles.

Source : Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.



Évaluer les risques

Afin de mieux comprendre l'exposition potentielle du futur système énergétique européen aux risques climatiques physiques, ZRS a collaboré avec Mandala Partners, cabinet de conseil en modélisation économique, afin de recueillir des données sur les installations de production. Nous avons ensuite utilisé les données et la méthodologie de modélisation climatique géospatiale de ZRS pour évaluer les risques climatiques physiques au fil du temps et classer les installations de production et de stockage par niveau de risque.

En ciblant cinq principaux marchés européens – la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne et le Royaume-Uni –, nous avons exploité des sources publiques afin de constituer une base de données rassemblant plus de 25 000 sites de production et de stockage d'énergie, existants ou en cours de développement. Les informations collectées couvrent la localisation, le pays, la capacité ainsi que la technologie associée. Ces données ont ensuite été analysées à l'aide de l'outil propriétaire de ZRS, permettant la cartographie des installations individuelles en combinant les données internes ZRS et la modélisation de 15 risques climatiques à court et moyen terme (horizons 2030 et 2050) selon les scénarios du GIEC, tout en intégrant les historiques de pertes et dommages issus des données assurantielles de Zurich.

Dans le cadre de cette analyse, le scénario SSP2-4.5 du GIEC est retenu ; il suppose une augmentation de la température mondiale de 2 °C entre 2041 et 2060 et s'inscrit dans la logique des stratégies de transition vers la neutralité carbone adoptées par la majorité des pays, notamment en Europe. Le risque climatique physique fait référence à la détérioration ou à l'arrêt d'une installation de production ou de stockage provoqué par un événement climatique (tel qu'une inondation ou une sécheresse), dont l'évaluation dépend de la gravité de l'événement et de son impact sur la technologie concernée.

Après avoir cartographié les installations conformément à la modélisation ZRS de l'évolution des risques, les experts en ingénierie des risques de l'équipe Énergie Durable et Climat de ZRS ont procédé à une évaluation de la gravité potentielle associée à chaque événement climatique pour divers types d'installations de production et de stockage. Cette analyse a été intégrée aux résultats issus de la

modélisation afin de produire un score risque-impact, reposant sur un indice prenant en compte la fréquence et la gravité des risques climatiques et permettant de classer les installations selon cinq catégories de risque.

Le risque est important dès la catégorie 3 : pour cette analyse, les installations de catégorie 3 sont considérées à haut risque, et celles des catégories 4 et 5 à risque critique.

Classement des risques²

Catégorie 1	Les installations de catégorie 1 ont une probabilité d'environ 20 % de subir un événement climatique extrême d'ici 2030.
Catégorie 2	Les installations de catégorie 2 ont une probabilité d'environ 30 % de subir un événement climatique extrême d'ici 2030.
Catégorie 3	Les installations de catégorie 3 ont une probabilité d'environ 40 % de subir un événement climatique extrême d'ici 2030. Ces événements pourraient occasionner une panne temporaire pouvant durer jusqu'à une semaine, une baisse de capacité de courte durée (1 à 4 semaines) pouvant atteindre 25 % et des dommages pouvant représenter jusqu'à 10 à 20 % de la valeur de l'installation.
Catégorie 4	Les installations de catégorie 4 ont une probabilité d'environ 45 % de subir un événement climatique extrême d'ici 2030. Ces événements pourraient occasionner une panne temporaire pouvant durer une ou deux semaines, une baisse de capacité de durée moyenne (1 à 6 mois) pouvant atteindre 25 % et des dommages pouvant représenter jusqu'à 40 à 50 % de la valeur de l'installation.
Catégorie 5	Les installations de catégorie 5 ont une probabilité d'environ 50 % de subir un événement climatique extrême d'ici 2030. Ces événements pourraient occasionner des pannes de plus de deux semaines, une baisse de capacité sur le long terme (plus de 6 mois) pouvant atteindre 50 % et des dommages pouvant représenter jusqu'à 60 à 70 % de la valeur de l'installation.

2. Les catégories de risque 1 à 5 ont une probabilité d'occurrence d'un événement climatique extrême de respectivement environ 70 %, 75 %, 85 %, 90 % et 95 % entre 2030 et 2050. Cf. la méthodologie détaillée en annexe.

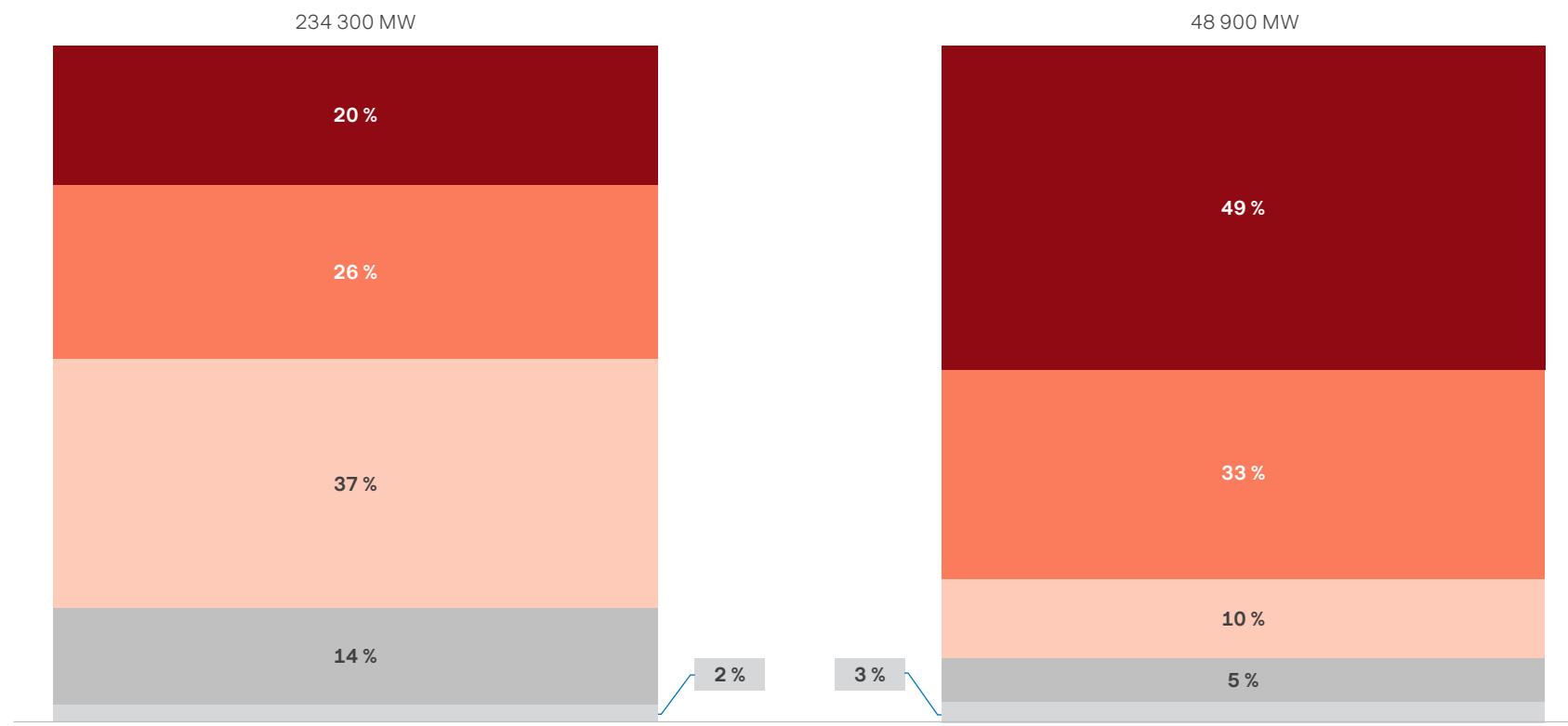
Notre analyse révèle que la plupart des actifs de production et de stockage d'énergie renouvelable sont exposés aux risques climatiques physiques. D'ici cinq ans, une proportion croissante de la production énergétique sera soumise à des risques climatiques accrus.

Dans les pays analysés, 83 % des capacités de production d'énergies renouvelables opérationnelles sont classées dans les catégories à haut risque. Les installations de stockage sont encore plus vulnérables, 92 % étant à haut risque.

Sur les capacités de production d'énergies renouvelables existantes, près de la moitié (46 %) sont classées dans les catégories de risque élevé. Les installations solaires sont les plus vulnérables, représentant bien plus de la moitié (58 %) des capacités de production d'énergies renouvelables classées à un niveau de risque élevé. L'énergie éolienne terrestre et l'hydroélectricité présentent toutes deux des vulnérabilités importantes, avec environ 20 % de la capacité de production (respectivement 21 % et 20 %, Cf. page suivante) classée à un niveau de risque élevé, l'énergie éolienne terrestre représentant la moitié de l'ensemble des installations de production actuels dans les pays analysés.

Production et stockage d'énergie par niveau de risque en Europe³ selon le scénario SSP2-4.5 (scénario de réchauffement de 2 °C)

en pourcentage, installations opérationnelles pondérées par la capacité



● Catégorie de risques 1 ● Catégorie de risques 2 ● Catégorie de risques 3 ● Catégorie de risques 4 ● Catégorie de risques 5

3. Les pays sont la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne et le Royaume-Uni.

Remarque : Inclut uniquement le risque à horizon de 5 ans (jusqu'en 2030) pour les installations. Les chiffres de capacité totale sont arrondis à la centaine de MW la plus proche. Se reporter à la diapositive suivante pour une ventilation plus détaillée de la capacité à risque élevé. Se reporter au rapport sur chaque pays pour une analyse plus approfondie.

Source : données de Global Energy Monitor, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

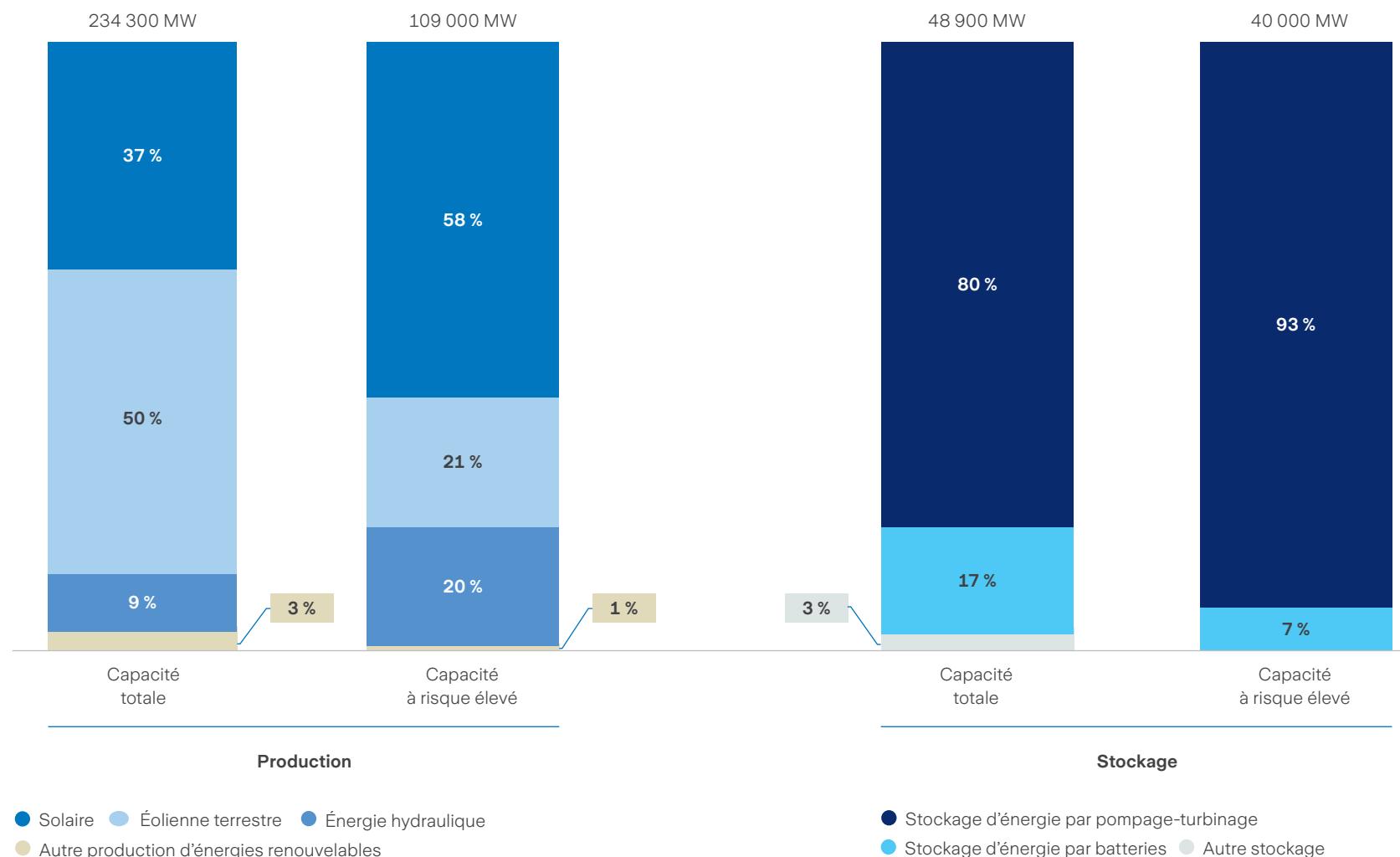
Les événements météorologiques extrêmes présentent un risque important pour les installations, pouvant potentiellement causer des dommages matériels aux installations et compromettre leur capacité de distribution d'électricité. Une grande partie des installations de production et de stockage d'énergies renouvelables en Europe est considérée comme présentant un risque élevé, les événements météorologiques extrêmes pouvant causer des destructions massives et des pertes de capacités sur tous les types d'installations.

Les rafales de vent, les incendies de forêt, la grêle et les tornades constituent les principaux risques climatiques pour les infrastructures de production d'énergie solaire et éolienne terrestre. Ensemble, ces deux sources représentent près de 80 % de la capacité de production exposée à un risque élevé, avec des risques climatiques pouvant entraîner des dommages significatifs aux installations.

La production d'énergie hydraulique présente un niveau de risque élevé à d'autres périls climatiques : les inondations peuvent entraîner la submersion des réservoirs et endommager les infrastructures, tandis que des épisodes de sécheresse prolongée sont susceptibles de compromettre totalement la production.

Le pompage-turbinage domine le stockage d'énergie avec 80 % de capacité totale, et est confronté aux mêmes vulnérabilités que l'énergie hydraulique conventionnelle, c'est-à-dire aux inondations, sécheresses et vagues de froid. Les systèmes de stockage par batteries, considérés comme l'avenir du stockage d'énergie, sont vulnérables aux vagues de chaleur et aux inondations, pouvant provoquer des pannes en cascade dans les installations de stockage.

Répartition de l'exposition des installations de production et de stockage d'énergies renouvelables opérationnelles aux risques climatiques en Europe dans le scénario SSP2-4.5 (réchauffement de 2 °C) en 2030



Source : données de Global Energy Monitor, données de l'inventaire européen du stockage d'énergie, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

Au vu de la croissance rapide des capacités de production d'énergies renouvelables et de l'importance accrue de ces installations dans le mix énergétique mondial à l'horizon 2030, il est essentiel d'assurer la résilience des infrastructures dédiées à la production d'énergies renouvelables.

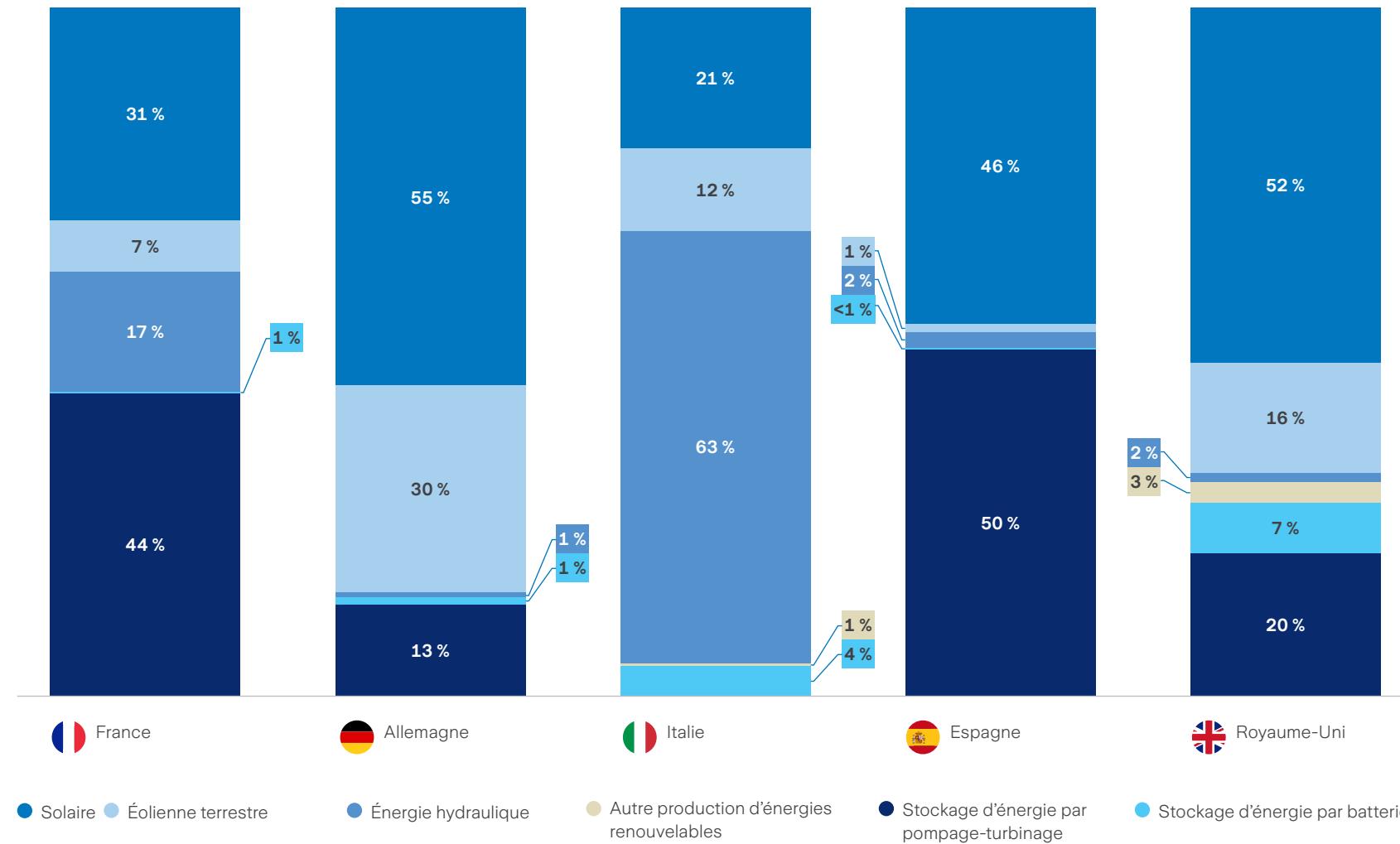
La répartition des risques varie selon le type d'installation, avec la production d'énergie solaire particulièrement exposée aux risques climatiques physiques. Dans la plupart des pays, sauf en Italie, le solaire constitue la majorité des capacités considérées à risque élevé, principalement en raison de la grêle et des phénomènes de vents violents tels que les tornades et les rafales de vent.

Les risques climatiques associés à la production d'énergie en Italie se concentrent principalement sur les infrastructures hydroélectriques, lesquelles constituent environ 63 % de la capacité totale de production et de stockage et appartiennent aux deux catégories de risque les plus élevées. L'Italie classe le pompage-turbinage dans les installations de production plutôt que de stockage, contrairement aux autres pays européens. Par conséquent, le risque lié à l'énergie hydraulique apparaît dans la catégorie production pour l'Italie, tandis que des risques similaires liés au pompage-turbinage apparaissent dans la catégorie stockage pour d'autres pays. Ces installations hydroélectriques sont fortement exposées au gel, aux vagues de froid et aux sécheresses, ce qui impacte à la fois les équipements et l'efficacité de la production.

Le solaire et l'éolien terrestre devraient jouer un rôle clé dans la production d'énergie d'ici 2030 pour tous les pays étudiés. Malgré des événements climatiques différents selon les régions (par exemple, les feux de forêt en Espagne et les vents au Royaume-Uni), il reste possible de définir des stratégies communes pour limiter les impacts sur les installations.

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables à risque élevé en 2030 dans le scénario SSP2-4.5 (scénario de réchauffement de 2 °C)

Proportion d'installations de production et de stockage d'énergies renouvelables dans les catégories de risque élevé (4 et 5), par type d'installation



Remarque : les autres productions d'énergies renouvelables incluent la bioénergie, la valorisation énergétique des déchets et la géothermie.

Source : données de Global Energy Monitor, données de l'inventaire européen du stockage d'énergie, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

Les sites de production et de stockage d'énergies renouvelables resteront exposés à des risques climatiques jusqu'en 2050, même avec un réchauffement limité à 2 °C, ce qui rend urgent d'accroître rapidement les investissements dans la résilience.

La production d'énergie solaire, appelée à constituer une part significative de la capacité énergétique totale (renouvelable et globale) d'ici 2050, pourrait être exposée à des risques majeurs si la résilience des infrastructures n'est pas renforcée.

Les sites de production et de stockage d'énergies renouvelables resteront exposés à des risques climatiques jusqu'en 2050, même avec un réchauffement limité à 2 °C, ce qui rend urgent d'accroître rapidement les investissements dans la résilience. La capacité totale de production et de stockage d'énergies renouvelables vulnérable aux risques climatiques devrait augmenter dans tous les pays européens entre 2030 et 2050, aggravant les profils de risque des réseaux de distribution et de transport d'énergie. Si pour le scénario SSP2-4.5, les installations existantes ne verraien qu'une légère hausse du risque, la vulnérabilité des nouveaux projets pourrait entraîner une évolution notable du paysage des risques en Europe. Une action précoce pourrait en limiter les impacts.

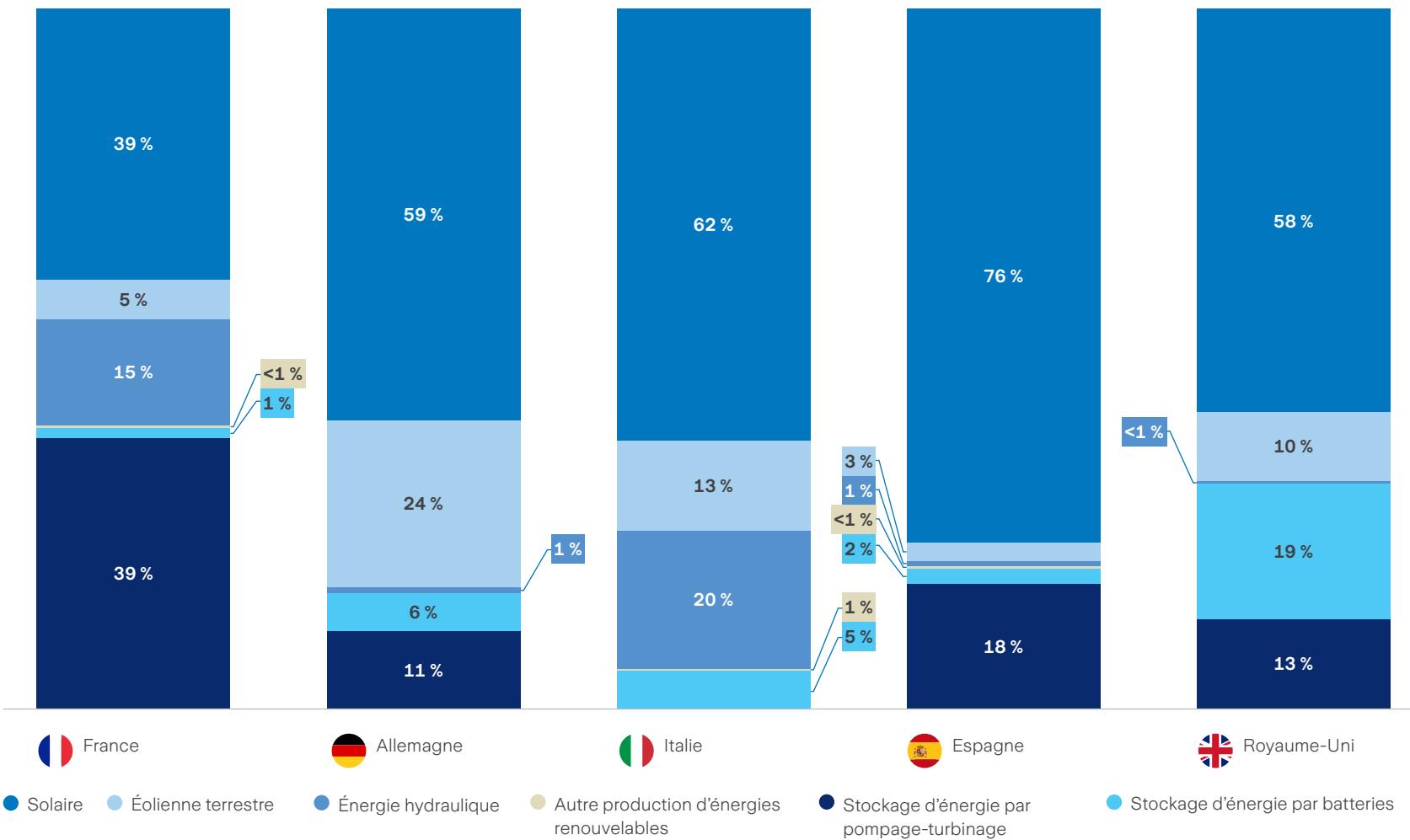
En Italie, la part des capacités à risques connaît une croissance significative car le solaire s'impose comme la principale technologie de production d'énergie renouvelable. Il est prévu que les capacités nationales à haut risque en matière de production et de stockage d'énergies renouvelables aient plus que doublé entre 2030 et 2050.

Outre l'Italie, les capacités solaires vulnérables aux rafales de vent, aux feux de forêt et aux tempêtes de grêle sont également en forte augmentation en Allemagne et en Espagne.

Les capacités de stockage seront également exposées à une aggravation des risques d'ici 2050, le stockage par pompage-turbinage représentant une part importante des capacités à risque élevé en France, en Allemagne, en Espagne et au Royaume-Uni. Ces installations font face à des contraintes géographiques qui rendent plus complexes les stratégies d'atténuation des risques climatiques.

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables à risque élevé en 2050 dans le scénario SSP2-4.5 (scénario de réchauffement de 2 °C)

Proportion d'installations de production et de stockage d'énergies renouvelables dans les catégories de risque élevé (4 et 5), par type d'installation



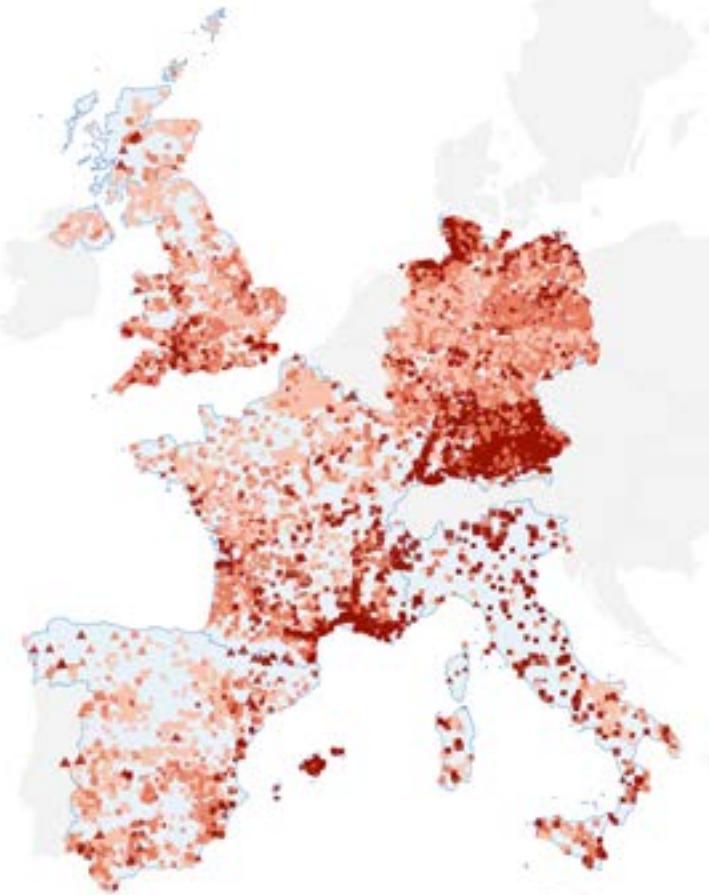
Remarque : les autres productions d'énergies renouvelables incluent la bioénergie, la valorisation énergétique des déchets et la géothermie.

Source : données de Global Energy Monitor, données de l'inventaire européen du stockage d'énergie, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

La cartographie de l'exposition aux risques des installations de production et de stockage en Europe indique une concentration plus élevée de capacités à risque, ainsi qu'une évolution dans la composition des installations concernées.

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables dans les catégories de risque 3, 4 et 5, en 2030

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables opérationnelles ; la couleur de l'installation indique le niveau de risque ; la forme indique le type d'installation

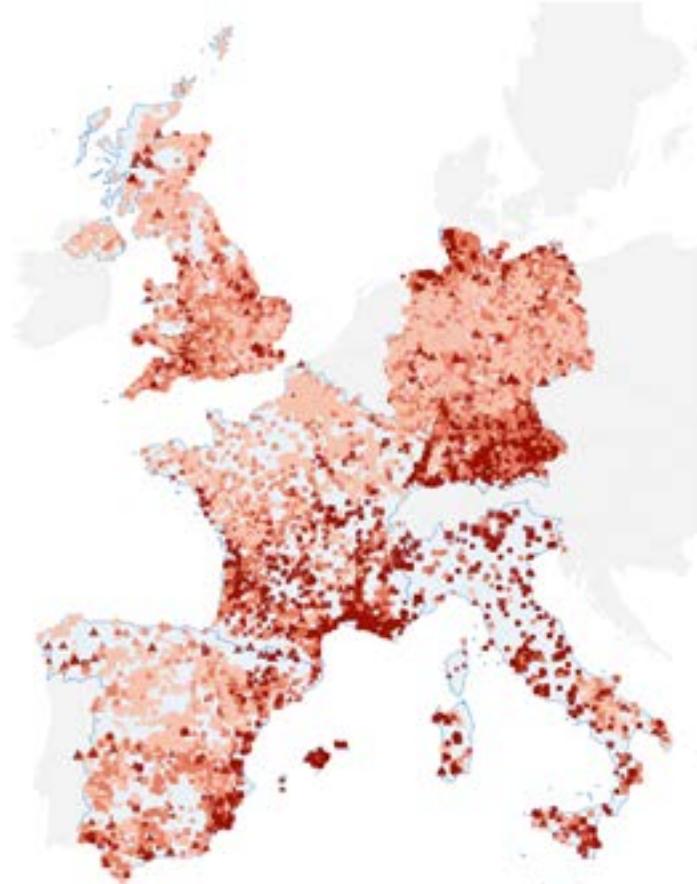


Part des installations dans les trois principales catégories de risque

Production	Stockage
92,7 %	86 %

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables dans les catégories de risque 3, 4 et 5, en 2050

Installations de production et de stockage d'énergies renouvelables opérationnelles ; la couleur de l'installation indique le niveau de risque ; la forme indique le type d'installation



Part des installations dans les trois principales catégories de risque

Production	Stockage
93,7 %	90,7 %

- Catégorie de risques 1
- Catégorie de risques 2
- Catégorie de risques 3
- Catégorie de risques 4
- Catégorie de risques 5

- ▲ Stockage
- Production

Remarque : La taille de la forme indique la taille relative de la capacité, les grandes formes représentant les grandes installations.

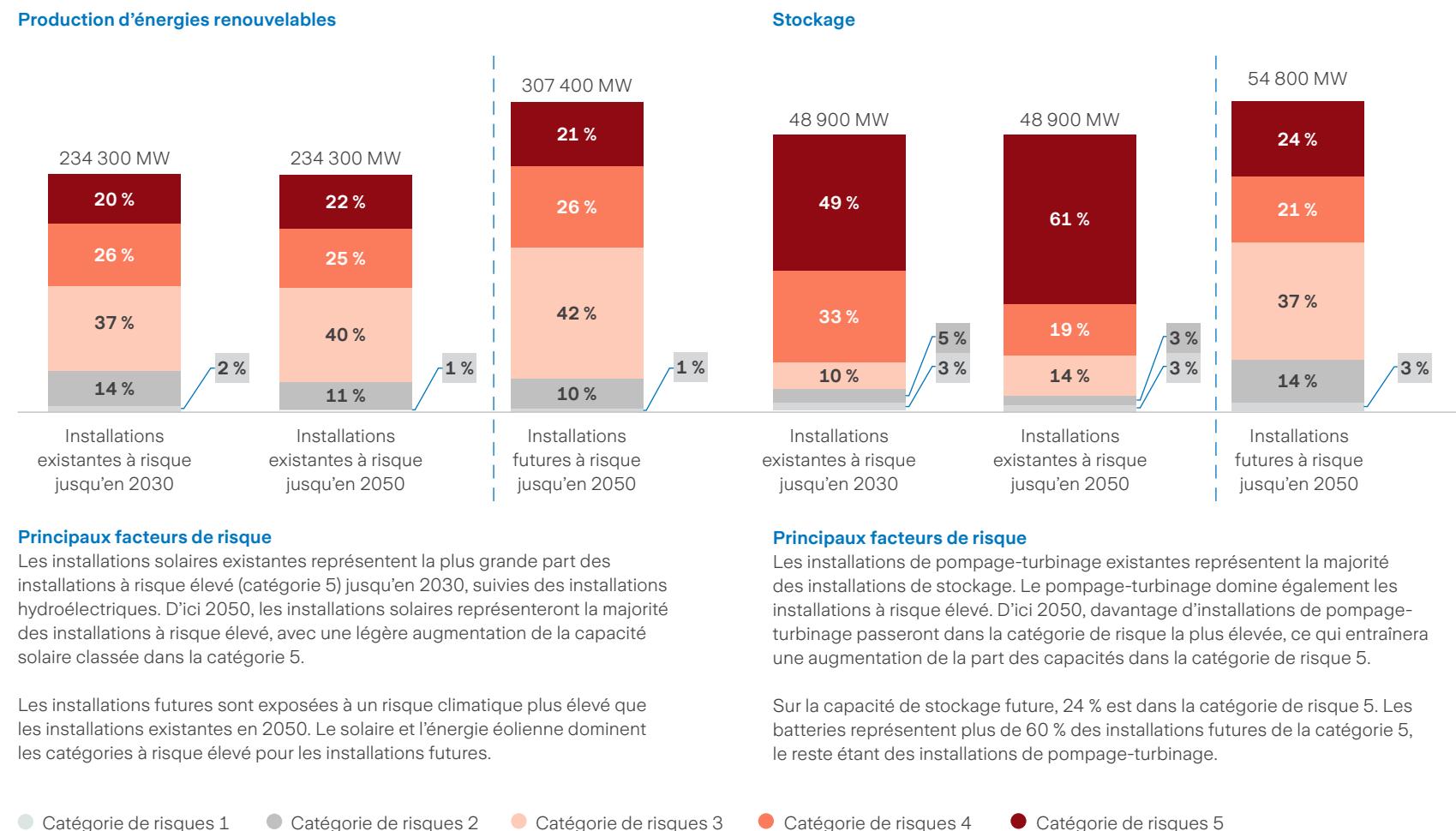
Source : données de Global Energy Monitor, données de l'inventaire européen du stockage d'énergie, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

Actions visant à améliorer la résilience des infrastructures énergétiques

L'analyse met en évidence la nécessité de mettre en place des mesures d'adaptation pour assurer la protection des installations de production et de stockage d'énergie au Royaume-Uni, en Allemagne, en Italie, en France et en Espagne. Les niveaux d'exposition aux risques identifiés sont élevés et pourraient augmenter.

L'intensification des effets des événements climatiques et l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques européens conduiront à une nette augmentation du nombre d'installations de production et de stockage à haut risque ou élevé d'ici 2050. Du fait de l'importance de ces installations pour la stabilité globale des futurs systèmes énergétiques des cinq grands pays analysés, cela entraînera non seulement une forte augmentation de la valeur à risque, mais aussi une augmentation du risque de perturbations économiques et de pertes d'exploitation beaucoup plus importantes, avec des pannes de courant, comme celle survenue en Espagne (avril 2025).

Production et stockage d'énergies renouvelables par niveau de risque au fil du temps pour le scénario SSP2-4.5 (scénario de réchauffement de 2 °C) en pourcentage, installations de production et de stockage d'énergies renouvelables pondérées par la capacité



Principaux facteurs de risque

Les installations solaires existantes représentent la plus grande part des installations à risque élevé (catégorie 5) jusqu'en 2030, suivies des installations hydroélectriques. D'ici 2050, les installations solaires représenteront la majorité des installations à risque élevé, avec une légère augmentation de la capacité solaire classée dans la catégorie 5.

Les installations futures sont exposées à un risque climatique plus élevé que les installations existantes en 2050. Le solaire et l'énergie éolienne dominent les catégories à risque élevé pour les installations futures.

Principaux facteurs de risque

Les installations de pompage-turbinage existantes représentent la majorité des installations de stockage. Le pompage-turbinage domine également les installations à risque élevé. D'ici 2050, davantage d'installations de pompage-turbinage passeront dans la catégorie de risque la plus élevée, ce qui entraînera une augmentation de la part des capacités dans la catégorie de risque 5.

Sur la capacité de stockage future, 24 % est dans la catégorie de risque 5. Les batteries représentent plus de 60 % des installations futures de la catégorie 5, le reste étant des installations de pompage-turbinage.

● Catégorie de risques 1 ● Catégorie de risques 2 ● Catégorie de risques 3 ● Catégorie de risques 4 ● Catégorie de risques 5

Remarque : les chiffres de capacité totale sont arrondis à la centaine de MW la plus proche. Se reporter au rapport sur chaque pays pour une analyse plus approfondie. Se reporter à la diapositive suivante pour une répartition par installations entre les pays jusqu'en 2050.

Source : données de Global Energy Monitor, Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

Selon notre analyse, l'absence de mesures visant à renforcer la résilience entraînerait des pertes estimées à plus de 270 milliards d'euros dans le secteur des installations de production et de stockage d'énergie, dues aux événements météorologiques extrêmes d'ici à 2050.

Le graphique met en évidence l'importance d'une priorisation des investissements dans les mesures d'adaptation. Une analyse détaillée des actifs permet de quantifier l'effet d'atténuation des différentes mesures, tant pour les sites opérationnels que pour les risques climatiques. Il ressort qu'un investissement modéré peut entraîner une réduction des pertes attendues allant jusqu'à 50 %, soit jusqu'à vingt fois le montant initial investi.

Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire de mobiliser différemment les connaissances relatives aux risques dans le but de renforcer la résilience. Il convient d'identifier les principaux risques ainsi que de déterminer les actions appropriées à mettre en oeuvre pour leur gestion.

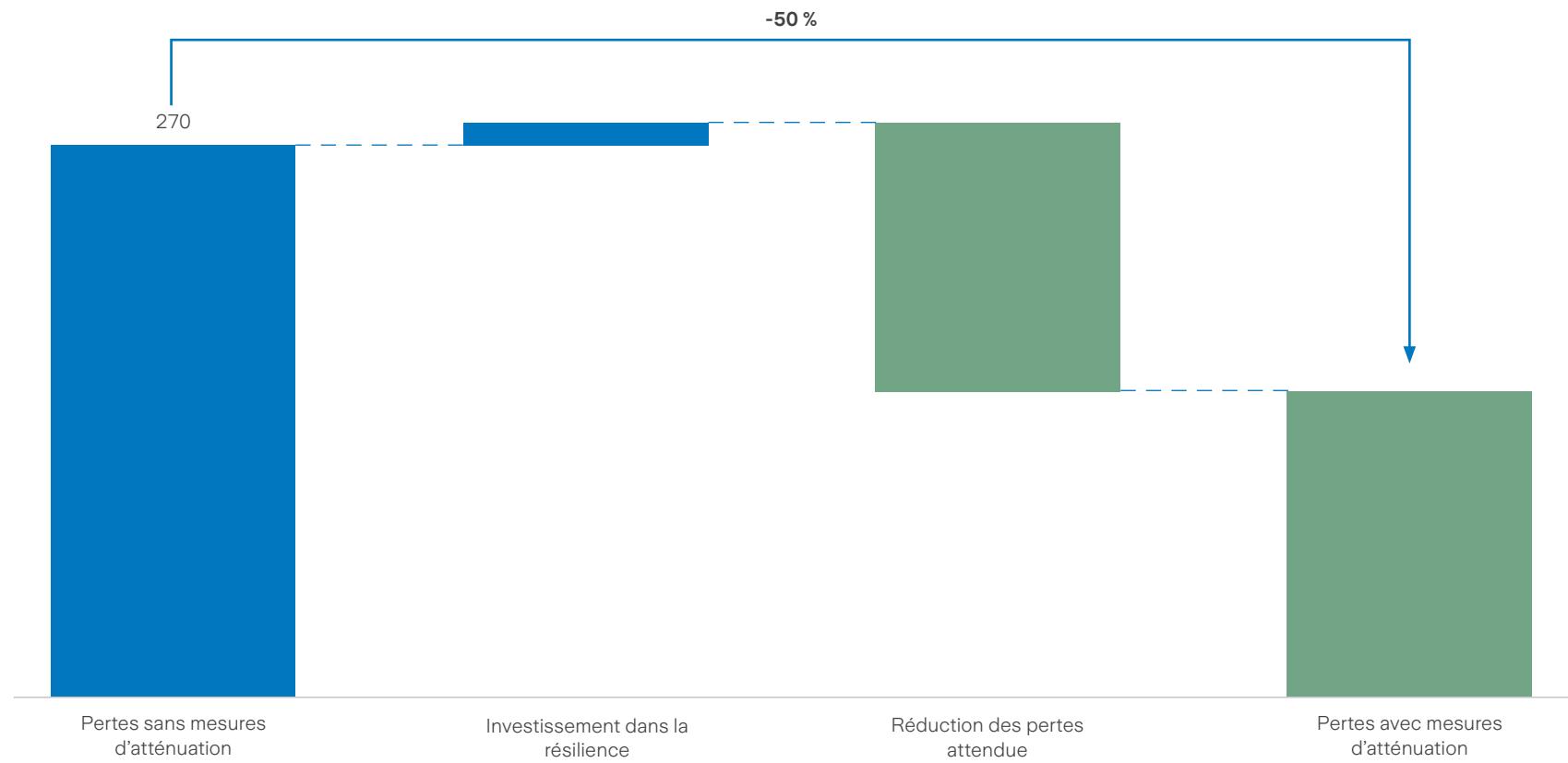
Comme l'a montré l'analyse dans ce rapport, les assureurs disposent des connaissances en modélisation et en ingénierie des risques nécessaires pour quantifier ces risques aux niveaux local et national. Nous avons également la capacité de quantifier le coût des mesures d'adaptation de ces risques.

Le principal enjeu consiste à organiser et à prioriser les mesures à prendre afin de permettre une mise en oeuvre plus rapide, les actions pour réduire les risques étant déjà identifiées.

Nous sommes en mesure d'accompagner entreprises et municipalités dans l'évaluation de leurs vulnérabilités aux risques climatiques et de leur fournir des recommandations adaptées concernant les mesures à adopter. Par ailleurs, nous quantifions l'impact des mesures d'adaptations, favorisons une prise de décision éclairée en matière d'investissement et mobilisons les ressources requises pour garantir la pérennité énergétique.

Pertes potentielles dues aux risques climatiques d'ici 2050

les valeurs en euros sont exprimées en valeur actuelle (2025) ; en milliards d'euros



Cela comprend :

- Le coûts des dommages matériels causés aux installations
- Les coûts des pertes d'exploitation

Sont exclus les coûts supplémentaires potentiels pour le système énergétique global, engendrés par des externalités (par exemple, la récente panne de courant en Espagne)

Recommandations

Les solutions sont disponibles, mais pour qu'elles soient déployées de manière systématique et efficace, une collaboration entre les secteurs public et privé et un effort coordonné seront nécessaires pour améliorer la sensibilisation, harmoniser les mesures incitatives et stimuler l'investissement dans la résilience.

Agir sur ces cinq domaines permettra de créer le cadre politique et la dynamique de marché nécessaires au développement d'infrastructures énergétiques résilientes en Europe :

1. Renforcer la résilience climatique des infrastructures existantes

La gestion proactive des risques constitue un élément essentiel de la stratégie d'entreprise. La réduction de l'exposition et des vulnérabilités aux risques climatiques physiques, en constante évolution, permet aux exploitants du secteur énergétique de limiter les pertes potentielles et d'optimiser leur assurabilité. Il est recommandé aux décideurs politiques d'explorer des solutions visant à favoriser l'investissement dans des mesures de renforcement de la résilience.

2. Soumettre les nouvelles installations de production à des tests de résistance en utilisant des scénarios climatiques dynamiques

Comprendre les risques futurs et modéliser l'évolution des risques climatiques devrait être un élément clé de toute prise de décision dans la conception de nouvelles infrastructures énergétiques. Tout au long de la chaîne de valeur, il est recommandé d'intégrer une approche de résilience lors de la planification, tandis que les autorités publiques peuvent élaborer des politiques favorisant l'adoption généralisée d'innovations technologiques destinées à renforcer la résilience.

3. Intégrer la résilience dans les processus de planification et de conception Un cadre politique cohérent, stable et transparent, qui intègre la résilience comme principe fondamental lors du développement des infrastructures énergétiques, favorisera l'investissement et stimulera l'innovation.

4. Optimiser l'accès et améliorer la qualité des données

Un meilleur accès aux données publiques permettrait d'améliorer la modélisation des risques climatiques et de créer des ensembles de données ouvertes. Les pouvoirs publics doivent améliorer la disponibilité et la facilité d'utilisation des données relatives à la résilience (par exemple, la localisation des installations prévues, les décisions de zonage, l'exposition aux risques climatiques). Certains pays européens appliquent déjà ces pratiques, qui pourraient être répliquées.

5. Stimuler l'investissement dans les mesures de résilience

L'accent mis sur la résilience devrait garantir l'assurabilité et soutenir l'investissement. Toutefois, afin de renforcer la sécurité future des systèmes énergétiques face aux risques climatiques physiques, il est recommandé que les décideurs explorent des mécanismes de financement mixte et travaillent avec le secteur industriel et les investisseurs afin d'élaborer un plan destiné au développement d'installations résilientes pouvant accueillir des capitaux.



Rapports par pays

Des analyses par pays, couvrant l'évolution des risques et les possibilités de renforcer la résilience des systèmes énergétiques, peuvent être téléchargées en cliquant sur les liens ci-dessous.



Rapport sur la France ↴



Rapport sur l'Allemagne ↴



Rapport sur l'Italie ↴



Rapport sur l'Espagne ↴



Rapport sur le Royaume-Uni ↴

Méthodologie

La modélisation géospatiale des risques climatiques de Zurich Resilience Solutions a été utilisée pour évaluer les risques climatiques physiques auxquels sont exposées les installations de production et de stockage

Définition

Le **risque climatique physique** s'entend du risque de détérioration ou de mise hors service d'une installation de production ou de stockage engendrée par un événement climatique (par exemple, inondation, sécheresse), déterminé par la gravité de l'événement et son impact sur la technologie. **Cette analyse porte uniquement sur les installations terrestres, à l'exclusion de l'énergie éolienne offshore.**

1 Collecte de données sur les installations

- Mandala a développé un ensemble de données de plus de 25 000 installations de production et de stockage d'énergie par le biais de recherches documentaires, notamment auprès de sources telles que la Commission européenne et Global Energy Monitor.
- Cet ensemble de données comprend la localisation de chaque installation, son état opérationnel (par exemple, planifiée, en construction, opérationnelle), sa capacité et la technologie de production/stockage (par exemple, solaire, nucléaire, batterie, volant d'inertie).
- L'analyse présentée dans ce rapport s'appuie sur des données d'installations énergétiques disponibles en mai 2025.

2 Cartographie des données selon la modélisation climatique de Zurich

- Les données climatiques propriétaires de ZRS ont été utilisées pour déterminer le risque climatique auquel est confrontée chaque installation, sur la base des définitions des scénarios climatiques du GIEC, adaptées à l'installation sur différents horizons temporels.
- La plateforme numérique Climate Spotlight de ZRS a été utilisée pour analyser et visualiser la combinaison des ensembles de données climatiques et des installations. Les évaluations des risques ont été exprimées qualitativement, de faible à très élevé, pour 15 périls climatiques.
- Le scénario climatique le plus probable, SSP2-4.5 (réchauffement de 2 °C d'ici 2050), à horizon temporel court à moyen, a été choisi car il correspond aux tendances actuelles des émissions et à la durée de vie type des installations d'énergies renouvelables.

3 Analyse d'impact

- En collaboration avec les spécialistes de l'énergie et du climat de ZRS, une analyse d'impact a été réalisée afin de déterminer la gravité de chaque risque climatique pour les différents types de technologie
- L'impact potentiel de chaque type de risque a été évalué sur une échelle allant de « faible » à « très élevé », reflétant l'impact qu'un risque climatique particulier aurait sur une installation. L'objectif était de s'assurer que l'analyse des risques climatiques reflète l'impact probable sur une installation.

4 Score total risque-impact

- Un score total a ensuite été calculé pour chaque installation de la base de données. Ce calcul a converti les évaluations du risque et de l'impact, classés de faible à très élevé, sur une échelle de 1 à 4.
- La valeur du risque a ensuite été multipliée par la valeur de l'impact pour chaque installation.
- Par exemple, si un parc solaire présente un niveau de risque « très élevé » pour la grêle (valeur de 4) et un niveau d'impact de la grêle très élevé (valeur de 4), le score total risque-impact pour ce parc solaire sera de 16.

5 Classement des risques

- Les installations sont regroupées en cinq catégories (1 à 5) à l'aide de scores Z, 1 représentant les installations les moins à risque et 5 les installations à haut risque. Les scores Z mesurent l'écart entre le score risque-impact de chaque installation et la moyenne.
- L'impact du risque dans la catégorie 3 et les catégories supérieures est significatif. Pour les besoins de cette analyse, nous avons donc défini les installations de catégorie 3 comme étant à haut risque et celles des catégories 4 et 5 comme étant à risque élevé.
- La probabilité d'exposition à un événement climatique extrême est calculée en utilisant l'intervalle de récurrence pour chaque installation, puis en faisant la moyenne pour l'ensemble des installations de chaque catégorie.

Méthode

Remarque : les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP) sont des scénarios d'évolutions socio-économiques mondiales projetés utilisés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies pour élaborer des scénarios de changement climatique.

Source : Zurich Resilience Solutions, analyse de ZRS et Mandala.

Probabilité d'occurrence d'un risque climatique sur le site d'une installation

Première étape statistique : convertir les intervalles de récurrence en probabilité

Extraire l'intervalle de récurrence de chaque événement climatique des données de ZRS



Utiliser la fonction de masse de probabilité de Poisson pour calculer la probabilité que l'événement **ne se produise pas** au cours des cinq prochaines années

Exemple : Si l'intervalle de récurrence d'une rafale de vent est de 100 ans ($\mu = 0,01$), la probabilité que l'événement ne se produise pas au cours des cinq prochaines années se calcule comme suit :

$$P(r; t) = \frac{(\mu t)^r}{r!} e^{-\mu t} \quad \longrightarrow \quad P(r = 0; t = 5) = \frac{(5/100)^0}{0!} e^{-5/100} \approx 95.12\%$$

Étape intermédiaire : déterminer la probabilité cumulée qu'un événement climatique ne se produise PAS sur le site d'une installation au cours des cinq prochaines années

Si le niveau de risque issu de la base de données de ZRS et le score d'impact du risque issu de la matrice d'impact dépassent le seuil « L », la probabilité de non-occurrence sur 5 ans devient l'un des facteurs multipliés dans le calcul de la probabilité cumulée.

Remarque : cette multiplication presuppose que tous les événements climatiques sont statistiquement indépendants, offrant une base simplifiée mais pratique pour déterminer la probabilité d'occurrence d'événements climatiques

Probabilité qu'AUCUN événement climatique ne se produise sur le site de cette installation au cours des 5 prochaines années



Probabilité qu'aucun **événement climatique A** ne se produise au cours des 5 prochaines années



Probabilité qu'aucun **événement climatique B** ne se produise au cours des 5 prochaines années



Probabilité qu'aucun **événement climatique C** ne se produise au cours des 5 prochaines années



Probabilité qu'aucun **événement climatique...** ne se produise au cours des 5 prochaines années

Calcul de la probabilité : déterminer la probabilité qu'un événement climatique se produise sur le site d'une installation au cours des cinq prochaines années

Probabilité qu'un événement climatique se produise sur le site de cette installation au cours des 5 prochaines années

= 1 -

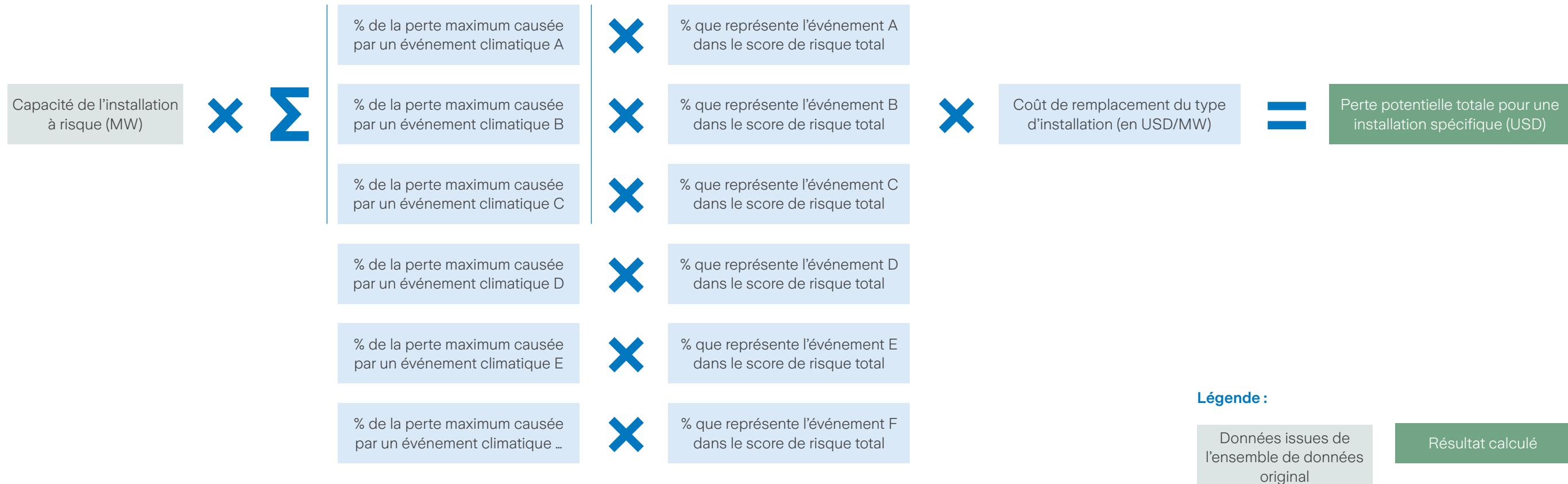
Probabilité qu'aucun événement climatique A ne se produise au cours des 5 prochaines années

Légende :

Résultat intermédiaire

Résultat calculé

Méthode de calcul des pertes potentielles



Remarque importante : les événements climatiques A, B et C ne sont pas les mêmes pour toutes les installations. Ils représentent les trois principaux risques ayant le produit le plus élevé de ($\% \text{ de perte maximum} \times \% \text{ du score de risque}$) pour chaque installation spécifique. Cela signifie que :

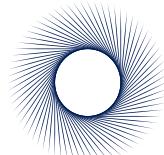
- Les différentes installations sont exposées à différentes combinaisons de risques principaux.
- L'« événement climatique A » pourrait être la grêle pour une installation, et le vent pour une autre
- Les installations sont évaluées par rapport à leur profil de risque spécifique
- Le calcul priorise les événements climatiques qui présentent le plus gros risque financier pour chaque installation spécifique

Crédits et avis de non-responsabilité

Ce rapport a été produit par Zurich Resilience Solutions, avec le soutien de Mandala Partners.

Mandala Partners

Mandala est un cabinet de recherche et de conseil en économie. Mandala est spécialisé dans la combinaison de données de pointe et de techniques d'analyse avancées pour générer de nouvelles connaissances et perspectives sur les défis auxquels les entreprises et les États sont confrontés.



MANDALA

Avis de non-responsabilité : Cette publication a été rédigée par Zurich Insurance Group Ltd et les opinions qui y sont exprimées sont celles de Zurich Insurance Group Ltd à la date de rédaction, et pourraient être modifiées sans préavis. Cette publication a été produite à des fins d'information uniquement. Toutes les informations contenues dans cette publication ont été obtenues auprès de sources considérées comme fiables et crédibles, mais Zurich Insurance Group Ltd et ses filiales (le « Groupe ») ne font aucune déclaration ni ne donnent aucune garantie, explicite ou implicite, quant à l'exactitude ou l'exhaustivité de ces informations. Cette publication n'a pas vocation à fournir des conseils juridiques, financiers, d'investissement ou autres conseils professionnels. Le Groupe décline toute responsabilité quant aux conséquences de l'utilisation de cette publication ou du crédit qui lui est accordé. Certaines déclarations contenues dans cette publication sont de nature prospective, notamment les déclarations qui constituent des prévisions ou indiquent des événements futurs, des tendances, des plans, des développements ou des objectifs. Il convient de ne pas se fier outre mesure à ces déclarations car elles sont par nature soumises à des risques et incertitudes connus et inconnus, et peuvent être affectées par de nombreux facteurs imprévisibles. Par ailleurs, l'objet de cette publication n'est lié à aucun produit d'assurance spécifique ni ne garantira une couverture par une quelconque police d'assurance. Toute distribution ou reproduction, totale ou partielle, de la présente publication sur d'autres canaux de communication est interdite, sauf autorisation écrite préalable de Zurich Insurance Group Ltd, Mythenquai 2, 8002 Zurich, Suisse. Zurich Insurance Group Ltd et ses filiales déclinent toute responsabilité en cas de préjudice découlant de l'utilisation ou de la distribution de cette publication. Cette publication ne constitue ni une offre d'achat ou de vente ni une invitation à acheter ou vendre des titres dans un quelconque pays.

